



Modelos didácticos para comprender la función de la arena en fractura hidráulica

- Educational Models for Understanding the Role of Sand in Hydraulic Fracturing
- Modelos didáticos para compreender a função da areia na fraturação hidráulica

Forma de citar este artículo

Salica, M. A., Comin, F. N. y Olguin, V. (2026). Modelos didácticos para comprender la función de la arena en fractura hidráulica. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (59), 285 - 304, <https://doi.org/10.17227/ted.num59-22437>

Resumen







Este artículo presenta los resultados de un estudio interdisciplinario entre la didáctica de las ciencias naturales y la psicología cognitiva, cuyo objetivo fue analizar la modelización escolar mediante procesos del razonamiento analógico para la enseñanza de la Física, específicamente sobre la función de la arena para fractura hidráulica o *fracking*. El estudio, de enfoque cualitativo e interpretativo, involucró a quince estudiantes de secundaria que participaron en cinco clases, en las cuales se emplearon modelos didácticos escolares y actividades guiadas por razonamiento analógico. Los resultados permitieron observar modelos didácticos escolares intuitivos y contraintuitivos sobre la densidad y la porosidad de la arena, lo que subraya la complejidad de estos conceptos. El enfoque de discusión y argumentación entre pares fomentó una mayor comprensión de fenómenos científicos complejos y habilidades críticas. Se concluye que la modelización analógica y el debate entre estudiantes podrían resultar herramientas clave para mejorar el aprendizaje y la alfabetización científica.

Palabras clave

arena de *fracking*; modelo cognitivo de ciencia; razonamiento analógico; educación 5.0

Abstract

This article presents the results of an interdisciplinary study between the Didactics of Natural Sciences and Cognitive Psychology, aiming to analyse school-based modelling through processes of analogical reasoning for the teaching of Physics—specifically, the role of sand in hydraulic fracturing (*fracking*). The qualitative and interpretive study involved 15 secondary school students who

Marcelo Augusto Salica*  
Facundo Nahuel Comin**  
Valeria Olguin***  

* Doctor en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales, mención en Física. Facultad de Ciencias de la Educación y Psicología, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina. profchelofcagmail.com

** Profesor en Física. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina. cominfacu@gmail.com

*** Doctora en Psicología. Facultad de Ciencias de la Educación y Psicología, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina. mariavaleriaolguin@gmail.com

Artículo de investigación

Fecha de recepción: 21/11/2024
Fecha de aprobación: 01/12/2025
Fecha de publicación: 01/01/2026



participated in five lessons using school-based didactic models and activities guided by analogical reasoning. The results revealed both intuitive and counterintuitive school models concerning the density and porosity of sand, highlighting the conceptual complexity of these phenomena. Peer discussion and argumentation promoted deeper understanding of complex scientific processes and critical thinking skills. It is concluded that analogical modelling and peer debate can serve as key tools to enhance learning and scientific literacy.

Keywords

fracking sand; cognitive science model; analogical reasoning; Education 5.0

Resumo

Este artigo apresenta os resultados de um estudo interdisciplinar entre a Didática das Ciências Naturais e a Psicologia Cognitiva, cujo objetivo foi analisar a modelagem escolar por meio de processos de raciocínio analógico no ensino de Física — especificamente, sobre a função da areia na fratura hidráulica (fracking). O estudo, de abordagem qualitativa e interpretativa, envolveu 15 estudantes do ensino médio que participaram de cinco aulas, nas quais foram utilizados modelos didáticos escolares e atividades orientadas pelo raciocínio analógico. Os resultados revelaram modelos escolares intuitivos e contraintuitivos sobre a densidade e a porosidade da areia, evidenciando a complexidade conceitual desses fenômenos. A discussão e a argumentação entre pares favoreceram uma compreensão mais profunda de fenômenos científicos complexos e o desenvolvimento de habilidades críticas. Conclui-se que a modelagem analógica e o debate entre estudantes podem constituir ferramentas fundamentais para aprimorar a aprendizagem e a alfabetização científica.

Palavras-chave

areia de fracking; modelo cognitivo de ciência; raciocínio analógico; Educação 5.0

Introducción

Esta investigación se sitúa en la interfaz entre la psicología cognitiva y la didáctica de las ciencias naturales, con foco en la enseñanza de la física en la educación secundaria. Bajo un enfoque interdisciplinario y en diálogo con la Educación 5.0, se diseñaron espacios de formación para futuros profesores de física que integran modelos didácticos como analogías, argumentaciones y problemáticas sociocientíficas. El objetivo fue potenciar una enseñanza situada, reflexiva y crítica, que articule los modelos científicos disciplinares con los modelos didácticos que construyen los estudiantes (Garritz, 2010; Moreira, 2021). Se reconoce que, ante los desafíos actuales de la formación docente, es necesario fortalecer los espacios de reflexión sobre el conocimiento didáctico y promover metodologías que fomenten el pensamiento complejo, la creatividad y el compromiso con el entorno (Lozano, 2015). Desde esta perspectiva, la enseñanza de la física se convierte en un proceso de construcción activa de significados, en el que los futuros docentes adquieren herramientas para analizar, intervenir y transformar sus propias prácticas.

Uno de los objetivos fundamentales de la enseñanza de las ciencias es abordar problemáticas sociocientíficas para contextualizar los contenidos disciplinares (Zeidler *et al.*, 2005; España y Prieto, 2009; Bahamonde, 2014). Estas problemáticas son abiertas, complejas y controvertidas, y constituyen situaciones reales y cercanas al estudiante, en las cuales su discusión resulta relevante (España y Prieto, 2009). En este contexto, se están realizando diversas investigaciones que exploran distintos aspectos que permiten abordar estos problemas en el aula. Entre ellos se encuentra la conceptualización sobre la naturaleza de la ciencia, el proceso de construcción del conocimiento científico y

la toma de decisiones (Zeidler *et al.*, 2005; Sadler *et al.*, 2004). En particular, los estudios relacionados con este tipo de problemas prestan atención al tipo de razonamiento que se sigue en los procesos de toma de decisiones y al contenido científico implicado.

En consonancia con el objetivo de abordar problemáticas sociocientíficas en la enseñanza de las ciencias, se presenta la extracción de hidrocarburos mediante técnicas no convencionales, como el *fracking* o fractura hidráulica, en una secuencia didáctica (SD) diseñada para estudiantes de secundaria. Esta secuencia adopta una perspectiva multirreferencial que facilita el reconocimiento de situaciones significativas y de interés para los estudiantes. Para estructurar este enfoque interdisciplinario se recurre al dispositivo de los Islotes Interdisciplinarios de Racionalidad (IIR) (Lozano *et al.*, 2016), que permite explorar la complejidad del problema y resaltar las disciplinas implicadas en su explicación. A partir de este análisis, la secuencia se enfoca en conceptos esenciales de la física para la modelización de fenómenos, como el papel de la arena de *fracking* en aumentar la permeabilidad y sostener la estructura de la roca madre.

Particularmente, la SD sigue un ciclo iterativo de diseño, implementación, evaluación y nueva implementación. Este enfoque crea condiciones para un análisis del proceso de construcción de modelos didácticos analógicos (MDA) en los estudiantes (Psillos y Kariotoglou, 2016). Así, el desarrollo de la SD se fundamenta y estructura en el modelo cognitivo de ciencia escolar (Izquierdo, 2000; Sanmartí, 2002), que propone que la actividad científica escolar debe permitir la evolución de las ideas iniciales mediante un diseño concreto de la enseñanza, orientado hacia la modelización de fenómenos (Gilbert y Justi, 2016; Bahamonde y Gómez, 2016; Godoy, 2018). En sintonía con la *Educación*

5.0 —concepto emergente que supera la integración tecnológica de la *Educación 4.0* y promueve una simbiosis entre humanidad, tecnología y entorno—, esto facilita la aplicación práctica de dichos modelos a fenómenos de interés real, aborda problemas significativos para los estudiantes y fomenta el desarrollo de ciudadanos críticos y científicamente alfabetizados.

La modelización es un proceso cognitivo que facilita la transición del pensamiento abstracto al pensamiento complejo, al permitir representar y comunicar fenómenos mediante argumentos análogos y diversas formas simbólicas guiadas por procesos metacognitivos. Incluye la construcción de modelos didácticos análogos (Graells, 1999; Izquierdo, 2017), que ayudan a comprender fenómenos como la función de la arena de *fracking*. El propósito es que los estudiantes desarrollen pensamiento científico, reconociendo, a su vez, los procesos cognitivos involucrados. Para ello, los MDA permiten activar subprocesos del razonamiento analógico para transfigurar conceptos mediante esquemas que integran analogías sucesivas, sostienen la continuidad conceptual y preservan los referentes ontológicos (Putnam, 1975; España y Prieto, 2009).

Para facilitar el aprendizaje, los subprocesos del razonamiento analógico pueden desarrollarse en el orden típico de una actividad de modelización, ilustrado aquí con el ejemplo de comparar la estructura de la roca madre con el sistema de partículas de arena. En primer lugar, los estudiantes identifican y caracterizan las similitudes y diferencias entre los dos sistemas, observando propiedades como permeabilidad y porosidad. Notan que ambos sistemas contienen espacios que facilitan el flujo de fluidos, lo cual permite hacer una conexión inicial entre la estructura de la roca madre (análogo base, AB) y el sistema de partículas de arena (análogo meta, AM) (Gentner y Maravilla, 2018).

A continuación, en el proceso de recuperación, los estudiantes activan recuerdos previos sobre materiales porosos, lo que les ayuda a recordar cómo ciertas estructuras permiten la circulación de fluidos, un conocimiento que trasladan al modelo de *fracking*. Luego, en el establecimiento de correspondencias o mapeo, relacionan elementos específicos: asocian la arena con su función de soporte y las partículas de la roca madre con su estructura natural, generando inferencias sobre cómo la arena en el *fracking* mantiene abiertos los poros, aumentando la permeabilidad de la roca.

Finalmente, en la evaluación, valoran la precisión y relevancia de estas analogías. Reflexionan sobre la validez de sus modelos para representar el *fracking*, considerando en qué medida sus inferencias ayudan a explicar el funcionamiento de la arena al facilitar la extracción de hidrocarburos. Este enfoque progresivo permite construir un entendimiento detallado y crítico sobre el tema (Gentner *et al.*, 2003; Hummel y Holyoak, 1997).

En el proceso de modelización, los subprocesos del pensamiento analógico no solo enriquecen la comprensión de las ideas científicas que explican el fenómeno, sino que también son esenciales para construir argumentos sólidos y bien

fundamentados, estableciendo una base firme para el pensamiento científico. Es fundamental que los estudiantes discutan sus representaciones mentales y las contrasten entre pares, lo cual promueve el trabajo colaborativo (Flores *et al.*, 2020; Rojas, 10 de mayo de 2021). Esta organización favorece la comprensión y la intervención en la realidad al comunicar y socializar ideas razonadas y contextualizadas (Adúriz-Bravo e Izquierdo, 2009). Así, los procesos de modelización científica en la escuela fomentan un diálogo cognitivo, entendido como la capacidad argumentativa promovida por el MDA, en la interacción entre los modelos mentales de docentes y estudiantes mediante la discusión y la argumentación.

En relación con la modelización para el aprendizaje de las ciencias, autores como Schwarz y White (2010) proponen rúbricas para que los estudiantes comprendan los procesos de modelado. Abella y García-Martínez (2021) sugieren ciclos de modelización que se centran en decisiones multicausales, características del campo de la ecología, en lugar de simplemente predecir fenómenos. Además, Hernández-Ramírez y García-Villanueva (2023) destacan la importancia de incluir procesos metacognitivos para que los estudiantes piensen de manera autónoma, transfiriendo y evaluando información entre situaciones análogas. Por otro lado, Bahamonde (2014) y Lozano (2015) abogan por el diseño de SD basadas en ciclos iterativos que integren simultáneamente un eje disciplinar y otro metacientífico.

A partir de estos elementos, se estructuró el desarrollo del ciclo de la SD, con el objetivo de analizar los procesos de modelización científica analógica realizados por los estudiantes. Este artículo presenta los resultados de una propuesta de enseñanza de la física centrada en la función de la arena en la fractura hidráulica, abordada como un fenómeno que implica sostén y permeabilidad en la roca madre.

Método

El trabajo se inscribe en la interfaz entre la didáctica de las ciencias naturales y la psicología cognitiva. Se orienta a investigar cómo los estudiantes comprenden la función de la arena en la fractura hidráulica como un fenómeno físico, a través de procesos de modelización científica analógica. Para ello, se diseñó e implementó una SD estructurada en ciclos iterativos (Estany e Izquierdo, 2001; Psillos y Kariotoglou, 2016), compuesta por actividades basadas en el razonamiento analógico y contextualizadas en una problemática sociocientífica.

El enfoque metodológico corresponde a un estudio de diseño de carácter cualitativo y de tipo descriptivo. La investigación se desarrolló como un estudio de caso teórico (Taylor, 2014; Stake, 1995), en el contexto natural del aula de física-química, con un abordaje intensivo que permitió analizar en profundidad el proceso de construcción del conocimiento (Neiman y Quaranta, 2006). El objeto del estudio son los procesos de modelización analógica desplegados por los estudiantes durante la implementación de la SD. Se adopta el enfoque de investigación basada en el diseño, lo que implica que los resultados se analizan a partir de la implementación concreta de la SD, entendida como artefacto didáctico en constante mejora.

Participaron quince estudiantes de tercer año del ciclo básico de una escuela secundaria, de aproximadamente quince años de edad, organizados en cuatro grupos. La secuencia se desarrolló en cinco clases de ochenta minutos. La recolección de datos incluyó producciones escritas, modelos construidos, registros visuales de las actividades en grupo, intercambios orales y puestas en común con el docente y los investigadores.

El equipo de investigación estuvo conformado por un especialista en psicología

cognitiva, un profesor de física-química, un especialista en didáctica de las ciencias naturales y un estudiante del profesorado en física, quien participó activamente en el diseño, aplicación y registro de la SD.

Los resultados se presentan en función del análisis de las actividades que componen la SD, estructurada en tres momentos de modelización: inicial, intermedia y final, siguiendo el ciclo iterativo propuesto por Bahamonde (2014) y Lozano (2015). A partir de estas actividades se describen y analizan los modos en que los estudiantes construyen modelos explicativos del fenómeno abordado.

Resultados

El ciclo iterativo de la SD se presenta y se describe a través de las actividades implementadas en sus tres etapas de modelización analógica sobre la función de la arena en la fractura hidráulica. Se inicia con la problematización de un hecho sociocientífico, formulando preguntas que constituyen los Islotes Interdisciplinarios de Racionalidad (IIR). Se elige una pregunta estudiantil para guiar la modelización didáctica analógica y la construcción conceptual de la función de la arena. Luego se avanza hacia un modelo conceptual sistémico y se realiza una actividad de modelos didácticos analógicos (MDA) para activar el razonamiento analógico, reflexionar metacognitivamente sobre el modelo y analizar fortalezas y debilidades conceptuales. Se presentan producciones estudiantiles de diferentes agrupamientos para ilustrar este proceso.

Modelización inicial e islotes interdisciplinarios

En la etapa inicial de modelización, el análisis de las producciones grupales, centrado en la presentación y desarrollo de la problemática sociocientífica (actividad 1), permitió contextualizar el tema de la arena utilizada en la fractura hidráulica y estimular el interés de los estudiantes, lo que facilitó su implicación en el tema. La temática fue introducida y desarrollada mediante la lectura de diversos artículos periodísticos que abordaban el tema desde múltiples dimensiones: política, científica-disciplinar, social, económica y ambiental.

Un aspecto destacado en esta fase fue la identificación de un significativo desconocimiento por parte de los estudiantes respecto de la fractura hidráulica, a pesar de residir en una provincia donde se encuentra la principal industria petrolera de Argentina, que emplea procesos de extracción hidrocarburífera no convencional. Este hallazgo resalta la importancia de la actividad, ya que revela una desconexión entre los estudiantes y una problemática local relevante.

En esta primera actividad de problematización y modelización inicial, se pidió a los estudiantes que formularan preguntas investigables en el contexto escolar, basándose en los artículos periodísticos analizados. Además, se les solicitó que realizaran una representación gráfica de la roca madre antes y después del

proceso de fractura hidráulica (actividad 2), lo que facilitó una comprensión más profunda del fenómeno y sus implicaciones.

La Tabla 1 recoge las preguntas investigables formuladas por los estudiantes, organi-

zadas por campo de conocimiento. Esta tabla también incorpora la relación interdisciplinaria de cada pregunta, destacando su relevancia en los IIR.

Tabla 1.

Islotes interdisciplinarios de la problemática sociocientífica

Áreas de conocimiento-disciplinas implicadas	Preguntas	Relación Interdisciplinaria identificada
Geología-Ciencias de la Tierra	¿De qué están compuestas las rocas de petróleo?; ¿Cuántos minerales tiene la arena? ¿Cuáles son?; ¿Cómo se forma el hidrocarburo?; ¿De dónde proviene el petróleo?; ¿Cómo fue el proceso del Pangea?	Subraya la importancia de la composición mineralógica de las rocas madre en la generación y almacenamiento de hidrocarburos. Se centra en la precisión en la identificación de minerales, lo cual es clave para entender la eficacia de la arena de <i>fracking</i> . Resalta el proceso geológico detallado que transforma la materia orgánica en hidrocarburos y subraya las condiciones necesarias. Pone énfasis en el origen y localización geológica de los yacimientos petrolíferos, crucial para la extracción eficiente. Destaca la influencia geológica a gran escala en la distribución global de recursos, como el petróleo, debido a eventos tectónicos.
Química-Ingeniería-Geología	¿De qué está compuesta la arena?; ¿Qué materiales puedo hacer con el petróleo?; ¿Qué químicos tiene la arena?; ¿Qué es el hidrocarburo?	Matiza la variedad de técnicas de extracción y su importancia en la obtención de minerales esenciales para diversas industrias. Acentúa la amplia gama de productos obtenidos del petróleo y su relevancia económica e industrial. Se enfoca en la composición y origen de la arena, crucial para comprender su eficacia en aplicaciones como el <i>fracking</i> . Subraya la relación directa entre hidrocarburos y generación de energía, así como su valor estratégico. Destaca la influencia de la composición química de la arena en sus propiedades y usos industriales, como en la fractura hidráulica.
Ecología	¿Para qué es la ecología?	Subraya el enfoque en las interacciones ecológicas y su relevancia para comprender la sostenibilidad y conservación ambiental.
Ciencias Sociales-Derecho Ambiental	¿Por qué el <i>fracking</i> es realizado en territorio ilegal?	Expone la complejidad de la regulación y los conflictos sociopolíticos, y resalta las tensiones entre desarrollo económico y protección ambiental.
Física-Geología-Ingeniería Civil	¿Qué función cumple la arena?	Recalca la versatilidad de la arena, subrayando su importancia en procesos industriales y en la configuración geológica natural. Se enfoca en el papel de la arena en diferentes contextos, incluyendo su uso en el <i>fracking</i> y su función en la formación geológica.

Fuente: elaboración propia.

La clasificación interdisciplinar identificada a partir de las preguntas permite a los estudiantes entender las diferentes áreas de conocimiento que pueden abordar sus interrogantes y cómo se relacionan entre sí en el contexto del estudio de la arena de *fracking* y sus implicaciones. Por otra parte, se destaca el contenido de las preguntas que admiten el desarrollo de un trabajo de investigación escolar, dado que no se limitan a la elaboración de respuestas cerradas o dicotómicas.

La Tabla 2 sistematiza los modelos iniciales de la roca madre. Esta muestra las representaciones gráficas elaboradas por cada grupo, que ilustran la roca madre antes (izquierda) y después (derecha) de la fractura hidráulica.

Tabla 2.

Modelos iniciales de la roca madre

GRUPO 1



Interpretación: la imagen izquierda representa un cuerpo compacto, donde cada punto figura poros superficiales de la piedra. En la imagen derecha, el modelo inicial se muestra partido, permitiendo ver en su interior la presencia del hidrocarburo como una masa líquida compacta (color violeta).

GRUPO 2



Interpretación: la imagen izquierda representa un cuerpo compacto completo donde una ligera coloración verde representa el hidrocarburo en su interior. La imagen derecha muestra el cuerpo fracturado con el hidrocarburo de color verde en una de sus partes.

GRUPO 3



Interpretación: en el modelo de la izquierda se observa un cuerpo compacto y macizo con algunos poros representados por puntos. El modelo de la derecha muestra el cuerpo partido, del que emana parte del hidrocarburo.

GRUPO 4



Interpretación: la imagen izquierda representa un cuerpo compacto que contiene en su interior pequeñas burbujas de hidrocarburo. En el modelo de la derecha se representa el cuerpo fracturado, del que emana el hidrocarburo por sus caras abiertas, conservando burbujas en las zonas más alejadas de la fractura.

Nota: en cada imagen se aplicaron efectos artísticos para destacar las cualidades de cada modelo.

Fuente: elaboración propia.

A partir de los modelos iniciales de la roca madre se aprecian las mismas cualidades antes y después de la fractura, describiendo cuerpos que poseen otro material en su interior.



La Tabla 3 presenta los modelos iniciales de la arena de *fracking* elaborados por los

estudiantes en la actividad 3. Incluye las representaciones gráficas y descripciones de los modelos mentales análogos desarrollados por cada grupo, que ilustran su conceptualización de la arena. Estos modelos responden a la consigna de representar cómo imaginan la arena a nivel submicroscópico.

Tabla 3.

Modelos iniciales de la arena

Grupo	Representación de la arena	Descripción
1		El modelo representa una mezcla de cuerpos que ocupan espacios en el interior de la tierra, como agua, arena y piedra madre en movimiento.
2		En este caso, el modelo muestra una masa de arena agrupada, donde los diferentes colores representan los minerales que componen una muestra típica de arena amarilla.

Grupo	Representación de la arena	Descripción
3		El siguiente modelo se enfoca en la representación de la arena a nivel microscópico, basada en la estructura atómica de la materia.
4		En este caso, el modelo representa una masa de arena agrupada en un mismo espacio donde los diferentes colores representan los diferentes minerales que componen una muestra de arena típica.

Fuente: capturas de imagen elaborada por los estudiantes.

Las representaciones iniciales de la arena elaboradas por los estudiantes muestran que la mayoría (grupos 1, 2 y 4) la concibe a nivel macroscópico, como una mezcla de minerales, mientras que un solo grupo (3) la representó a nivel submicroscópico, intentando mostrar la arena como si estuviera constituida por un solo tipo de átomo. En general, los resultados evidencian que los estudiantes no poseen aún una alfabetización científica afianzada que les permita identificar los diferentes niveles de organización de la materia ni los conceptos de sustancias, compuestos y átomos. No obstante, la mayoría (grupos 1, 2 y 4) reconoce a la arena como una mezcla heterogénea de composición no uniforme.

Tras la realización de las actividades 2 y 3, se llevó a cabo una discusión con los estudiantes enfocada en las preguntas formuladas, evaluando la factibilidad de cada una en función del contexto y la problemática abordada. A partir de los argumentos y contraargumentos presentados, se consensó responder la pregunta central: ¿Cuál es la función de la arena de *fracking*?

Como parte de la etapa de modelización inicial, se implementó una actividad de exploración de la arena de *fracking*. Los estudiantes tuvieron la oportunidad de examinar cuatro muestras distintas de arena con el objetivo de explorar y caracterizar una variedad de propiedades (actividad 4). Las propiedades evaluadas incluyeron color, olor, brillo, tamaño relativo y forma, imantación, textura al tacto, densidad relativa, turbiedad, solubilidad y compresión.

Esta caracterización detallada de las muestras permitió a los estudiantes desarrollar un modelo mental más concreto y preciso sobre el comportamiento de la arena en el proceso de fractura hidráulica, lo que representó un paso fundamental para comprender su papel en la extracción de hidrocarburos.

Modelización intermedia

Durante el proceso de modelización intermedia se abordó el concepto de densidad desde una perspectiva ampliada, que no solo consideró su definición matemática como la cantidad de masa por unidad de volumen, sino también la cantidad de materia que ocupa un determinado espacio. La actividad 5 consistió en la determinación experimental de la densidad de tres materiales: arena, tierra fértil y azúcar.

En esta actividad, los estudiantes realizaron mediciones de masa y volumen de cada material y discutieron los resultados obtenidos. Además, analizaron el concepto de densidad tanto a nivel microscópico como submicroscópico. Esto les permitió inferir la organización de las partículas del material y cómo se distribuyen los espacios vacíos entre los granos de cada material. Dicho proceso les permitió comprender cómo la organización y la compactación de las partículas afectan el volumen y la densidad del material, además de comenzar a construir la representación de la organización de la materia a nivel macro y microscópico.

Este enfoque integral del concepto de densidad fue esencial para que los estudiantes comprendieran la existencia de espacios vacíos entre las partículas de un material. Esta comprensión, posiblemente, les permitió trasladar, de forma análoga, la idea del hidrocarburo atrapado en la roca madre y cómo la fractura hidráulica modifica la permeabilidad y facilita su extracción.

En la actividad 6 de modelización intermedia, se trabajó en la estructuración conceptual de la roca madre y en la función de la arena, una vez inyectada en los pozos petroleros para provocar la fractura de la roca. Para facilitar la comprensión de estos conceptos,

se emplearon modelos científicos escolares, utilizando análogos concretos representados por frascos o vasos de precipitados (Figura 1), cada uno conteniendo muestras de legumbres: garbanzos y lentejas, por separado.

Figura 1.

Modelo escolar análogo de la piedra madre a nivel microscópico. Frasco izquierdo: modelo de garbanzos. Frasco derecho: modelo con lentejas



Fuente: archivo fotográfico de los autores.

Estos análogos permitieron a los estudiantes visualizar y discutir cómo las características físicas de los materiales (en este caso, las legumbres) pueden representar la organización y el comportamiento de las partículas en la roca madre y en la arena. Los garbanzos y las lentejas sirvieron como modelos simplificados para demostrar cómo se generan los espacios vacíos dentro de la roca y cómo la arena actúa para mantener estos espacios abiertos, lo que incrementa la permeabilidad y facilita la liberación de hidrocarburos.

Con este material, los estudiantes analizaron y discutieron las cualidades que ofrecía cada modelo, para luego seleccionar la opción que mejor representara el aumento de la permeabilidad producido por la arena. Los estudiantes contaban con una muestra concreta de los modelos escolares, acompañada de una ficha impresa que incluía la consigna

de la actividad 6, una fotografía de los modelos (análogos icónicos) y preguntas de análisis.

Durante la actividad 7, los estudiantes se subdividieron en ocho grupos, con el objetivo de personalizar el proceso de enseñanza y aprendizaje. Esta subdivisión permitió un registro más detallado del proceso de modelización que los estudiantes promovieron al desarrollar sus ideas.

La actividad consistió en: a) comparar modelos análogos concretos, b) reflexionar sobre los modelos mentales que ponen en juego la relación entre materia y espacio vacío del material, y c) identificar el concepto de porosidad y representar la función de la arena en la roca madre.

- a. Entre los garbanzos y las lentejas: ¿cuál elegirías para representar la roca madre de los yacimientos petrolíferos? ¿Cuál elegirías para representar la arena de *fracking* en el interior de la roca madre?


Respuestas: todos los estudiantes representaron la roca madre con garbanzos (N = 8 grupos) y la arena con lentejas (N = 8 grupos).

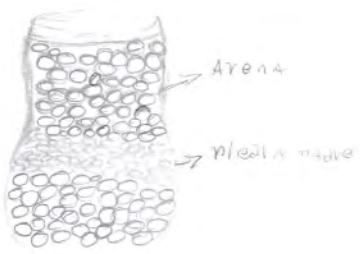
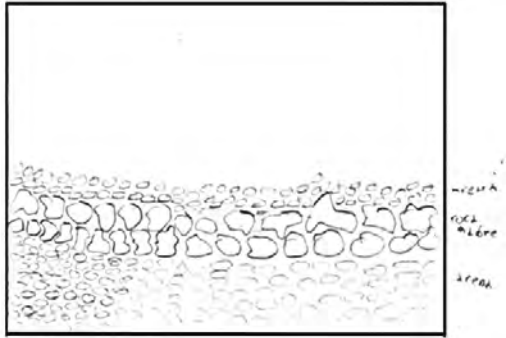

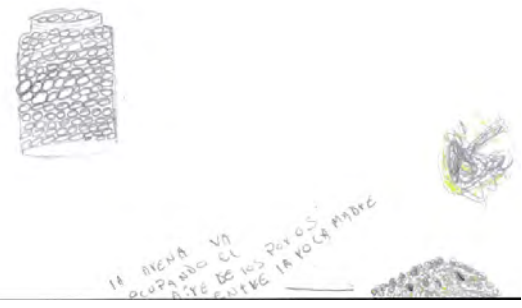

- b. Reflexiona sobre los espacios visibles entre los garbanzos y las lentejas y considera cómo estos pueden representar los poros dentro de una roca madre real. ¿Hay espacios entre las legumbres? ¿Cuál de los modelos ofrece más porosidad? ¿Cómo afecta la porosidad la capacidad de los hidrocarburos para moverse a través de la roca? Explica tu elección.



Respuestas: “Los garbanzos ofrecen más porosidad”; “Al tener muchos poros facilita el movimiento de los hidrocarburos”; “El hidrocarburo puede salir por los espacios de aire que encuentran entre la roca madre y la arena”; “Los poros dejan fluir (espacio), función que cumple la arena de *fracking*”; “La arena de *fracking* inyectada ocupa los poros de la roca madre, iniciando la extracción del hidrocarburo”.

- c. Realiza un dibujo de la roca madre y la arena juntos; explica el funcionamiento de la arena. Utiliza los modelos de legumbres para guiarte en la elaboración del dibujo. Las respuestas del ítem c de la actividad 7 se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.
Modelo didáctico escolar intermedio, respuesta al ítem c de la actividad 7

	Modelos	Descripción	Interpretación
1		“El hidrocarburo puede salir por los espacios de aire que se encuentra entre la roca madre y la arena”	

Modelos	Descripción	Interpretación
<p>2</p> 	<p>"Puede extraer los hidrocarburos por los espacios de aire, las lentejas son la piedra madre"</p>	
<p>3</p> 	<p>"La función de la arena como formadora de un canal para que a través de los poros de la roca madre el hidrocarburo pueda salir"</p>	
<p>4</p> 	<p>"En este caso la arena inyectada produce un desplazamiento o empuje del hidrocarburo entre los espacios de aire o poros de la roca madre, permitiendo la extracción por presión o empuje"</p>	
<p>5</p> 	<p>"La arena se inyecta en la roca madre y por los poros de la roca la arena de fracking ayuda a extraer"</p>	
<p>6</p> 	<p>"En el dibujo del centro podemos observar una vista general del proceso de extracción de los hidrocarburos y en el dibujo de la izquierda vemos una vista más centralizada"</p>	

	Modelos	Descripción	Interpretación
7		<i>“El dibujo explica donde se ubican la arena y la roca madre, la imagen muestra la extracción por dentro”</i>	Los modelos 6, 7 y 8 muestran dos niveles de representación. A nivel macroscópico, el modelo 6 se enfoca en el proceso de encamisado de los pozos; el modelo 7 aborda el depósito de arena; y el modelo 8 representa un perfil del suelo en el que se identifica el horizonte húmedo (superficie externa) y la roca madre alterada en su interior. Este último modelo, por su simplicidad y enfoque, sugiere una representación más adaptada al contexto escolar. No obstante, todos estos modelos destacan por la riqueza de sus representaciones, abarcando diferentes escalas y perspectivas del proceso.
8		Sin descripción	

Fuente: elaboración propia.

El uso de MDA, como la representación de la roca madre y la arena, permite a los estudiantes explorar conceptos complejos de forma visual y tangible. Mediante la modelización intermedia y el dibujo, los estudiantes identifican tensiones entre sus elecciones iniciales y los resultados esperados en el modelo didáctico que representa la relación entre permeabilidad y porosidad.

Esta problematización y toma de decisiones en el aula promueve el desarrollo del pensamiento complejo, en el que los estudiantes cuestionan sus propias representaciones para comprender mejor el rol de la arena de *fracking*. Este proceso se evidencia cuando algunos corrigen sus modelos tras notar contradicciones, como parte de un ejercicio de reflexión crítica fundamental para el aprendizaje científico.

Modelización final: modelo didáctico analógico

En la modelización final (actividad 8), los estudiantes analizaron modelos icónicos análogos, compuestos por un modelo escolar (Figura 1 anterior) y dos modelos científicos. El primer modelo científico (Figura 1)¹, mientras que el segundo modelo escolar (Figura 2) se basa en la imagen 1². A través de este análisis, se buscó que los estudiantes compararan las representaciones científicas con el modelo escolar, identificando diferencias en términos de escala y complejidad, y destacando las propiedades clave de cada enfoque.

1 Disponible en <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-fracking>

2 Disponible en <https://www.popularmechanics.com/science/energy/g161/top-10-myths-about-natural-gas-drilling-6386593/>

Con estos recursos, debían poner en ejercicio los subprocesos del razonamiento analógico para identificar las diferencias y semejanzas de cada modelo, con el objetivo

de responder a la pregunta inicial planteada en la actividad de los IIR. Para esta tarea, se les proporcionó una ficha de trabajo escrita en la que registraron sus producciones (Tabla 5).

Tabla 5.
Desarrollo argumentado del modelo análogo didáctico

	Modelo escolar (frasco de legumbres)	Modelo científico (roca madre)
Componentes de los modelos	¿Cuáles son los componentes principales del modelo escolar? <ul style="list-style-type: none"> • Garbanzos • Arena • Agua 	¿Cuáles son los componentes principales del modelo científico? <ul style="list-style-type: none"> • Roca madre • Arena de <i>fracking</i> • Hidrocarburos
Densidad	¿Cómo se percibe la densidad del frasco lleno de garbanzos comparado con el de lentejas? “La densidad se percibe con el peso de cada uno” “El frasco de lentejas tendría más densidad porque el espacio que toma porque se acomodan más, dejando menos espacio vacío”	¿Cómo se compara la densidad de la tierra de la corteza con la de la roca madre? “Por la porosidad” “La roca madre contiene más densidad comparando con la corteza terrestre”
Ocupación del Espacio: Porosidad	¿Cómo se llena el espacio entre los granos de legumbres (garbanzos o lentejas) con arena? “Se llena esquivando cada grano de legumbre” “Se puede llenar con arena aumentando la porosidad” “La arena fluye con facilidad a través de los poros de los granos”	¿Cómo afecta la densidad de la roca madre y la corteza terrestre (litósfera) a su capacidad para almacenar y transportar hidrocarburos? “Le afecta porque todavía no está cortada (fracturada) y la arena no puede fluir” “La corteza contiene más porosidad y por ese motivo podría almacenar más hidrocarburo que la roca madre” “Puede facilitar o dificultar la perforación”
Comportamiento de Fluidos: permeabilidad	¿Qué tan fácilmente puede pasar un líquido a través de la legumbre? “Pasa fácilmente por encima de ellas y con ayuda de la arena” “El agua se llena fácilmente a través de los garbanzos” “La arena aumenta la permeabilidad de esta forma aumenta la fluidez del agua”	¿Cómo creen que se comportan los fluidos en la corteza terrestre comparado con la roca madre? “En la corteza terrestre fluye fácilmente mojándose, en cambio en la roca madre hay que partirla para que fluya” “En la corteza los fluidos se mueven con más fluidez y el motivo es la porosidad a comparación de la roca madre que es más densa y menos penetrable”
Función de la arena:	Elaboren una respuesta que integre estas ideas en un modelo explicativo final: ¿Qué función cumple la arena de <i>fracking</i> ? “Mantiene la apertura y sostiene la perforidad” “La función de la arena es que actúa como agente de sostén y mantiene abiertas las fracturas en la roca madre permitiendo que el petróleo y el gas salgan” “La arena cumple dos funciones: la primera es evitar que la roca se cierre y la segunda es facilitar la extracción de hidrocarburos”	

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 5 se puede apreciar el establecimiento de correspondencia o *mapping* entre los análogos. De esta manera, logran construir un modelo explicativo final argumentado para terminar de dar respuesta a la pregunta que orientó todo el proyecto basado en la modelización.

Para culminar la modelización, los estudiantes realizaron la actividad 9 de evaluación de sus modelos argumentados. En esta actividad visualizaron el video titulado *¿Qué es el fracking?* y discutieron y contrastaron sus ideas y explicaciones con la información presentada en el video, además de compararlas con el mapeo realizado en la actividad 8 (Tabla 5). Esta reflexión les permitió identificar similitudes y diferencias significativas entre sus modelos mentales y los conceptos científicos, cuyas respuestas se sistematizaron en la Tabla 6.

Tabla 6.
Evaluación del modelo final

<p>¿Aprendieron algo nuevo que no habían considerado en su explicación inicial?</p>	<p>“Aprendí como extraen hidrocarburos y que son extraídos con agua, duran unos pocos días y frente ...” “Aprendimos cómo es el proceso en profundidad, los materiales que se utilizan en el proceso y que es un proceso difícil y largo” “Una de las cosas que aprendí fue que las fracturas hechas con el punzón pueden repetirse de tres a treinta veces” “Qué las locaciones sean cercas” “El <i>fracking</i> es la extracción del modo hidráulico, esta funciona penetrando la tierra hasta llegar a la roca madre para extraer el hidrocarburo”</p>
---	--

Fuente: elaboración propia.

Discusión

En el proceso de modelización de la arena de *fracking*, los estudiantes abordaron conceptos clave como densidad, porosidad y permeabilidad, utilizando modelos análogos para representar la interacción entre la roca madre y la arena de *fracking*. A partir de observaciones experimentales escolares y discusiones grupales, surgieron modelos didácticos tanto intuitivos como contraintuitivos.

Modelo didáctico intuitivo

Los resultados obtenidos en la modelización inicial sugieren que los estudiantes captaron una relación inversamente proporcional entre la densidad de los materiales y el volumen de aire entre sus partículas. Esta observación es coherente con la intuición de que, al aumentar la densidad de un material, las partículas están más próximas entre sí, lo que resulta en un menor volumen de aire. Por ejemplo, la comparación entre la arena y la tierra mostró que la tierra, siendo menos densa, presentaba un mayor volumen de aire entre sus partículas en comparación con la arena.

Este resultado es fundamental, ya que establece una base para comprender cómo la porosidad de la roca madre puede influir en la capacidad de los hidrocarburos para moverse a través de ella. La idea de que un material más denso tiene menos espacio para contener aire u otro fluido es una observación que, aunque intuitiva, resulta crucial para entender el papel de la arena en el aumento de la permeabilidad de la roca madre.

Modelo didáctico contraintuitivo

Por otra parte, el análisis de los resultados reveló observaciones contraintuitivas que desafiaron las expectativas iniciales. Algunos grupos de estudiantes señalaron que, a pesar de ser más densa que la tierra, la arena podría contener un mayor volumen de aire entre sus partículas. Esta observación sugiere que la densidad no es el único factor determinante en la capacidad de un material para almacenar fluidos.

Esta paradoja puede explicarse desde una perspectiva química y física. Las partículas que componen la arena podrían ser más masivas que las de la tierra, lo que justificaría su mayor densidad; sin embargo, su forma y disposición permitirían el almacenamiento de aire entre ellas. Este hallazgo indica la necesidad de un análisis más detallado sobre la composición química y estructural de los materiales, un enfoque que podría desarrollarse en investigaciones futuras.

Adicionalmente, la organización espacial de las partículas es crucial. La forma y disposición de las partículas de arena pueden crear estructuras que, aunque más densas, retienen más aire debido a su geometría. Este hallazgo resalta la importancia de considerar múltiples factores en el análisis de materiales porosos y subraya la complejidad del sistema de la roca madre.

Los modelos didácticos, tanto intuitivos como contraintuitivos, reflejan la complejidad del fenómeno y subrayan la necesidad de un enfoque multidimensional en la enseñanza de la física. Estos modelos permiten observar una continuidad entre las ideas de los estudiantes y el modelo teórico objeto de aprendizaje. En sus perfiles conceptuales coexisten diversas ideas que evolucionan a medida que reciben instrucción.

Los MDA sirven como un puente provisional hacia la construcción de un modelo aproximado, evitando una visión excesivamente instrumentalista (Putnam, 1975; Adúriz-Bravo y Galagovsky, 1997; Zamorano *et al.*, 2006). A través de actividades progresivas, los estudiantes pasaron de modelos simples basados en el nivel macroscópico de la materia a representaciones más complejas que integran una visión sistémica del papel de la arena en el *fracking* (Bahamonde *et al.*, 2020).

Conclusión

La experiencia de modelización de la arena de *fracking* permitió a los estudiantes explorar conceptos científicos complejos —como densidad, porosidad y permeabilidad— mediante la experimentación y el uso de analogías, lo que promovió una comprensión más profunda e integrada del fenómeno. La diversidad de resultados estimuló el debate y fortaleció la capacidad argumentativa, clave en la alfabetización científica crítica (España y Prieto, 2009; Hernández-Ramírez y García-Villanueva, 2023). En particular, descubrir que una mayor densidad no siempre implica un menor contenido de aire entre partículas les permitió problematizar sus ideas previas y avanzar hacia explicaciones más sofisticadas sobre los materiales porosos.

Este enfoque pedagógico se alinea con los principios de la Educación 5.0, al articular

ciencia, tecnología y contexto social en un entorno de aprendizaje colaborativo que valora tanto la interacción humana como el pensamiento crítico. Al defender sus modelos, los estudiantes se implicaron activamente en la construcción del conocimiento, desarrollando habilidades para intervenir reflexivamente en situaciones problemáticas, como la extracción no convencional de hidrocarburos, desde una perspectiva que vincula lo científico con lo ético y ambiental.

No obstante, se reconocen limitaciones. Al ser un estudio de caso teórico con una muestra de quince estudiantes, los hallazgos son contextuales y no generalizables. Además, el estudio se centró en el proceso de construcción de modelos, lo que implica que la evaluación del impacto a largo plazo en el conocimiento disciplinar y la transferencia de los modelos no pudo verificarse. Futuras investigaciones podrían ampliar el rigor y la aplicabilidad de estos resultados mediante diseños longitudinales.

Financiamiento

Este estudio se enmarca en los proyectos de investigación C158/2022 (*Intervenciones mediante analogías para potenciar las habilidades argumentativas, creativas y de enseñanza-aprendizaje*) y 04/C182 (*Hacia un ecosistema educativo 4.0/5.0 en la Patagonia Norte: estrategias para la formación en salud, ingeniería y ciencias*), ambos financiados por la Facultad de Ciencias de la Educación y Psicología de la Universidad Nacional del Comahue.

Referencias

- Abella, S. y García-Martínez, Á. (2024). Modelización de un ecosistema de humedal. Representaciones socioambientales de los estudiantes de secundaria e implicaciones para la enseñanza de la ecología. *Tecné, Episteme y Didaxis, TED*, (56), 135-152. <https://doi.org/10.17227/ted.num56-17256>
- Adúriz-Bravo, A. e Izquierdo, M. (2009). Un modelo de modelo científico para la enseñanza de las ciencias naturales. *REIEC, Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, 4(1), 40-49. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273320452005>
- Bahamonde, N. (2014). Pensar la educación en biología en los nuevos escenarios sociales: la sinergia entre modelización, naturaleza de la ciencia, asuntos sociocientíficos y multirreferencialidad. *Bio-grafía*, 7(13), 87-98. <https://doi.org/10.17227/20271034.vol.7num.13bio-grafia87.98>
- Bahamonde, N., Cremer, C., Mut, P. y Lozano, E. (2020). El desarrollo de una línea disciplinar para la enseñanza del modelo de presión arterial en la formación del profesorado en biología. *Tecné, Episteme y Didaxis, TED*, (47), 141-161. <http://repository.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/15782>

- Bahamonde, N. y Gómez, A. A. (2016). Caracterización de modelos de digestión humana a partir de sus representaciones y análisis de su evolución en un grupo de docentes y auxiliares académicos. *Enseñanza de las Ciencias*, 34(1), 127-149.
- España, E. y Prieto, T. (2009). Educar para la sostenibilidad: el contexto de los problemas sociocientíficos. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 6(3), 345-354. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92013010003>
- Estany, A. e Izquierdo, M. (2001). Didactología: una ciencia de diseño. *Éndoxa: Series Filosóficas*, (14), 13-33. <https://revistas.uned.es/index.php/endoxa/article/view/5015>
- Flores, D., Guzmán, F., Martínez, Y., Ibarra, E. y Alvear, E. (2020). Contribuciones de la tecnología digital en el desarrollo educativo y social. En Redine (coord.), *Educación 4.0. Origen para su fundamentación* (pp. 45-63). Adaya Press. <http://www.adayapress.com/wp-content/uploads/2020/09/contec.pdf>
- Garritz, A. (2010). La enseñanza de la ciencia en una sociedad con incertidumbre y cambios acelerados. *Enseñanza de las Ciencias*, 28(3), 315-326. <https://doi.org/10.5565/rev/ec/v28n3.4>
- Gentner, D. y Maravilla, F. (2018). Analogical Reasoning. En L. Ball y V. Thompson (eds.), *International Handbook of Thinking & Reasoning* (pp. 186-203). Psychology Press.
- Gentner, D., Loewenstein, J. y Thompson, L. (2003). Aprendizaje y transferencia: un rol general para la codificación analógica. *Journal of Educational Psychology*, 95(2), 393-408. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.95.2.393>
- Gilbert, J. K. y Justi, R. (2016). *Modelling-based Teaching in Science Education* (Vol. 9). Springer International Publishing.
- Godoy, O. (2018). Modelos y modelización en ciencias una alternativa didáctica para los profesores para la enseñanza de las ciencias en el aula. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (número extraordinario). <https://revistas.pedagogica.edu.co/index.php/TED/article/view/8898>
- Graells, P. (1999). Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) aplicadas a la educación. Algunas de sus líneas de investigación. *Educar*, 25(3), 632-654. <https://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Hernández-Ramírez, C. y García-Villanueva, J. (2024). Construcción de modelos explicativos sobre el fenómeno de la menstruación: un análisis sobre las creencias y las enseñanzas en el ámbito escolar. *Tecné, Episteme y Didaxis, TED*, (56), 56-75. <https://doi.org/10.17227/ted.num56-19212>
- Hummel, J. y Holyoak, K. (1997). Representaciones distribuidas de estructura: una teoría de acceso analógico y mapeo. *Psychological Review*, 104(3), 427-466. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.104.3.427>
- Izquierdo, M. (2017). Atando cabos entre contexto, competencias y modelización. ¿Es posible enseñar ciencias a todas las personas? *Modelling in Science Education and Learning*, 10(1), 309-326. <https://doi.org/10.4995/msel.2017.6637>
- Izquierdo, M. (2000). Fundamentos epistemológicos. En F. Perales y P. Cañal de León (eds.), *Didáctica de las ciencias experimentales* (pp. 35-64). Marfil.
- Lozano, E. (2015). *Diseño, implementación y evaluación de una unidad didáctica para la enseñanza de modelos de membrana celular en la formación biológica del profesorado, con aportes de ideas metacientíficas provenientes del eje naturaleza de la ciencia* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Comahue]. <http://hdl.handle.net/20.500.12049/527>

- Lozano, E., Bahamonde, N. y Adúriz-Bravo, A. (2016). Análisis histórico-epistemológico sobre los modelos de membrana celular para enseñar biología celular y naturaleza de la ciencia al profesorado. *Filosofía e História da Biologia*, 11(1), 49-68. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/60312>
- Moreira, M. (2021). Desafíos actuales para la enseñanza de las ciencias. *Avances en la Enseñanza de la Física*, 3(1). <https://doi.org/10.36411/AEF.3.1.1>
- Neiman, G. y Quaranta, G. (2006). Los estudios de casos en la investigación sociológica. En G. Vasilachis (ed.), *Estrategias de investigación cualitativa* (pp. 212-237). Gedisa.
- Psillos, D. y Kariotoglou, P. (2016). *Iterative Design of teaching-learning Sequences: Introducing the Science of Materials in European Schools*. Springer.
- Putnam, H. (1975). *Mind, Language and Reality: Philosophical Papers* (v. 2). Cambridge University Press.
- Rojas, F. (2021, 10 de mayo). Qué es la educación 4.0. *Revista La Universidad*. <http://www.revista.unsj.edu.ar/?p=4302>
- Sadler, T. D., Chambers, F. W. y Zeidler, D. L. (2004). Student Conceptualizations of the Nature of Science in Response to a Socioscientific Issue. *International Journal of Science Education*, 26(4), 387-409.
- Sanmartí, N. (2002). *Didáctica de las ciencias en la educación secundaria obligatoria*. Síntesis Educación.
- Schwarz, C. y White, B. (2010). Metamodeling Knowledge: Developing Students' Understanding of Scientific Modeling. *Cognition and Instruction*, 28(2), 165-205. <https://doi.org/10.1207/s1532690xci2302>
- Stake, R. (1995). *The Art of Case Study Research*. Sage.
- Taylor, P. (2014). Contemporary Qualitative Research. En N. Lederman y S. Abell (eds.), *Handbook of Research on Science Education* (pp. 287-305). Routledge.
- Zamorano, R., Gibbs, H., Moro, L. y Viau, J. (2006). Evaluación de un modelo didáctico analógico para el aprendizaje de energía interna y temperatura. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 3(3), 392-408. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92030304>
- Zeidler, D., Sadler, T., Simmons, M. y Howes, E. (2005). Beyond STS: A research-based Framework for Socioscientific Issues Education. *Science Education*, 89(3), 357-377. <https://doi.org/10.1002/sce.20048>