



Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias
ISSN: 1697-011X
revista.eureka@uca.es
Universidad de Cádiz
España

El aprendizaje basado en modelos mantiene a los alumnos activos y con atención sostenida

Figueiredo, Aline Oliveira; Perticarri, Andre

El aprendizaje basado en modelos mantiene a los alumnos activos y con atención sostenida
Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias, vol. 19, núm. 3, 2022
Universidad de Cádiz, España
Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92070576015>
DOI: https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2022.v19.i3.3102

El aprendizaje basado en modelos mantiene a los alumnos activos y con atención sostenida

Model-based learning keeps learners active and with sustained attention

Aline Oliveira Figueiredo

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus São Paulo, Brasil
aline24_bio@yahoo.com.br

 <https://orcid.org/0000-0003-3418-332X>

DOI: https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2022.v19.i3.3102

Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2022.v19.i3.3102
Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92070576015>

Andre Perticarrari

Departamento de Ciências e Matemática, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, campus São Paulo, Brasil
aperticarrari@ifsp.edu.br

 <https://orcid.org/0000-00 02-8200-5854>

Recepción: 12 Noviembre 2021

Revisado: 30 Noviembre 2021

Aprobación: 07 Julio 2022

RESUMEN:

Entre varios enfoques de enseñanza activa, tenemos el Aprendizaje Basado en Modelos (ABM). Muchos estudios neurocientíficos han demostrado la relación entre el funcionamiento del cerebro y el ABM, el papel del compromiso activo, atención y error en el aprendizaje. Sin embargo, no hay ninguna investigación que relacione estos tres últimos con el uso del ABM. Nuestro objetivo era comprobar si el uso del enfoque ABM, unido a una enseñanza de las ciencias por investigación, proporciona un compromiso activo del alumno, desencadenando mecanismos de atención y revisión o feedback basados en el error. Verificamos, en los resultados, el compromiso activo, la atención y la revisión de los errores, y concluimos que el ABM, asociado a la enseñanza investigativa, promueve el compromiso activo desencadenando la atención sostenida; y el error y la revisión tienen un papel clave en este proceso, manteniendo a los estudiantes comprometidos en la solución y realización de las tareas.

PALABRAS CLAVE: Aprendizaje basado en modelos, compromiso activo, atención, error, feedback.

ABSTRACT:

Among several active teaching approaches, we have Model-based Learning (MBL). Many neuroscience studies have demonstrated the relationship between brain functioning and MBL, the role of active engagement, attention, and error in learning. However, no research relates the latter 3 to the use of MBL. Our aim was to see if the use of the MBL approach, coupled with an investigative teaching sequence, provides active student engagement, triggering attention and error-based feedback mechanisms. We verified, in the results, the active engagement, attention and feedback from the errors, and concluded that MBL, associated with investigative teaching, promotes active engagement triggering sustained attention; and the error and feedback play a key role in this process, keeping students engaged in solving and completing the tasks.

KEYWORDS: Model-based Learning, active engagement, sustained attention, error, feedback.

INTRODUCCIÓN

Seguimos viendo en la escuela una enseñanza basada en la transmisión de contenidos, con el alumno como receptivo, recibiendo una amplia gama de información, y el profesor como detenedor de todo el conocimiento. Ante tanta información, los jóvenes tienen dificultades para centrarse en la información esencial en una situación determinada y utilizarla en su vida cotidiana.

El reto, por lo tanto, consiste en desarrollar en los alumnos la capacidad de buscar, seleccionar y utilizar los contenidos adecuados, organizar las distintas informaciones de forma significativa y generar soluciones a los problemas que se les plantean. En otras palabras, debemos buscar una enseñanza que conduzca al compromiso activo y ayude al alumno a desarrollar la atención. La creación de un entorno estimulante y desafiador para los alumnos puede ser propicio y el profesor tiene un papel fundamental. Debemos tener siempre presente por qué los alumnos necesitan aprender determinados contenidos y cómo pueden llegar a ser significativos. Así, las actividades centradas en el alumno, con interactividad, orientación y presentación de objetivos a alcanzar, son recursos compatibles con lo que se conoce sobre los procesos atencionales (Cosenza y Guerra 2011).

La investigación en neurociencia está mostrando la importancia de la participación activa o el compromiso y la atención en el desarrollo cognitivo, es decir, los estudiantes aprenden mejor y más rápido cuando su experiencia está asociada a un entorno interactivo con objetivos claros y revisión orientada al error (Dehaene 2019).

Relacionado con este contexto y entre varias metodologías activas, está el uso de la modelización, o más concretamente, el Aprendizaje Basado en Modelos (ABM). El ABM asume que la modelización es fundamental para la práctica científica y, por lo tanto, este enfoque puede ser central en el proceso de enseñanza y aprendizaje (Wilson *et al.* 2020). Varios estudios muestran la relación de la modelización con aspectos neurofuncionales, como el papel de la corteza prefrontal en el razonamiento basado en modelos y el papel del control proactivo en los enfoques basados en objetivos (Braver 2012; Seel 2017; Huang *et al.*, 2020). Al crear modelos para explicar o predecir fenómenos, los alumnos deben conocer los conceptos y las variables, sabiendo distinguir cuáles son fundamentales en su construcción. El uso de la modelización parece ser una herramienta que puede promover el compromiso activo, la atención y las formas de feedback basadas en el error, ayudando a desarrollar en los estudiantes la capacidad de buscar y seleccionar el contenido apropiado y organizarlo de manera significativa en la comprensión de los fenómenos naturales. Sin embargo, esto aún no ha servido de base para la realización de estudios más sistematizados con ABM.

Así, nos cuestionamos si el enfoque ABM puede promover el compromiso activo de los estudiantes, desencadenando procesos de atención y revisión o feedback basados en el error en la realización de las tareas. Nuestro objetivo era comprobar si el uso de este enfoque, unido a una enseñanza de las ciencias por investigación sobre temas de ecología, puede desencadenar dichos mecanismos en la solución de tareas importantes para el aprendizaje.

MODELIZACIÓN Y ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS

La modelización de los fenómenos naturales y sociales siempre ha formado parte del proceso científico y el gran esfuerzo de la ciencia es modelizar el mundo real (Hestenes 1992). El papel de la modelización en la ciencia es buscar la comprensión del mundo físico y social con intención explicativa y predictiva. Dicho de otra manera, los modelos pueden aparecer como representaciones físicas, verbales, pictóricas o simbólicas proporcionando experimentos y simulaciones, ayudando a las personas a aprender (Seel 2017).

De este modo, entendemos que la modelización expresa el sentido de la construcción, una acción (modelar), que puede acompañar el proceso de formulación de hipótesis, la comprobación, el análisis de datos, la predicción, la argumentación, entre otras habilidades importantes en la enseñanza de las ciencias.

Hay varias formas de modelar los fenómenos científicos a través de la representación tridimensional (modelos de representación), como las maquetas, los terrarios, los acuarios; utilizando un conjunto de supuestos para la descripción de un objeto o sistema (modelos imaginarios), como el modelo del ADN, los enlaces químicos; o modelos teóricos con la explicitación de los supuestos de un objeto o sistema, como los ciclos del carbono y del agua y el sistema solar, que también pueden expresarse matemáticamente (Paz *et al.*, 2006).

Además de los modelos descritos anteriormente, existen, en la literatura, otras definiciones y caracterizaciones diversas. Según Dutra (2005) tenemos: los modelos icónicos, que presentan similitudes estructurales o de detalle con otras estructuras o sistemas; los modelos analógicos, que comprenden objetos a escala y exagerados, como símbolos, ecuaciones y gráficos, diagramas y mapas, simulaciones que propician la comunicación científica; los modelos de simulación, que modelan procesos complejos, como el calentamiento global, las reacciones nucleares, los accidentes, las fluctuaciones de la población; y el modelo pedagógico, la representación simplificada de una idea, un objeto, un sistema, que pretende facilitar la comprensión, por parte de los alumnos, de esos mismos objetos. Igualmente, Batista *et al.* (2011, p. 3-4) señala dos enfoques de la modelización: a) axiomático, "considera que una teoría científica se compone de dos partes: un sistema formal en el sentido lógico y matemático" y b) semántico, "existe una relación directa y necesaria entre los tres componentes que intervienen en el proceso de teorización: teoría, modelos y datos (mundo)".

Un modelo es una obra de ficción. Podemos atribuir a los modelos algunas propiedades genuinas de los objetos modelados, pero otras sólo serán propiedades de conveniencia (Dutra 2005). La elección del modelo a utilizar debe basarse en el objetivo que se quiera conseguir en ese momento, los recursos de que se disponga y el tiempo que se necesite para esa práctica docente.

Para el trabajo con estudiantes de secundaria, utilizamos, en este estudio, el modelo representacional con enfoque semántico. En este tipo de enfoque, existe un homomorfismo entre el modelo M y su original O ; en definitiva, la relación $O \rightarrow M$ no significa que la relación semántica deba ser definida con respecto a todos los elementos del objeto a modelar, sino sólo a elementos particulares (Seel 2017). En esta relación, M contiene menos elementos que O . Qué elementos de O debe contener el modelo dependerá de la función, del objetivo que se quiera para este proceso.

Algunos conceptos que deben enseñarse son relativamente abstractos, especialmente los fenómenos científicos. Concretar algo requiere que los profesores utilicen algunas estrategias, como ejemplos, analogías, metáforas, esquemas e incluso la elaboración de modelos (Gödek 2004). Así pues, un modelo pedagógico es una representación simplificada del objeto que se quiere entender, con el fin de facilitar su comprensión por parte de los alumnos (Kapras 1997).

Varios autores como Harison y Treagust (2000), Gödek (2004), Ferreira (2006) y Prestes (2013) advierten cuanto a un peligro en el uso de modelos en la enseñanza: se corre el riesgo de que los alumnos piensen que el modelo corresponde a la realidad y no a una aproximación de la misma. Además, el alumno puede ver la ciencia como algo poco fiable. Corresponde al profesor deshacer esta falsa analogía, a través de explicaciones y comparaciones, de lo contrario el modelo será ineficaz en este contexto. Así, entendemos que es función del profesor conseguir que los modelos utilizados en las aulas de ciencias estimulen a los alumnos a investigar y construir su conocimiento (Gödek 2004).

A partir de este supuesto, entendemos que el uso de modelos en el aula puede entenderse como una herramienta que los científicos utilizan en el proceso científico, ya que, a partir de una situación concreta, se estimula a los alumnos para que pongan en práctica una idea, un modelo mental y, en consecuencia, construya un modelo análogo concreto, creando, expresando y probando así los modelos.

Pietrocola (1999), en su trabajo sobre el realismo científico de Mario Bunge, estableció una relación entre los objetos-modelo y los objetos-reales, que, en cierto modo, justifica el uso de los modelos como objeto para hacer predicciones, porque el modelo empieza a representar lo real. A partir de las proposiciones iniciales podemos hacer predicciones, ya que los modelos son una red de relaciones deductivas entre las propiedades y los comportamientos de los objetos modelados, y también es posible hacer extrapolaciones a las situaciones reales para las que fueron construidos (Pietrocola 1999).

Aun sobre la importancia del uso de modelos en las clases, estos son métodos y productos de hacer ciencia, y es imposible enseñar y entender fenómenos científicos, como los genes, la deriva continental, la sucesión ecológica, sin el uso de modelos (Harison y Treagust 2000). Estamos de acuerdo con Gödek (2004, p. 56) en que, en la enseñanza, "los modelos son poderosos puentes que hacen que fenómenos

desconocidos parezcan más relevantes en la enseñanza de las ciencias, son herramientas extremadamente útiles en el proceso de enseñanza-aprendizaje". Al modelar, los alumnos crean representaciones del objeto, seleccionan, conceptualizan y articulan aspectos importantes para generar explicaciones, luego el modelo es sometido a pruebas, revisiones y reelaboraciones, produciendo explicaciones y descripciones, como en el proceso científico (Ferreira 2006).

Así, una de las posibilidades para obtener una visión integral y consistente sobre la modelización y su relación con el aprendizaje es entenderla como un proceso de negociación entre los modelos de la ciencia y los modelos de los alumnos (Setúval y Bejarano 2009).

MODELIZACIÓN Y APRENDIZAJE DE LAS CIENCIAS

Justi y Gilbert (2002) desarrollaron un esquema (Figura 1), conocido como *Modelo de Modelización*. Este diagrama contiene pasos basados en el proceso científico de hacer ciencia, que ayudan a los estudiantes en la construcción de su modelo a partir de la elaboración de un modelo mental.

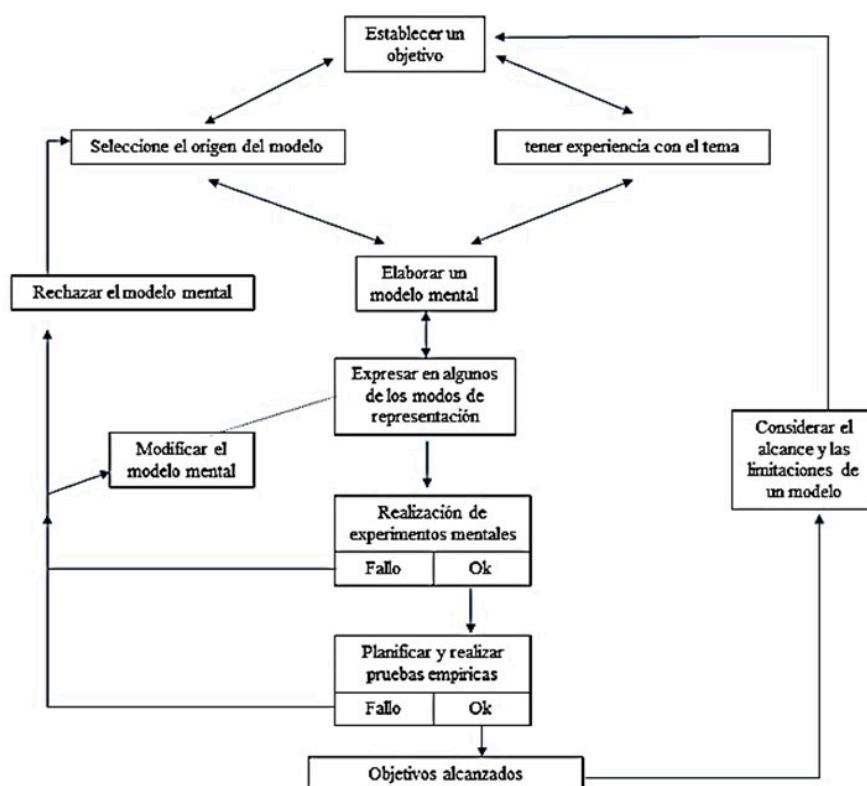


FIGURA 1
Esquema del modelo de modelización.
Justi y Gilbert (2002, p. 357)

La actividad de modelización consiste en confrontar los modelos científicos con los modelos construidos por los alumnos. El modelo de la ciencia es un conocimiento producido que hay que enseñar, mientras que el modelo del alumno es la expresión de la comprensión de dicho conocimiento. Además, Paz *et al.* (2006) describieron el uso de dos tipos más de modelos, el modelo teórico de carácter hipotético y el modelo empírico, resultante de la manipulación y el tratamiento de los datos, y que se basa en el modelo teórico.

Cuando pensamos en cómo enseñar, previamente pensamos en ¿qué? y ¿para qué? Si, dentro de la planificación, el profesor de ciencias decide utilizar el modelo como herramienta didáctica, debe cuestionarse

sobre sus objetivos y cuestionar, también, su uso. Pietrocola (1999, p. 225) presenta algunas cuestiones: "¿qué se hace con la modelización? ¿Qué aporta esto? ¿Cómo funciona esto en el pensamiento científico? ¿Qué tipo de actividades concretas se pueden proponer en el aula?". Al final responde a estas preguntas utilizando los conceptos de Bunge sobre los modelos, es decir, la modelización tiene como objetivo apreender y comprender lo real y su construcción como un proceso creativo y mediado, y el aula debe utilizar actividades que contrapongan el sentido común (lo real inmediato) a lo real idealizado por la ciencia (Pietrocola 1999).

Con base en las ideas expuestas anteriormente, podemos entender, según el marco teórico de la psicología educativa, que el aprendizaje se produce en el momento en que los individuos construyen representaciones del mundo significativas, como modelos mentales que representan ideas, pensamientos y comunican significados sobre un fenómeno (Seel 2017). Además, según los estudios neurocientíficos, podemos distinguir dos sistemas cognitivos distintos, pero no independientes que controlan los pensamientos y las acciones, el control reactivo y el proactivo. Según Braver (2012, p. 106), el control proactivo es una forma de

"selección temprana" en la que la información relevante para la meta se mantiene de forma activa y sostenida, antes de que se produzcan los eventos cognitivamente exigentes, con el fin de influir de forma óptima en los sistemas de atención, percepción y acción de forma orientada a la meta. [...] en el control reactivo, la atención se recluta como un mecanismo de "corrección retardada" que se moviliza sólo cuando se necesita de manera puntual, como por ejemplo después de detectar un evento de alta interferencia. Así, el control proactivo se basa en anticipar y prevenir las interferencias antes de que se produzcan, [...] el control reactivo se basa en detectar y resolver las interferencias después de su aparición.

A partir de estos sistemas, encontramos dos conceptos relacionados: el aprendizaje basado en modelos y el aprendizaje libre de modelos. En este último, se activan mecanismos para realizar una tarea basados en recuerdos, es decir, asociados a un control reactivo, mientras que el aprendizaje basado en modelos contiene simulaciones de acciones potenciales y consecuencias resultantes de decisiones dirigidas a un objetivo, es decir, asociadas a un control proactivo (Braver 2012; Seel 2017).

Así, entendemos que el control proactivo se ajusta al esquema presentado en la Figura 1, en el que los estudiantes confrontan sus modelos mentales con los modelos de la ciencia, en un proceso que implica compromiso activo, atención y error/feedback que, según las investigaciones en neurociencia, son 3 de los 4 pilares fundamentales en el aprendizaje (Dehaene 2019). En esta investigación no trabajamos en uno de los pilares, la consolidación, ya que implica otros aspectos de la neurofisiología, como el sueño, por ejemplo.

El primer pilar, el compromiso activo, se basa en la premisa de que para aprender hay que comprometerse, explorar el mundo, generar hipótesis sobre él y ponerlas a prueba, discutir con los compañeros, en definitiva, ser el actor principal del proceso (Dehaene 2019). Uno de los puntos de este pilar, que, a nuestro entender, está vinculado al aprendizaje basado en modelos y con el control proactivo, es tener una idea clara de la meta que se quiere alcanzar y estar plenamente implicado, es decir, mantener activa la información relevante y estar centrado en la generación de modelos mentales (Braver 2012; Dehaene 2019). Brevemente, tanto en el control proactivo como en el compromiso activo, las regiones de la corteza prefrontal están involucradas e interconectadas con el hipocampo relacionado con la memoria episódica y explícita, así como con otras regiones corticales involucradas con el habla, las imágenes y las áreas sensoriales, maximizando la memorización (Dehaene 2019).

En otro pilar, el de la atención, esta se produce con la focalización en determinados aspectos del entorno y en la selección de información relevante almacenada en diferentes regiones cerebrales (Consenza y Guerra 2011; Dehaene 2019). En este sentido, también entendemos que, en el ABM, la atención sostenida, relacionada con el control proactivo, es fundamental, ya que mantiene la atención durante más tiempo. La atención está relacionada con dos circuitos cerebrales, el orientador y el ejecutivo. El primero selecciona el estímulo más relevante en un momento determinado, amplificando el objeto de interés; el segundo mantiene la atención sostenida, seleccionando los procesos relevantes para una determinada tarea, controlando su ejecución (Consenza y Guerra 2011; Dehaene 2019). Todo ello implica la motivación, ya que los sistema orientador y sistema ejecutivo están conectados con el *locus ceruleos* (en el mesencéfalo) relacionado con la

regulación del estado de alerta y, por lo tanto, relacionado con los retos, la motivación, importante en el aprendizaje (Fonseca 2016).

Por último, tenemos la revisión o feedback y el papel del error en el proceso de aprendizaje. Su relación con el ABM parte del hecho de que el aprendizaje no es posible sin el error, o en palabras de Dehaene (2019, p. 260), "Los organismos sólo aprenden cuando los acontecimientos contrarían sus expectativas. En otras palabras, la sorpresa es uno de los motores fundamentales del aprendizaje", como en los conflictos cognitivos, por ejemplo. A partir del error, el profesor puede dar un buen feedback a los alumnos, permitiendo su revisión, confrontando sus conocimientos previos con los científicos, o en otras palabras, confrontando sus modelos del mundo (modelos mentales) como los modelos de la ciencia. Ahí está, a nuestro entender, la relación de la ABM con el error y el feedback.

Sin embargo, aunque la literatura relaciona las actividades de modelización en la enseñanza articuladas con aspectos funcionales del cerebro, no hay estudios que se centren en el compromiso activo, la atención y el error y el feedback de forma deliberada para entender cómo la ABM puede desencadenar estos procesos señalados por Dehaene (2019) como pilares para el aprendizaje.

METODOLOGÍA

Tenemos en cuenta en esta investigación cualitativa todo el proceso desarrollado, es decir, cómo el uso del enfoque ABM, asociado a una enseñanza de las ciencias por investigación, puede proporcionar el compromiso activo del estudiante, desencadenando mecanismos de atención y feedback basados en el error importante para el aprendizaje. El propósito de la investigación cualitativa es comprender y profundizar en los fenómenos que se exploran desde la perspectiva de los participantes en un entorno natural en relación con el contexto (Sampieri *et al.* 2013).

Realizamos la investigación con 41 estudiantes del primer grado de secundaria, con una edad media de 15 años, de una escuela de educación técnica integrada a la secundaria, en el municipio de Jacareí, estado de São Paulo, Brasil, entre octubre y noviembre de 2019. Los alumnos sujetos de la investigación son estudiantes de un curso técnico (profesional) en medio ambiente. Por tratarse de una asignatura (Dinámica de ecosistemas) con actividades prácticas, el reglamento de la escuela permite la división del aula en dos clases, para un mejor desarrollo de la lección; así, todas las etapas ocurrieron en dos clases, la clase A (con 21 alumnos) y la B (con 20 alumnos); por lo tanto, toda la investigación se repitió en las clases A y B. Los alumnos que participaron en el estudio eran estudiantes de la profesora que cursaba un máster profesional en educación científica y matemática y, junto con su asesor, fueron los responsables de esta investigación. Al tratarse de un máster profesional, los profesores aportan los problemas que identifican en sus centros y, junto con los asesores, tratan de resolverlos.

Para ello, desarrollamos la enseñanza de las ciencias por investigación en la que se utiliza el enfoque ABM, según el esquema propuesto por Justi y Gilbert (2002), en que los estudiantes fueron desafiados con problemas relacionados con la ecología. La enseñanza por investigación siguió el modelo propuesto por Carvalho (2013) en el que se propone un problema, se discute y, habiéndose planteado una hipótesis, esta se pone a prueba y se vuelve a discutir. La actividad de enseñanza se dividió en tres etapas: 1) Montaje de terrarios (modelización), 2) Investigación del problema utilizando los modelos y 3) Observación hasta la conclusión. La división de los alumnos en grupos fue para que hubiera un trabajo colectivo e intercambio de ideas. Cada grupo se encargó de montar los terrarios (modelo de representación), recoger los datos y discutir los fenómenos observados, proponiendo cuestiones a analizar dentro de los conceptos de ecología (enfoque semántico) que se discutieron previamente en clase: fotosíntesis, efecto invernadero, sucesión ecológica y lluvia ácida.

Para la recogida de datos se utilizó la observación directa y las grabaciones, con la posterior transcripción de los diálogos entre los alumnos y el profesor. Las grabaciones se realizaron en los grupos mientras los

alumnos realizaban las acciones y discutían sobre los modelos. También pedimos a los alumnos que hicieran un cuaderno de campo. El cuaderno de campo es un recurso de apuntamientos, donde los alumnos insertan detalles relevantes de un proyecto y para el seguimiento de la investigación en el aula (Oliveira *et al.*, 2017). Le pedimos a cada alumno que elaborara el cuaderno de forma individual y, preferiblemente, manual, describiendo su recorrido durante el proceso de modelización.

Verificamos los datos a través del análisis de contenido propuesto por Bardin (1977), tratando de identificar aspectos en la actividad con los alumnos y sus producciones que indicaran un compromiso activo, atención y feedback basado en el error. Aun sin utilizar equipos de neuroimagen funcional, intentamos asociar los diálogos transcritos y los cuadernos de campo que nos remiten a aspectos relacionados con los pilares del aprendizaje e, indirectamente, a los procesos neurofuncionales que subyacen a ellos. Sin embargo, hay varios datos en la literatura que muestran, en situaciones controladas, los mecanismos neurofuncionales de la atención, de la acción activa (Braver 2012; Seel 2017; Huang *et al.*, 2020). No hay forma de recoger datos de neuroimagen funcional *in situ*, es decir, en una situación real de clase.

RESULTADOS

A partir del análisis inicial, preanálisis y exploración del material según Bardin, decidimos utilizar las categorías para la interpretación de los datos previamente definidas por nuestro marco teórico: compromiso activo, atención, feedback a partir del error, su alcance y el papel de un modelo. Nuestro objetivo aquí no era presentar los datos relacionados con los temas propuestos a los estudiantes, sino, más bien, mostrar la evidencia de cómo los modelos pueden ayudar en la movilización del conocimiento (atención), el compromiso activo y el papel del feedback y el error en estos procesos.

En general, los alumnos ya habían estudiado los temas trabajados en la actividad de modelización y durante la asignatura a lo largo del año en las clases teóricas y prácticas de laboratorio.

Comprobamos que todos los alumnos participaron en las actividades propuestas, manifestándose en algún momento, y todos ellos elaboraron el cuaderno de campo. Sin embargo, algunos participaron más y otros menos. Los que más participaron (que representan alrededor del 80%) tenían más conocimientos previos sobre los temas y sus cuadernos de campo eran más completos, con datos y lenguaje más concisos y coherentes. Son alumnos más participativos e interesados. Sin embargo, el papel deliberado del profesor en la motivación no era el objetivo de este estudio.

Así pues, a continuación, presentamos los resultados de cada etapa del ABM unido a una enseñanza de las ciencias por investigación y por categorías.

Etapa 1 - Montaje del terrario (modelización)

En esta primera etapa de la enseñanza, realizamos el proceso de modelización del terrario de todos los grupos para representar aspectos de los ecosistemas antes de las intervenciones en las etapas siguientes (Figura 2). Además, los alumnos montaron otro terrario para que fuera el control. La función del terrario de control era servir de comparación con los modelos de cada grupo y verificar los cambios producidos.



FIGURA 2
Foto de dos de los terrarios montados por los alumnos.

Con todos los materiales ya disponibles en el laboratorio (vidrio, tierra, agua, grava, arena, plantas, etc.) se inició el montaje, siempre interrogando a los alumnos sobre las funciones de cada material y su correlación con el medio natural. Además de las preguntas, se estimuló a los alumnos a observar y cuestionar todo el procedimiento y la razón de utilizar los materiales y sus funciones en el modelo. Este es un principio epistemológico básico en la ciencia, ya que en un entorno de investigación se necesitan conocimientos previos para el trabajo científico, como por ejemplo en la experimentación y la modelización.

En este momento ya podemos ver la movilización de conocimientos previos por parte de los alumnos al pensar en el montaje del terrario:

Extracto 1:

Profesora (Prof.): *¿Por qué he traído la tierra, la piedra y la arena?*

Alumno (Al.): *Para recrear un ambiente.*

Extracto 2:

Prof: *¿La roca madre es permeable o impermeable?*

Al: *Impermeable.*

Prof: *¿Y qué será impermeable aquí?*

Al: *El vidrio. (...)*

Prof: *La arena y luego la tierra. ¿Necesitaremos poner agua aquí? ¿Qué te parece?*

Al: *Tendrás que ponerlo, porque es una reserva.*

Extracto 3

Al: *Profesora, mira el color de la tierra!*

Al: *Parece que tiene purpurina.*

Al: *Mira el color de la tierra! ¡Negro, negro, hermoso!*

Prof: *Esta tierra negra, negra y hermosa es buena para...*

Al: *Tiene humus.*

Al: *Para plantar.*

Al: *Vamos a retirar algunas hojas que se han caído de la planta para formar materia orgánica*

Podemos notar esta reproducción de conocimientos también en la representación de los modelos en el cuaderno de campo por parte de otros alumnos (Figura 3), que no sólo muestran la capa abiótica, sino que insertan las hortalizas que se plantaron, y destacan tres capas del suelo y sus respectivas funciones. Destacan las características de estas capas, correlacionando la realidad con la funcionalidad en el modelo.

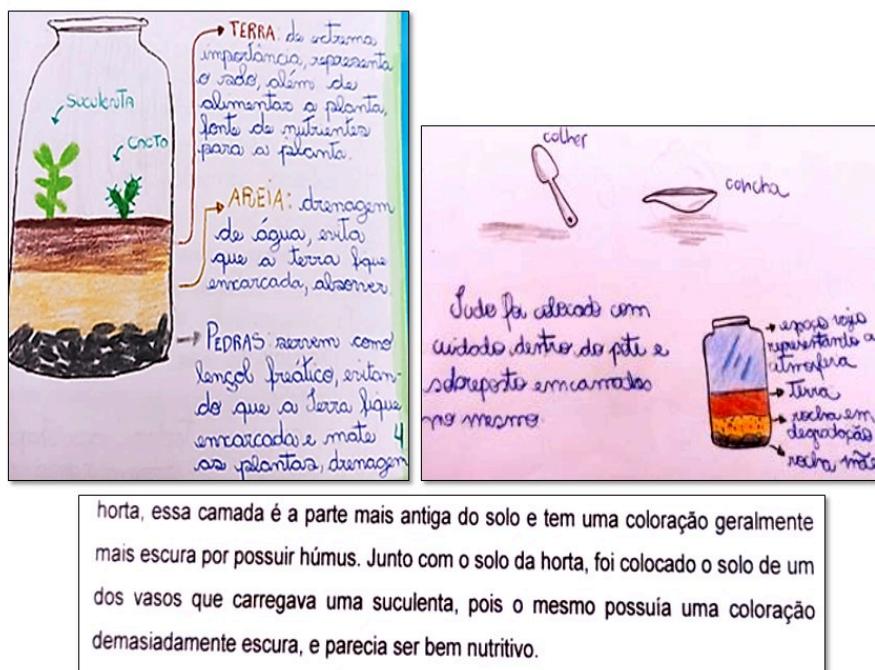


FIGURA 3
Extractos del cuaderno de campo, que muestran la movilización de conocimientos por parte de los alumnos.

Observamos, a partir de los datos anteriores, que se activan los procesos atencionales, ya que notamos que se movilizaron ciertos conceptos en la construcción de la maqueta: materia orgánica y humus, suelo, nivel freático, entre otros, que los alumnos consideraron necesarios para este fin.

Al final de la construcción de la maqueta, al añadir el agua, la profesora les pedía que observaran con atención lo que ocurriría en ese momento, y también les preguntaba acerca de un posible error (Al decir esto, el profesor llama la atención sobre un error que podría haberse producido) causado por un exceso de agua, para que hicieran hipótesis sobre cómo sortear este problema (feedback). Nos dimos cuenta de la relación que los alumnos hicieron con el agua y su proceso físico (evaporación e infiltración o percolación):

Extracto 4:

Prof: *Si lo sostienes, puedes ver que el agua... ¿Qué pasa con el agua? ¿Qué puedes ver en el lateral? El agua está bajando.*

Al: *Percolando, está percolando.*

Extracto 5:

Prof: *Pero piensa que en las rocas, dentro del entorno del suelo, tenemos una capa freática, por lo que hay que dejar un poco de reserva, si notamos que el agua estaba en exceso, ¿qué podemos hacer?*

Al: *Déjalo abierto un poco.*

Durante el montaje de los modelos, se evidenció el compromiso activo y también, a partir de las discusiones entre los alumnos, el reconocimiento de errores y su posterior solución (Figura 4), siempre con la ayuda de la profesora (feedback), es decir, la revisión a partir del error.

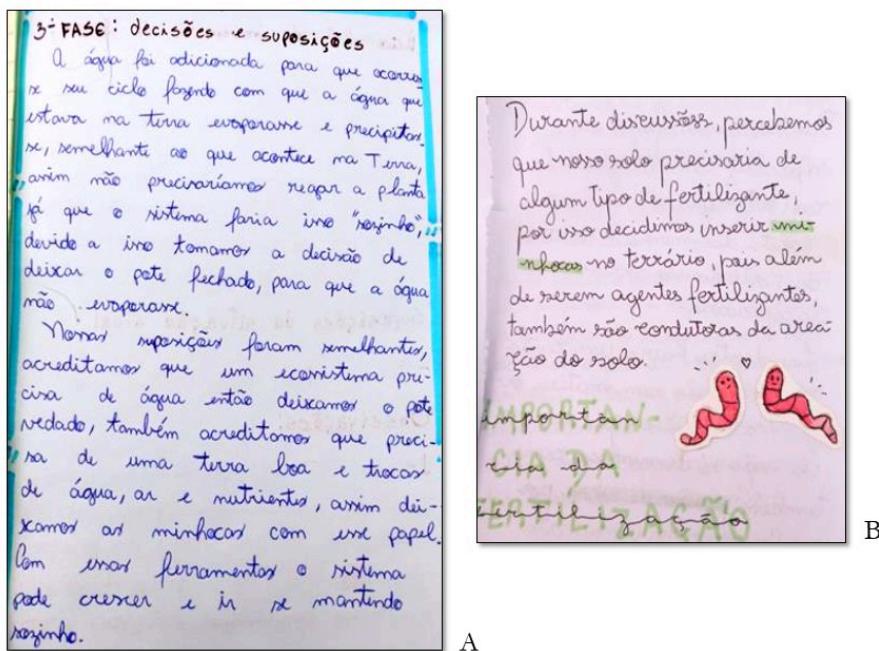


FIGURA 4

Discusión reportada en el cuaderno de campo. Muestra la participación de los estudiantes en la toma de decisiones (A) y la percepción de los errores y las formas de corregirlos (B).

El proceso de ensamblaje corresponde a la acción de modelar, componiendo el modelo de forma manipulativa. Para la ejecución, hay una relación de conceptos previamente interiorizados, ya sea de forma académica o empírica, para que los alumnos hagan comparaciones entre la realidad y el terrario, como la relación entre el vidrio y la roca madre por su impermeabilidad (extracto 2). El proceso de infiltración y la formación de la capa freática (extractos 2 y 4) también se correlacionan con la realidad, ya que, a través de analogías y observaciones, los alumnos perciben eventos que ocurren naturalmente en el ecosistema, teniendo el terrario como comparativo, es decir, representativo y análogo al mundo real.

Podemos afirmar, a partir de los datos anteriores, que se desencadenaron procesos atencionales (atención) que permitieron el acceso al control ejecutivo y la movilización de memorias (conceptos), como el ciclo de los nutrientes, la formación del suelo, el ciclo del agua, todos ellos trabajados en otros momentos del año. Además, fue posible percibir las revisiones de los errores, lo que permitió solucionar y reajustar los modelos.

Etapa 2: Investigación del problema utilizando los modelos

Se estipuló un periodo de 15 días para que el terrario se estabilizara, sin que se realizara ninguna interferencia. Aquí se realizaron interferencias en los modelos para resolver los problemas propuestos. En esta fase, los alumnos siempre comparaban los resultados de las interferencias realizadas en los modelos con el control.

Observamos, en esta etapa, que el proceso de compromiso activo es también muy notorio (Tabla 1), además del papel del error en el que los estudiantes se dan cuenta de la inconsistencia de sus expectativas, descartando su modelo, justificando el error y creando un modelo mental que, para ellos, sería efectivo. Por ejemplo, los alumnos que trabajaron sobre el efecto invernadero se quedaron perplejos porque el terrario no tenía gotas apreciables en el cristal, a diferencia del terrario de control, que tenía varias gotas. Dentro de esta problemática, se cuestionaron (ver tabla 1), a partir de la observación (Al: *¿Cómo no se va a precipitar si la cosa está mojada?*), la discusión (Al: *Sí, pero no mucho.* Al: *Tal vez pusimos muy poca agua*) y la creación de hipótesis (Al: *A veces ya se ha precipitado todo y se toma una etapa equivocada en el ciclo...*), acciones importantes en

el mantenimiento de la atención sostenida, muy relacionadas con el control proactivo asociado a las áreas corticales responsables del habla, la percepción de imágenes que son importantes en la memorización.

TABLA 1
Extractos de los diálogos mantenidos durante la etapa 2.

	Compromiso activo	Feedback del error	Atención
Extracto 6	<p>Al: Pero tenía precipitación, pero era más pequeño que otro grupo. Al: ¿Cómo no se va a precipitar si la cosa está mojada? Al: Pero pusimos bastante.</p>	<p>Al: A veces ya se ha precipitado todo y se toma una etapa equivocada en el ciclo y se va a empezar de nuevo. Se evaporará de nuevo. Al: Sí, pero no mucho. Al: Tal vez pusimos muy poca agua. Al: Ya ha evaporado todo lo que tenía y ahora vuelve. (...)</p>	<p>Al: ¿Existe la posibilidad de que esté en otra fase del ciclo? ¿Cómo no haberse precipitado aún? Al: Tomamos otra fase. Sí, se puede ver, se puede ver qué tipo de agua es aquí. Pasamos a otra fase, puedes ver las gotas de agua aquí. Al: Profesora, ¿hay alguna forma de que podamos haber tomado esta en una etapa diferente (...) de condensación del ciclo del agua? ¿Es por eso que no es claramente visible? Al: Como puedes ver está condensado. Al: Como si ya hubiera terminado de hacer la condensación. Ahora va a ser como cuando es ... ¿volver a evaporarse?</p>
Extracto 7	<p>Los estudiantes discuten el plan: Al: Ah, hay tres pequeñas plagas. ¿Cuál va a ser nuestro plan? Al: ¿Cuál será nuestro plan? ¡Tenemos que interferir! Al: ¿Lanzamos agrotóxicos? Al: ¿Por qué no usamos nitrógeno a baja temperatura?</p>	<p>Al: ¿Pero qué quieres decir con que no es una sucesión ecológica? (...)</p>	<p>Al: Es la sucesión ecológica, pero aquí se está pidiendo: Aquí se pregunta qué pasará con el terreno si no se hace ninguna interferencia. Y también si se hacen interferencias, para que tengamos una de control. Al: La sucesión es el acto de autodesarrollo de la naturaleza de equilibrarse... Al: Básicamente vamos a interferir (...) Al: Creo que el nitrógeno, porque hay un estudio que demuestra que el nitrógeno es bueno para la planta, pero que demasiado mata a la planta por asfixia. Al: Ah, el NPK. Al: Si se ponen semillas que ya se han comido, como si fuera un pájaro el que las deposita porque en una sucesión ecológica de terreno inhabitable, a veces hay influencia de los pájaros... (...) Al: Las chicas hablaron de poner piedra para ver si crecen musgos o algún otro factor biológico. Al: Coloca la piedra para simular un entorno que aún no ha sido habitado, que en este caso sería una sucesión primaria.</p>

Para decidir qué interferencia y cómo hacerla, el grupo que trabajó en la sucesión ecológica, presentada en el extracto 7, realizó la discusión (compromiso activo) y el cuestionamiento ante las inconsistencias (feedback del error), recopilando hipótesis para optar por la mejor a utilizar. Todo esto permite una atención y movilización sostenida de los conocimientos, en consonancia con el tema propuesto.

Los alumnos que recibieron la pregunta: *Si el terrario se coloca en un ambiente poco iluminado, ¿habrá un cambio en la planta?*, respondieron a la pregunta y desarrollaron algunas hipótesis, llegando a una forma de representar el modelo, con la intención de probar o refutar la hipótesis elegida por el grupo, como se muestra en la Figura 5.

Después de todo el proceso de análisis, pasamos a elaborar hipótesis que pudieran responder a la pregunta contenida en la hoja que se nos entregó, algunas de ellas fueron:

- La vegetación se debilitará debido a la falta de luz y, en respuesta, perderá su pigmentación, la clorofila, oscureciendo el tono verdoso; (Hip)
- Muerte de la vegetación; (Cadera)

A partir de la formulación de hipótesis, decidimos entonces cubrir nuestro terrario con papel de aluminio para evitar cualquier incidencia de luz. (...) (Hip)



FIGURA 5
Extractos de los cuadernos de campo – Hipótesis sobre la luz y la fotosíntesis.

Además de notar que la modelización favorece el compromiso activo y la discusión de errores en este proceso, notamos que la atención sostenida también se mantuvo en esta etapa y la movilización de conocimientos estuvo muy presente. Esto se puede comprobar en otros grupos (Figura 6).

(A) Diálogos entre los alumnos del grupo que trabajó sobre el efecto invernadero.

Al: Y ahora hace mucho vapor y está reaccionando, tal vez nos equivocamos en la cantidad de azufre que se añadió...

Al: Así que la olla está un poco caliente y echa humo, mucho humo. ¿Soy yo o la planta se ha vuelto un poco blanca?

Al: Lo hizo un poco más blanco porque el humo es blanco entonces. (...)

Las plantas están sudando. Hay una gota en la planta.

Al: Puedes verla aquí. Está evapotranspirando.

Al: La niebla ha empezado a aclararse un poco pero todavía no ha reaccionado mucho, sigue. Una cosa que notamos es que empezaron a sudar, el agua empezó a acumularse en sus tallos y empezó a gotear de nuevo.

Al: ¿Se evaporó el agua porque se calentó demasiado?

Al: Así que no tiene mucho que ver con el azufre sino con el calor que el azufre produjo dentro de la cosa después de ser calentado. Así que está sudando por el calor del azufre que calentamos.

Al: Sí, sí

Al: ¡Ah, vale!

Al: Está sudando porque el agua y el vapor del azufre. ¿Y se va a convertir en qué?

Se convertirá en ácido.

Al: Es 5.0 de todos modos (referido al pH)

Al: ¿Y en cuánto estaba sin el azufre?

Al: 6.0 (referido al pH).

B

Voltando ao debate da chuva ácida, relembramos de uma aula técnica que tivemos na disciplina de Práticas em Química Ambiental (PQA). Nessa aula, usamos o enxofre em pó para contribuir na produção do SO₂ (dióxido de enxofre), um dos gases responsáveis pela formação da chuva ácida. E assim se fez: utilizamos dos mesmos procedimentos para aplicar naquele momento, o de experimentação.

C

Após a análise, a docente propôs a tema de Sucessão Ecológica para fazer uma interferência no terrário. Nos tivemos que pensar em elas, já que classificamos o terrário como sucessão primária por não possuir nenhuma forma de vida que influencia no ambiente e, juntas, concluímos que colocaríamos neles no terrário para elas colonizarem o ambiente e se competiriam com a presença das mudas.

(A) Diálogos entre los alumnos del grupo que trabajó sobre el efecto invernadero. (B) Extracto del cuaderno de campo y (C) Extracto del cuaderno de campo de un alumno que estudia la sucesión ecológica.

Se podría afirmar que el uso de preguntas problema como retos y las interferencias en los modelos promovieron la participación activa, la discusión sobre el error y la atención, especialmente en el reajuste de los modelos después de probar las hipótesis.

Etapa 3: Observación para la finalización

El último paso se produjo una semana después de la interferencia. La profesora les pidió a los alumnos que compararan su modelo posterior a la interferencia con los datos recogidos antes de la misma o con el terrario

de control. Se podría afirmar que se observan el compromiso activo, el papel del feedback del error y la atención sostenida (Tabla 2).

TABLA 2
Extractos de los diálogos de los alumnos durante la etapa 3.

	Compromiso activo	Feedback del error	Atención
Extracto 8	<p>Al: La prueba: Quemamos azufre en polvo y cerramos la olla.</p> <p>Al: La inferencia: usamos cinta tornasol para medir el pH del suelo y del agua en el terrario, que podíamos sentir por la transpiración, la precipitación</p>	<p>Al: Los resultados: Logramos observar la acidificación del suelo y la precipitación que fue de lo que tomamos las medidas, pero no logramos observar la muerte de las plantas, las plantas permanecieron intactas, por lo que sospechamos que es porque la planta tardó en observar el agua que tarda en morir, pero dio un color blanquecino.</p> <p>Al: Tenemos la "sospecha" de que el suculento tarda en morir. (...)</p>	<p>Al: Conclusión: Así que concluimos que la lluvia ácida tiene una gran influencia, tanto en las plantas como en las personas. Todo el mundo sufre con este proceso, y debe ser tratado correctamente porque su aumento puede afectar a la forma de vida de todos, y puede llevar a la destrucción.</p> <p>Al: La lluvia ácida hace mucho daño al medio ambiente urbano y a la vegetación, y sin duda debe ser observada y analizada, ya que sus consecuencias afectan a todos.</p>
Extracto 9	<p>Al: ¿Quieres desmontarlo para analizarlo más a fondo? Sí.</p>	<p>Al: El cristal estaba mucho menos mojado, pero cuando quitamos el aluminio, se quedó así. Empezó a mojarse mucho, empezó a llover, pero qué raro, cuando no hay interferencia de luz, la humedad era casi nula.</p>	<p>Al: La humedad disminuyó con el aluminio. Disminuyó con la lluvia y en cuanto trajimos la luz aumentó, así que la principal interferencia es la luz. La arena está muy mojada por debajo, la humedad ha bajado toda a la arena.</p> <p>Prof.: Concentración de la humedad, ¿por qué ponemos grava, arena y luego tierra? ¿Recuerdas la función del fondo? Alumnos: Mesa de agua.</p>
Extracto 10	<p>Al: ¿La hipótesis de que sólo pusiste una?</p> <p>Al: No, pongo 2, el de la muerte, el del debilitamiento y la pérdida de color.</p> <p>Al: ¿Medir el suelo de nuevo? ¿Dónde está la cinta? ¿Vamos tomar una foto?</p>	<p>Al: ¡Ha cambiado! Es diferente, es 2.</p> <p>Al: El suelo de la lluvia ácida era de 5.</p> <p>Al: El agua de la lluvia ácida era de 3.</p> <p>Al: Profesora, era 3,5. Vaya, ha bajado mucho.</p>	<p>Al: Agua destilada con tierra que ha sufrido lluvia ácida. Éste dio cinco, con uno normal de seis.</p> <p>Al: Las plantas son como más opacas, esta de aquí no logra sostenerse.</p> <p>Al: También tiene hongos.</p>

Podemos notar que los mecanismos atencionales relacionados con la movilización del conocimiento fueron más notables en esta etapa de la actividad, porque verificamos en los diálogos más conversaciones relacionadas con conceptos y fenómenos. En la tabla 1 se observa que los diálogos están relacionados con la resolución de problemas (Al: *¿Existe la posibilidad de que esté en otra fase del ciclo? ¿Cómo no haberse precipitado aún?* Al: *Tomamos otra fase. Sí, se puede ver, se puede ver qué tipo de agua es aquí. Pasamos a otra fase, puedes ver las gotas de agua aquí.* Al: *¿Cuál será nuestro plan? Tenemos que interferir!* Al: *¿Lanzamos agrotóxicos?* Al: *¿Por qué no usamos nitrógeno a baja temperatura?*) y en la tabla 2 con la explicación de fenómenos y conceptos (Al: *La inferencia: usamos cinta tornasol para medir el pH del suelo y del agua en el terrario, que podíamos sentir por la transpiración, la precipitación.* Al: *La lluvia ácida hace mucho daño al medio ambiente urbano y a la vegetación, y sin duda debe ser observada y analizada, ya que sus consecuencias afectan a todos.* Al: *La humedad disminuyó con el aluminio. Disminuyó con la lluvia y en cuanto trajimos la luz aumentó, así que la principal interferencia es la luz. La arena está muy mojada por debajo, la humedad ha bajado toda a la arena.*). Observamos, aquí, la atención de los alumnos durante más tiempo en la solución y explicación del problema. Esto también se puede observar en las entradas de los cuadernos de campo (Figura 7).

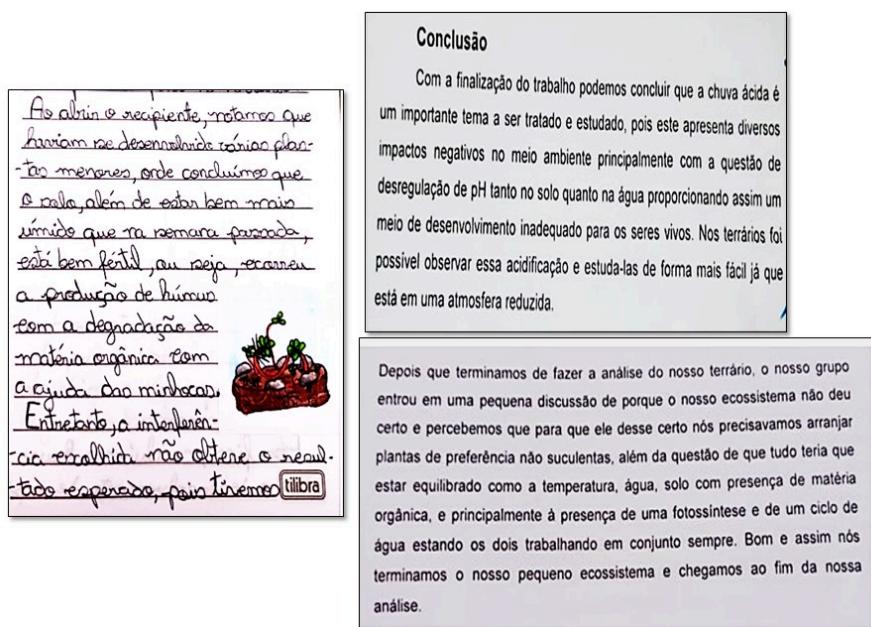


FIGURA 7
Recortes de los cuadernos de campo en los que se observa el uso de conceptos para explicar los fenómenos modelados.

Después de todos estos pasos, muchos alumnos fueron capaces de comprender el papel de los modelos como representación de sus ideas y como forma de que la ciencia explique los fenómenos, como se puede ver en el extracto tomado del cuaderno de campo que aparece a continuación:

A la vista de todos los seguimientos, análisis y pruebas creadas por el grupo, llegamos a la conclusión de que una gran forma de reproducir (a pequeña escala) las condiciones ambientales y climáticas de nuestra atmósfera, de forma fácilmente accesible, sería la construcción de un terrario en el que se colocarían plantas y otros seres, que podrían ser totalmente terrestres o no, que desempeñarían el papel de representar a los seres vivos del propio medio exterior y podríamos observar los cambios que se producen en estos organismos ante, por ejemplo, un experimento de lluvia ácida, como hizo el nuestro. Con las observaciones realizadas a lo largo del procedimiento en relación con el experimento de la lluvia ácida, podemos concluir que incluso dentro de una maceta, de un recipiente, el azufre tiene propiedades para dañar la fauna y la flora locales.

DISCUSIÓN

En una revisión sobre el uso de modelos en la enseñanza y el aprendizaje, Seel (2017) presenta resultados de estudios sobre el uso del aprendizaje basado en modelos que lo relaciona con mecanismos de control proactivo, que pueden influir en los sistemas atencionales. Sin embargo, no hay estudios que relacionen el aprendizaje basado en modelos con los tres pilares del aprendizaje basado en la neurociencia según Dehaene (2019), compromiso activo, atención y feedback del error, focos de este estudio.

Por lo tanto, en nuestra investigación, concluimos que el trabajo con Aprendizaje Basado en Modelos, asociado a la enseñanza de las ciencias por investigación, promueve el compromiso activo, que desencadena una atención sostenida, “que amplifica la información sobre la que nos concentrarnos” (Dehaene 2019, p. 220), y que el feedback a partir del error juega un papel clave en este proceso, ya que mantiene a los estudiantes comprometidos en la resolución y finalización de las tareas. Esto va unido a aspectos del funcionamiento del cerebro y su aplicación en la educación. Sabemos que mantener a los alumnos atentos durante la clase es un reto para el profesor. En general, las tareas desafiantes activan áreas cerebrales que desencadenan una serie de

acontecimientos que conducen a un aumento de la atención y, en consecuencia, a la activación de mecanismos cognitivos más elaborados. Así, con este artículo mostramos cómo el uso del enfoque ABM conduce a un aumento de la atención de los alumnos y a una participación más activa en clase, estando en consonancia con los mecanismos de funcionamiento del cerebro, y puede ser una estrategia a utilizar en las clases de ciencias. Veámoslo con más detalle.

Nuestro estudio analizó una secuencia didáctica de investigación utilizando el enfoque ABM en que los estudiantes desarrollaron terrarios como modelos de representación de entornos para estudiar diferentes problemas propuestos. En todas las etapas, observamos que se produjeron compromiso activo, movilización de conocimientos (relacionado con la atención) y la discusión de los errores encontrados, con feedback del profesor y de los propios compañeros de grupo (Feedback del error). Sin embargo, encontramos algunas diferencias sutiles.

En la primera etapa, los alumnos se encargaron de montar las maquetas. Al pensar en los materiales, en cómo disponerlos en el contenedor y en el papel de cada uno, los alumnos discutieron y elaboraron modelos mentales, e intentaron expresar formas de representación concreta según lo que proponen Justi y Gilbert (2002). En otras palabras, al construir modelos mentales, los estudiantes los comparan con sus conocimientos, proyectan su entorno y los relacionan con lo que reciben de los sentidos (Dehaene 2019), dicho de otra manera, el cerebro funciona así cuando el sujeto es desafiado. Esto podría interpretarse como el compromiso activo, visto en los diálogos mantenidos en las discusiones entre los alumnos y en los textos producidos en los cuadernos, cuando decidían qué hacer y cómo hacerlo. En definitiva, realizaban un procesamiento profundo y activo del objeto, en un esfuerzo por comprender los materiales y sus articulaciones con la realidad modelada, esto se relaciona con áreas de la corteza prefrontal, responsables del control proactivo y orientado a objetivos (Braver 2012; Dehaene 2019) y con el fenómeno de la atención.

Así, el compromiso activo activa los mecanismos atencionales, movilizando los conceptos, pero no cualquier concepto, sólo los relacionados con el objeto modelado. Aquí, la atención se centra en la construcción del modelo. Cuando se les reta a pensar en ello, su atención se dirige a este objetivo (control proactivo), lo que conduce a un estado de alerta por el *locus ceruleus*, que activa la atención voluntaria y los circuitos orientadores y ejecutivos que mantienen la atención sostenida (Consenza y Guerra 2011). Los alumnos relacionaron los materiales con los conceptos de ecosistemas, factores abióticos – como el suelo, el papel de las piedras y la capa freática – y bióticos – como el papel de los anélidos en la fertilización del suelo, el concepto de humus –, como se aprecia en los resultados presentados. Todo ello desencadena el circuito orientador y el circuito ejecutivo, el primero dirige la atención al objeto, a lo que discuten los compañeros del grupo, a los estímulos visuales y auditivos. El segundo mantiene atención sostenida, seleccionando los procesos, los conceptos que son apropiados para la tarea y activando la memoria de trabajo a través de la acción de registro, haciendo disponible la información almacenada (Consenza y Guerra 2011; Dehaene 2019).

Al mantener al alumno centrado en el objetivo y activo, sus errores son más fáciles de detectar (Consenza y Guerra 2011). Nos dimos cuenta de ello en los diálogos y en los cuadernos de campo, cuando los alumnos comunicaron los errores, las incoherencias en relación con su modelo mental y discutieron con sus compañeros y la profesora (Feedback del error) (ver los extractos 4, 5 y la Figura 3), hasta llegar a un consenso. Algunos estudios señalan la importancia de las discusiones y colaboraciones grupales, la llamada colaboración basada en modelos, esto facilita la identificación de problemas y la validación del modelo ocurre con menos esfuerzo individual (Seel 2017), siendo importante la sinergia en la organización del conocimiento compartido y no solo una superposición de este conocimiento (Mathieu *et al.* 2000).

En conclusión, en la etapa de construcción, el compromiso activo, atención y feedback del error se centraron en la construcción y validación del modelo por parte de los grupos de estudiantes, es decir, las discusiones, los conceptos movilizados y la solución de los errores encontrados tuvieron este propósito: adecuar el modelo como lo proponen Justi y Gilbert (2002).

En la etapa 2, los alumnos utilizaron los modelos previamente construidos para realizar interferencias y resolver problemas propuestos por la profesora. Aquí, lo más notable fue el planteamiento de hipótesis con la movilización de conceptos por parte de los grupos de estudiantes. Según Pietrocola (1999) y Paz *et al.* (2006), los modelos teóricos (representados por los conceptos, las teorías y los modelos mentales de los alumnos) están relacionados con el carácter hipotético, mientras que los empíricos (modelo de representación, en este caso los territorios) están relacionados con el tratamiento de los datos, basado en el modelo teórico. Esto significa que los problemas propuestos permitieron a los estudiantes hacer esta relación y todo esto sólo fue posible manteniendo el compromiso activo. En este caso, entendemos que este compromiso fue impulsado por la curiosidad frente a los desafíos propuestos, siendo este uno de los fundamentos del compromiso activo que mantiene la atención sostenida, cuando la mente se moviliza en la búsqueda de soluciones (Dehaene 2019), representado por las hipótesis discutidas en los grupos y en la movilización de conocimiento observada en los resultados. Según el mismo autor, la curiosidad está motivada por la búsqueda de nuevos conocimientos y, en términos neurobiológicos, activa el sistema dopaminérgico, que responde a las recompensas relacionadas con los nuevos conocimientos (Dehaene 2019).

Como hemos visto, todo esto conduce a la atención sostenida relacionada con la movilización del conocimiento. Observamos el efecto por el número de conceptos trabajados por los alumnos para explicar las hipótesis planteadas. Se trata del circuito ejecutivo que mantiene la atención hasta que se alcance la meta, importante para el aprendizaje consciente (Consenza y Guerra 2011) y, con la memoria de trabajo, para el mantenimiento también activo de las representaciones mentales, guiando las decisiones (Potter *et al.*, 2017). Entendemos, pues, que la modelización tiene la capacidad de proporcionar a los estudiantes la posibilidad de centrarse en los aspectos centrales del tema de estudio según sus objetivos (Mozzer y Justi 2018).

Sin embargo, entendemos que el compromiso activo que lleva a la atención sostenida está directamente conectado a la discusión de los errores encontrados. En esta fase, esto se percibió en las discusiones sobre las hipótesis planteadas y los resultados observados que, en algunos casos, iban en contra de las expectativas previstas (ver la Tabla 2 y las Figuras 4 y 5). Es lo que se denomina error de predicción, relacionado con el grado de sorpresa asociado a un estímulo (Dehaene 2019), en este caso, las inconsistencias entre lo predicho (las hipótesis de los alumnos) y lo encontrado (los datos encontrados por los alumnos). Esto está en consonancia con la modelización de Justi y Glibert (2002), en que, construyendo pruebas empíricas con los modelos y detectando fallos, los alumnos pueden repensarlos a partir de las discusiones de los errores detectados, siempre con la mediación del profesor y esto fue observado por nosotros. Además, hay estudios que demuestran que el feedback de errores es efectivo y que los alumnos rinden más en la resolución de tareas que aquellos que no reciben feedback del profesor (Seel 2017).

En conclusión, lo más destacable de esta etapa fue la atención sostenida, con el planteamiento de hipótesis y la movilización de conceptos, mantenida por el compromiso activo y la discusión de los errores encontrados sumada al feedback. En otras palabras, la atención es importante en la percepción de los errores y las características del objeto de interés, así como en la generación de la conducta voluntaria, e implica a las estructuras corticales del córtex prefrontal, como demuestran los estudios de neuroimagen (Rueda, 2018). Se trata de observar, cuestionar y pensar en soluciones (hipótesis).

Por último, llegamos a la etapa 3, en que los alumnos trabajan con los datos de interferencia para finalizar la actividad. Aquí, verificamos que la atención sostenida estaba relacionada con la explicación y solución del problema (con la discusión sobre las inconsistencias encontradas), es decir, los alumnos buscaban aquellos conceptos y fenómenos que ayudaban a explicar lo que observaban durante la interferencia en los modelos. Esto se ajusta a los principios neurofuncionales. Es decir, el problema y los datos (que funcionan como un estado de alerta) alteran el estado de vigilancia y atención al objeto de interés y el control ejecutivo selecciona la información adecuada para la ejecución de la tarea (Dehaene, 2019). Estas afirmaciones corroboran los estudios que señalan que el uso de modelos en la enseñanza moviliza el conocimiento, además de desarrollar habilidades como el análisis y la argumentación (Cárdenas *et al.*, 2021).

Por lo tanto, en esta etapa se notó más el sostenimiento, con la movilización del conocimiento para resolver el problema y completar el trabajo. Además, los alumnos percibieron el terrario como un modelo utilizado en la explicación y predicción de fenómenos naturales, considerando el alcance y las limitaciones de un modelo (Justi y Gilbert 2002).

Con esto, mostramos cómo el uso del enfoque ABM puede desencadenar el compromiso activo, desarrollando la atención sostenida de los estudiantes y el feedback a partir del error desempeñando un papel clave en estos procesos, manteniendo a los estudiantes centrados en la resolución de los problemas encontrados. Y todo de acuerdo con los mecanismos neurofuncionales respaldados por la investigación neurocientífica, como el estudio que demostró el papel de la corteza prefrontal, tal y como se comenta aquí, en el aprendizaje basado en modelo (Huang *et al.*, 2020). Sin olvidar que, detrás de todo esto, está la emoción – vinculada al sistema límbico – conectada a la cognición y con un papel clave en la adherencia del alumno, creando situaciones desafiantes que desencadenan todos los procesos cerebrales descritos anteriormente (Fonseca 2016) y tiene una fuerte conexión con el feedback del error.

Coincidimos con Seel (2017), cuando afirma que las investigaciones sobre el aprendizaje recomiendan involucrar a los jóvenes en situaciones activas de resolución de problemas que les supongan un reto, y el enfoque ABM, asociado a una enseñanza de las ciencias por investigación se muestra prometedor y útil en el proceso de enseñanza y aprendizaje, siempre que esté bien planificado y teniendo en cuenta los pilares del aprendizaje tratados en este artículo.

En fin, las investigaciones han demostrado que el cerebro trabaja transformando ideas abstractas en objetos físicos y manipulándolos, y que la discusión, la verbalización de estos objetos con otras personas ha demostrado ser motivadora y desempeña un papel importante en el aprendizaje (Paul 2021). El proceso de modelización es eficiente en la comprensión de conceptos y fenómenos abstractos (Harison y Treagust 2000) y en la discusión compartida o colaboración basada en modelos (Seel 2017), estando de acuerdo con lo expuesto por Paul (2021). Ante esto, creemos que el uso del aprendizaje basado en modelos debe formar parte del currículo de ciencias en la educación básica, ya que todos los procesos discutidos se desarrollan de forma gradual y, por lo tanto, se deben utilizar estrategias que favorezcan este desarrollo.

Aun sin realizar un estudio cuantitativo, observamos que los alumnos que tienen conocimientos previos sobre los temas fueron los que presentaron una mayor participación, comprobada en los cuadernos de campo y en las manifestaciones en clase. Sabemos que los conocimientos previos son movilizados por los mecanismos ejecutivos de la atención, pero no sabemos si influyen o no en el mantenimiento de esta atención, por lo que se requieren más estudios controlados para entender su papel.

Otro punto a destacar es la motivación. Sabemos que influye en estos mecanismos, sin embargo, necesitamos más estudios en esta línea, principalmente relacionados con el papel del profesor, para entender mejor esto. Este es el objetivo de otro estudio realizado por mi grupo, que relaciona la afectividad (motivación) con la mediación del profesor, y esperamos tener más respuestas en un futuro próximo.

Sin embargo, creemos que este estudio ha demostrado cómo un enfoque de enseñanza ampliamente utilizado, el ABM, puede desencadenar mecanismos neurofuncionales que permitan una mayor capacidad de atención de los alumnos. Esto permite realizar tareas con una implicación cognitiva más profunda, como se ha demostrado en este estudio.

No obstante, se necesitan más estudios con un enfoque mixto no sólo con el modelado, sino también con otras estrategias de enseñanza para entender mejor cómo se activan estos pilares (atención, compromiso activo y error y el feedback) en los estudiantes, colectiva e individualmente.

REFERENCIAS

Bardin L. (1977) *Análise de conteúdo*. Lisboa: Edições 70.

- Batista I. L., Salvi R. F., Lucas L. B. (2011). Modelos científicos e suas relações com a epistemologia da ciência e a educação científica. VIII Enpec, <http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/viienpec/resumos/R1554-2.pdf>.
- Braver T. S. (2012) The variable nature of cognitive control: A dual mechanisms framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 16, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.12.010>
- Cárdenas F. R., Herrera B. R. H., Lomas M. L. L., Uribe P. L., Zepeda M. M. (2021) El aprendizaje de la reacción química: el uso de modelos en el laboratorio. *Enseñanza de las ciencias*, 39 (2), 103-122. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3229>
- Carvalho A. M. (2013) *Ensino de ciência por investigação: condições para implementação em sala de aula*. Cengage Learning.
- Consenza R. M., Guerra L. B. (2011) *Neurociência e educação: como o cérebro aprende*. Porto Alegre: Artmed.
- Dehaene S. (2019) *¿Cómo aprendemos? Los cuatro pilares con los que la educación puede potenciar los talentos de nuestro cerebro*. Buenos Aires: XXI Siglo Veintiuno Editores, 1^a. ed.
- Dutra L. H. A. (2005) Os modelos e a pragmática da investigação. *Scientia Studia*, 3 (2), 205-232. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-31662005000200003&lng=en&nrm=iso
- Ferreira P. F. M. (2006) *Modelagens e suas contribuições para o ensino de ciências: uma análise no equilíbrio químico*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. <http://hdl.handle.net/1843/FAEC-85UP2D>
- Fonseca V. (2016) Importância das emoções na aprendizagem: uma abordagem neuropsicopedagógica. *Revista Psicopedagogia*, 33 (102), 365-84. http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84862016000300014
- Gödek Y. (2004) The importance of modelling in science education and in teacher education. *Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 26, 54-61. www.efdergi.hacettepe.edu.tr/shw_artcl-1074.html
- Harison A. G., Treagust D. F. (2000) A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22 (9), 1011-1026. <https://doi.org/10.1080/095006900416884>
- Hestenes D. (1992) Modeling games in the Newtonian world. *American Journal of Physics*, 60 (8), 732-748. <https://doi.org/10.1119/1.17080>
- Huang Y., Yapple A. Z., Yu R. (2020) Goal-oriented and habitual decisions: neural signatures of model-based and model-free learning. *Neuroimage*, 215, 116834. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116834>
- Justi R., Gilbert J. K. (2002) Modelling. Teachers' view on the nature of modelling, and implications for the education of modelers. *International Journal of Science Education*, 24, 369-387. <https://doi.org/10.1080/09500690110110142>
- Kapras S., Queiroz G., Colinvaux D., Franco C. (1997) Modelos: uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em ensino de ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, 2 (3), 185-205. <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/627>
- Mathieu J. E., Heffner T. S., Goodwin G. F., Salas E., Cannon-Bower J. A. (2000) The Influence of Shared Mental Models on Team Process and Performance. *Journal of Applied Psychology*, 85 (2), 273-283. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.85.2.273>
- Mozzer N. B., Justi R. (2018) Modelagem analógica no ensino de ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, 23 (1), 155-182. <http://dx.doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2018v23n1p155>
- Oliveira A. M., Gerevini A. M., Strohschoen A. A. G. (2017) Diário de bordo: uma ferramenta metodológica para o desenvolvimento da alfabetização científica. *Revista Tempos e Espaços em Educação*, 10 (22), 119-132. <https://doi.org/10.20952/revtee.v10i22.6429>
- Paul A. M. (2021) How to outsmart your brain. *Psychology today*, 54 (4), 54-61. <https://www.psychologytoday.com/us/articles/202107/how-outsmart-your-brain>
- Paz A. M., Abegg I., Filho J. P. A., Oliveira V. L. B. (2006) Modelos e modelização no ensino: um estudo da cadeia alimentar. *Revista Ensaio*, 8 (2), 157-170. <https://www.scielo.br/j/epec/a/VnkmpCkDhwjnYt4tVBQ5Lj/?format=pdf&lang=pt>

- Pietrocola M. (1999) Construção e realidade: o realismo científico de Mario Bunge e o ensino de ciências através de modelos. *Investigações em Ensino de Ciências*, 4 (3), 213-227. <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/604>
- Potter T. C. S., Bryce N. V., Hartley C. (2017) A. Cognitive components underpinning the development of model-based learning. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 25, 272-280. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.10.005>
- Prestes M. E. B. (2013) Uso de modelos na ciência e no ensino de ciências. *Boletim de História e Filosofia da Biología*, 7 (1), 4-10. <http://www.abfhb.org/Boletim/Boletim-HFB-07-n1-Mar-2013.pdf>
- Rueda M. R. (2018). Attention in the heart of intelligence. *Trends in Neuroscience and Education*, 13, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2018.11.003>
- Sampieri R. H., Collado C. F., Lucio M. del P. (2013) *Metodología de Pesquisa*. Porto Alegre: Penso.
- Seel N. M. (2017) Model-based learning: a synthesis of theory and research. *Educational Technology Research and Development*, 65, 931-966. <https://doi.org/10.1007/s11423-016-9507-9>
- Setúval F. A. R., Bejarano N. R. (2009) *Os modelos didáticos com conteúdo de genética e a sua importância na formação inicial de professores para o ensino de ciências e biologia*. VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação Científica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. <http://axpfep1.if.usp.br/~profis/arquivos/viienpec/VII%20ENPEC%20-%20202009/www.foco.fae.ufmg.br/cd/pdfs/1751.pdf>
- Wilson K. J., Long T. M., Momsen J. L., Bray Speth E. (2020) Modeling in the classroom: making relationships and systems visible. *Life Science Education*, 19 (1), 1-5. <https://doi.org/10.1187/cbe.19-11-0255>

INFORMACIÓN ADICIONAL

Para citar este artículo: Figueiredo, A. O. y Perticarrari, A. (2022) El aprendizaje basado en modelos mantiene a los alumnos activos y con atención sostenida. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 19(3), 3102 . doi: 10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2022.v19.i3.3102