
ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS

REVISTA DE INVESTIGACION Y EXPERIENCIAS DIDÁCTICAS

vol. 41, n. 1, marzo 2023

CONSEJO DE REDACCIÓN

Ana María Abril Gallego, DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS, FACULTAD DE HUMANIDADES Y CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN, UNIVERSIDAD DE JAÉN • Edelmira Badillo, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA • Florentina Cañada, DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES Y MATEMÁTICAS, UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA • M. Consuelo Domínguez Sales, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, FACULTAT DE MAGISTERI, UNIVERSITAT DE VALÈNCIA • Mercè Izquierdo Aymerich, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA • Ceneida Fernández Verdú, DEPARTAMENTO INNOVACIÓN Y FORMACIÓN DIDÁCTICA FACULTAD DE EDUCACIÓN, UNIVERSIDAD DE ALICANTE • Bernardo Gómez Alfonso, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LES MATEMÀTICA, FACULTAT DE MAGISTERIO, UNIVERSITAT DE VALÈNCIA • Susana García Barros, DEPARTAMENTO DE PEDAGOGÍA E DIDÁCTICA UNIVERSIDADE DA CORUÑA • Valentín Gavidia Catalán, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS I SOCIALS, UNIVERSITAT DE VALÈNCIA • Julià Hinojosa Lobato, DEPARTAMENT D'EDUCACIÓ LINGÜÍSTICA I LITERÀRIA I DE DIDÀCTICA DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS I DE LA MATEMÀTICA, UNIVERSITAT DE BARCELONA • Mercè Junyent Pubill, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA • Anna Marbà-Tallada, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA • Jordi Solbes Matarredona, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS I SOCIALS, UNIVERSITAT DE VALÈNCIA.

DIRECCIÓN CIENTÍFICA (EDITORES)

Conxita Márquez Bargalló, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA.

Angel Gutiérrez Rodríguez, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA, UNIVERSITAT DE VALÈNCIA.

OTROS CONSEJEROS

Edelmira Badillo, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA • Digna Couso Lajaron, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA • Juan Gutiérrez Soto, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LES MATEMÀTICA, FACULTAT DE MAGISTERIO, UNIVERSITAT DE VALÈNCIA • Jordi Solbes Matarredona, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS I SOCIALS, UNIVERSITAT DE VALÈNCIA.

CONSEJO ASESOR

Agustín Adúriz-Bravo, INSTITUTO CEFIEC, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES, UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, ARGENTINA • Fanny Angulo Delgado, DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS Y LAS ARTES, FACULTAD DE EDUCACIÓN, UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, COLOMBIA • Catherine Bruguière, EPISTÉMOLOGIE ET DIDACTIQUE DE LA BIOLOGIE, INSPE DE LYON, FRANCIA • Leonor Camargo Uribe, DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS, UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL, COLOMBIA • Antonia Candela, DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES EDUCATIVAS, CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL IPN, MÉXICO • Marcelo de Carvalho Borba, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" (UNESP), BRASIL • Lydia R. Galagovsky, INSTITUTO CENTRO DE FORMACIÓN E INVESTIGACIÓN EN ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS (CEFIEC), FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES, UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES, ARGENTINA • Alma Adrianna Gómez-Galindo, UNIDAD MONTERREY, CINVESTAV, MÉXICO • Mercè Izquierdo Aymerich, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA, ESPAÑA • María Pilar Jiménez Aleixandre, DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA, ESPAÑA • Rosària Justí, DEPARTAMENTO DE QUÍMICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, BRASIL • Isabel Martins, NÚCLEO DE TECNOLOGIA EDUCACIONAL PARA A SAÚDE, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (NU-

TES/UFRJ), BRASIL • Vicente Mellado Jiménez, DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES Y MATEMÁTICAS, UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA, ESPAÑA • Cristian Merino Rubilar, INSTITUTO DE QUÍMICA, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO, CHILE • Judit Moschkovich, EDUCATION DEPARTMENT, UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT SANTA CRUZ, EE.UU. • Marcela Cecilia Párraguez González, INSTITUTO DE MATEMÁTICAS, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO, CHILE • Francisco Javier Perales Palacios, DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES, UNIVERSIDAD DE GRANADA, ESPAÑA • Maurício Pietrocola, FACULDADE DE EDUCAÇÃO, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, BRASIL • Núria Planas, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA, ESPAÑA • João Pedro da Ponte, INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, UNIVERSIDADE DE LISBOA, PORTUGAL • Lluís Puig Espinosa, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA, UNIVERSITAT DE VALÈNCIA, ESPAÑA • Mario Quintanilla-Gatica, DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA, FACULTAD DE EDUCACIÓN, UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE, CHILE • Luis Radford, ÉCOLE DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION, UNIVERSITÉ LAURENTIENNE, CANADÁ • Pedro Rocha dos Reis, INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, UNIVERSIDADE DE LISBOA, PORTUGAL • Neus Sanmartí Puig, DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES CIÈNCIES EXPERIMENTALS, UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA, ESPAÑA • Manuel Santos Trigo, DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA EDUCATIVA, CINVESTAV, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL (IPN), MÉXICO • Graça Simões de Carvalho, CIEC - CENTRO DE INVESTIGAÇÃO EM ESTUDOS DA CRIANÇA, INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, UNIVERSIDADE DO MINHO, PORTUGAL • Jorge Soto Andrade, DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS, UNIVERSIDAD DE CHILE, CHILE • Vicente Talanquer, DEPARTAMENTO DE QUÍMICA Y BIOQUÍMICA, UNIVERSIDAD DE ARIZONA, EE.UU. • Oscar Eugenio Tamayo Alzate, UNIVERSIDAD DE CALDAS - UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES, DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS EDUCATIVOS, COLOMBIA • Paola Valero, DEPARTMENT OF MATHEMATICS AND SCIENCE EDUCATION, STOCKHOLM UNIVERSITY, SUECIA • Manuela Welzel-Breuer, INSTITUTE FOR SCIENCE, GEOGRAPHY AND TECHNICAL ENGINEERING, PHYSICS DEPARTMENT, UNIVERSITY OF EDUCATION HEIDELBERG, ALEMANIA

EDICIÓN

Departamentos de: Didáctica de las Ciencias y las Matemáticas de la Universitat Autònoma de Barcelona, Didáctica de las Matemáticas de la de la Universitat de València, Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales de la Universitat de València.

La Revista Enseñanza de las Ciencias es una revista en español, publicada desde 1983. Riguroso sistema doble ciego de evaluación. Amplia red de revisores científicos. Gestión profesional de los artículos a través de la plataforma OJS. Formato digital on-line. Publica en abierto, el texto completo es accesible de forma gratuita. No cobra a los autores de los artículos publicados.

INDEXACIÓN

CARHUS+	ERIHPLUS	JCR-WOS SSCI (ISI)	Scimago
CIRC	FECYT	LATINDEX (Catálogo)	Scopus
DIALNET plus	Google	MathEduc	
DICE	Scholar	MIAR	
	IRESE	REBIUM	

Diseño del interior y maquetación:

Celso Hernández de la Figuera y Gómez

Gestión editorial:

Felipe Corredor Álvarez

Recepción de originales:

<http://ensciencias.uab.es/about/submissions#onlineSubmissions>

Correo electrónico

r.ensenanza.ciencias@uab.cat



CC-BY: en cualquier explotación de la obra autorizada por la licencia hará falta reconocer la autoría. Se permite cualquier explotación de la obra, incluyendo una finalidad comercial, así como la creación de obras derivadas, la distribución de las cuales también está permitida sin ninguna restricción.

ISSN (impreso): 0212-4521 e ISSN (digital): 2174-6486

Depósito legal: B-12373-1983

INVESTIGACIONES DIDÁCTICAS

Multimodalidad y regulación metacognitiva en el aprendizaje de la evolución, <i>Gastón Pérez, Alma Adrianna Gómez Galindo, Leonardo González Galli</i>	5
Integración de la ingeniería en la educación científico-tecnológica desde un prisma CTS, <i>Antonio García-Carmona</i>	25
Comparación de resoluciones algebraicas con y sin tablas de problemas de edades, <i>Carlos Soneira</i>	43
Analogías y enseñanza de la genética y la biología evolucionista, <i>Leonardo González Galli</i>	63
Emociones y adquisición de conocimiento sobre la luz y los colores mediante un aprendizaje basado en proyectos en educación primaria, <i>Ainhoa Arana-Cuenca, Carmen Romero-García, Sonia Pérez Andrés, Elena Marcilla Garcías</i>	79
El diseño de preguntas investigables en el ciclo superior de primaria, <i>Èlia Tena, Digna Couso</i>	101

INNOVACIONES DIDÁCTICAS

Uso de realidad virtual en Geometría para el desarrollo de habilidades espaciales, <i>Silvia N. Moral-Sánchez, María T. Sánchez-Compañá, Isabel Romero Albaladejo</i>	125
Desarrollo del pensamiento algebraico a través de la justificación en educación primaria, <i>Eder Pinto, Cristina Ayala-Altamirano, Marta Molina, María C. Cañadas</i>	149



Multimodalidad y regulación metacognitiva en el aprendizaje de la evolución

Multimodality and Metacognitive Regulation in Learning Evolution

Gastón Pérez

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Buenos Aires. Argentina.

Instituto de investigaciones CeFIEC. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Argentina.

gastonperez@ccpems.exactas.uba.ar

Alma Adrianna Gómez Galindo

Cinvestav Monterrey. México.

agomez@cinvestav.mx

Leonardo González Galli

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Buenos Aires. Argentina.

Instituto de investigaciones CeFIEC. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Argentina.

leongalli@gmail.com

RESUMEN • El aprendizaje de la evolución presenta múltiples dificultades, entre ellas ciertos modos de razonar u obstáculos epistemológicos. Estos obstáculos no son eliminables, por lo que se espera desarrollar en los estudiantes la habilidad de regularlos metacognitivamente al momento de aprender o utilizar un modelo científico. En este trabajo se analiza la relación entre dicha regulación y los diferentes modos de representar que pueden utilizarse en una clase de biología. A partir de un análisis multimodal, se examinaron las regulaciones que llevaron adelante estudiantes de Educación Secundaria Obligatoria en el marco de una secuencia didáctica para aprender evolución. Encontramos que modos de representar como la oralidad, los dibujos o los esquemas conceptuales poseen diferentes potencialidades para ayudar a la regulación metacognitiva de los obstáculos epistemológicos.

PALABRAS CLAVE: Enseñanza de la evolución; Obstáculos epistemológicos; Teleología; Esencialismo; Multimodalidad.

ABSTRACT • Learning about evolution presents multiple difficulties, including certain ways of reasoning or epistemological obstacles. These obstacles cannot be eliminated, so it is expected that students develop the ability to regulate them metacognitively when learning or using a scientific model. This paper analyzes the relationship between the metacognitive regulation and the different ways of representing that can be used in a biology class. From a multimodal analysis, the regulations carried out by students of compulsory secondary education in the framework of a didactic sequence to learn evolution were examined. We found that ways of representing such as orality, drawings or conceptual schemes have different potentialities to help metacognitive regulation of epistemological obstacles.

KEYWORDS: Teaching of evolution; Epistemological Obstacles; Teleology; Essentialism; Multimodality.

Recepción: febrero 2022 • Aceptación: enero 2023 • Publicación: marzo 2023

INTRODUCCIÓN

El aprendizaje de los modelos de la biología evolutiva en la escuela obligatoria es fundamental para el desarrollo de ciudadanos críticos, ya que permiten explicar numerosas cuestiones relevantes de su vida cotidiana (Futuyma, 2009; Stamos, 2008). Solo por mencionar un ejemplo actual: comprender los modelos de la biología evolutiva ayuda a entender los procesos de mutación y propagación de virus como el SARS-CoV-2, lo que permitirá tomar decisiones de manera informada respecto de cuestiones como la vacunación u otros cuidados individuales.

Sin embargo, las investigaciones muestran que la enseñanza de la biología evolutiva reviste un desafío para los docentes. En general, se encuentra que, al finalizar la educación obligatoria, los estudiantes demuestran una pobre comprensión sobre estos modelos (Astolfi, 2003; Gómez Crespo, 2017; Johsua y Dupin, 2005). Esta situación puede deberse a distintas causas, entre ellas la persistencia de ciertas concepciones alternativas (Álvarez Pérez, 2017; De Vecchi y Giordan, 2006; González Galli y Meinardi, 2015; Jiménez Aleixandre, 2002).

Según diversas investigaciones, estas concepciones pueden ser entendidas como la expresión de ciertas formas de razonamiento denominadas obstáculos epistemológicos (OE). Estos modos de razonar no serían eliminables (como explicaremos más adelante), por lo que el tratamiento didáctico que se propone es fomentar en los estudiantes la habilidad de vigilar los OE de manera metacognitiva. Esto es, hacerse conscientes de su existencia y regularlos en el momento de construir o utilizar un modelo científico.

En anteriores trabajos hemos analizado distintos modos de regular los OE que utilizan estudiantes de educación secundaria (Pérez, 2020; Pérez et al., 2021). En este trabajo nos centraremos en otro aspecto de esta regulación metacognitiva que tiene que ver con la relación que se establece entre ella y los distintos modos de representación que pueden utilizarse en una clase de Biología. Sobre esta cuestión nos preguntamos cuál es la relación entre los procesos de regulación metacognitiva de los OE y los distintos modos de representación de las explicaciones construidas por los estudiantes a partir de los modelos de evolución por selección natural y especiación alopátrica.

Consideramos que analizar el rol que tienen los modos de representación y cómo favorecen (o no) la regulación metacognitiva de los OE puede ayudar a los docentes a construir mejores aprendizajes en la enseñanza de la biología evolutiva.

MARCO TEÓRICO

Obstáculos epistemológicos y vigilancia metacognitiva

Es común encontrar en las clases de evolución frases del tipo «las bacterias mutan para hacerse resistentes» o «si el clima cambia, las plantas y los animales tienen que adaptarse o extinguirse». Investigaciones del área de la didáctica de las ciencias proponen que estas frases pueden entenderse como expresiones que se originan en ciertos modos de razonar que tenemos los sujetos, los que pueden denominarse obstáculos epistemológicos (OE) (Astolfi, 2003; Johsua y Dupin, 2005; Peterfalvi, 2001).

Estos modos de razonar cumplen con tres características: (1) Son funcionales, en tanto que permiten a las personas describir, explicar y predecir fenómenos del mundo en el que viven; (2) son transversales, en el sentido de que subyacen tras explicaciones de diferentes dominios del conocimiento; y (3) son conflictivos, en el sentido en que las expresiones de dichos obstáculos pueden dificultar el aprendizaje o la aceptación del modelo científico que se quiere enseñar (González Galli y Meinardi, 2015). Para el caso de la enseñanza de la evolución se han descrito varios modos de razonar que podrían funcionar como OE, entre los que se encuentran el finalismo (Gresch, 2020; González Galli y

Meinardi, 2015; Silva et al., 2021; Werth y Allchin, 2020; Wingert y Hale, 2021) y el esencialismo (Gelman y Rhodes, 2012; González Galli et al., 2018; Wilkins, 2013).

El finalismo o la teleología implica pensar los fenómenos apelando a fines, metas u objetivos. Cuando este modo de razonamiento aparece en el ámbito de la biología, se ha de asumir que la existencia, el origen y las características de los procesos y estructuras biológicas responden a una cierta finalidad. Por un lado, este modo de razonar es funcional para las personas, en el sentido de que es como un «atajo» explicativo y ayuda a organizar información llenando aquello que no se conoce para hacer continua la narrativa de una explicación. Sin embargo, por otro lado, el razonamiento teleológico puede dificultar comprender –al menos– dos grandes ideas de la biología evolutiva. En primer lugar, impediría comprender que el origen de las variaciones heredables no está ligado a su valor adaptativo, ya que desde un marco de pensamiento teleológico el estudiante asume que las variaciones individuales emergen de un modo orientado a satisfacer las necesidades de los organismos. En segundo lugar, impide comprender que los cambios evolutivos obedecen a causas precedentes (y no a fines predeterminados o a necesidades), ya que el estudiante suele asumir que el proceso evolutivo general de divergencia, que generó la diversidad biológica que hoy conocemos, está orientado hacia la consecución de ciertos fines, hacia la aparición de ciertos linajes. Típicamente, la aparición de la especie humana constituiría la meta del proceso evolutivo.

El otro OE, el esencialismo, es la suposición de que ciertas categorías son reales y poseen una fuerza causal subyacente –la esencia de carácter inmutable– que es responsable de las características que comparten los miembros de la categoría. En biología, esta forma de clasificación implica pensar que cada organismo pertenece a una categoría definida por un conjunto de rasgos que son explicados a partir de su esencia inmutable. Este modo de razonar es muy útil para las personas, en tanto que sería una de las bases de los sistemas de clasificación que utilizamos día a día. Clasificar de manera esencialista nos permite hacer inferencias sobre la base de las categorías construidas. De esta manera, cuando se nos habla sobre algo que podemos haber categorizado, esta habilidad de categorización reduce el número de información que tenemos que procesar para dar una respuesta. Sin categorías, nada podría ser generalizado o aprendido, cualquier experiencia sería nueva e impredecible. No obstante, en el momento de aprender los modelos de la biología evolutiva, este modo de razonar se transforma en un problema por diversas razones. Por un lado, razonar de manera esencialista implica que la distinción entre especies se entiende como categórica más que como continua. Esto no permite comprender las categorías como construcciones ni la posibilidad de categorías intermedias. Por otro lado, razonar de manera esencialista implica ignorar la variabilidad, lo que presenta dos problemas: dificulta entender que la variabilidad es necesaria para que la selección natural actúe y, aunque se asuma esa variabilidad, una perspectiva esencialista tiende a considerarla superficial en comparación con la esencia subyacente inmutable.

En la tabla 1 se sintetiza lo presentado sobre estos dos OE en función de la propuesta de Astolfi (2003). Allí se indican ideas de los estudiantes que podrían considerarse expresiones del OE, también se incluye qué nociones de los modelos científicos de la biología evolutiva dificulta comprender el OE y, por último, cuál es la idea que se quiere construir –coherente con el modelo científico que debe enseñarse–.

Tabla 1.
Obstáculos epistemológicos que dificultan el aprendizaje de los modelos evolutivos

<i>Obstáculo: teleología</i>		
Definición: Todos los procesos y estructuras biológicas responden a un fin (frecuentemente la supervivencia).		
Ideas de los estudiantes	Lo que el obstáculo impide comprender	Idea a construir
Las bacterias mutan para hacerse resistentes. Los osos polares se volvieron blancos porque necesitaban camuflarse.	El origen de las variaciones heredables no está ligado a su valor adaptativo. Los cambios evolutivos obedecen a causas precedentes (y no a fines predeterminados o a necesidades).	Todos los procesos y estructuras biológicas responden a causas eficientes que los preceden.
<i>Obstáculo: esencialismo</i>		
Definición: Cada individuo pertenece a una categoría definida por un conjunto de rasgos que son explicados a partir de su esencia inmutable.		
Ideas de los estudiantes	Lo que el obstáculo impide comprender	Idea a construir
Una ballena no puede ser un mamífero porque vive en el agua. Las hormigas son todas iguales, casi no tienen diferencias. Como cada célula del organismo tiene diferentes características deben tener diferente ADN.	Existe una variación continua en la naturaleza. Existe una ubicua variación interindividual y esta es relevante para la evolución. Las nuevas especies se originan como lo que inicialmente eran, variedades de otras especies.	Las categorías de la taxonomía intuitiva y la científica son arbitrarias y las entidades designadas por estas categorías son cambiantes.

Como mencionamos antes, los OE cumplen una función en la cognición de los sujetos. Investigaciones en psicología cognitiva sugieren que estos modos de razonar son rasgos propios de la cognición humana, o sea de la «biología intuitiva» (Coley y Muratore, 2012; Inagaki y Hatano, 2006). Es por ello que serán limitadas las posibilidades de eliminarlos o modificarlos radicalmente. Dada esta situación, los investigadores proponen fomentar en los estudiantes el desarrollo de una vigilancia metacognitiva sobre los OE (Astolfi y Peterfalvi, 2001; Pérez et al., 2022; Peterfalvi, 2001; Ronfard et al., 2021). Esta vigilancia implica, al menos, dos cuestiones. Por un lado, que los estudiantes se hagan conscientes de dichos modos de razonar y conozcan su función en la cognición, el carácter transversal de los mismos y su conflictividad en el momento de aprender los modelos científicos. Por otro lado, que desarrollen la capacidad de regular metacognitivamente los OE durante la construcción o el uso del modelo científico de interés. Esta regulación involucrará procesos de planificación del encuentro con dichos OE, de monitorización de estos modos de pensar cuando se resuelve alguna situación problemática y de evaluación del trabajo realizado. Será fundamental para el desarrollo de esta capacidad hacer «visible» el pensamiento (Ritchhart et al., 2014), de manera que se explicita en el aula el modo de razonar y que se vuelva objeto de discusión.

Multimodalidad en el aula de ciencias

Tradicionalmente en las clases de ciencias de educación secundaria ha preponderado una visión monomodal de la comunicación centrada en la oralidad o en la escritura (Izquierdo et al., 2003; Márquez et al., 2006). De esta manera, se han ignorado otros modos de comunicación, como los dibujos. Además, cuando estos otros modos de expresión aparecen, suelen hacerlo de manera ilustrativa y no como verdaderos modos de representación que permitan aprender (Kress et al., 2001; Kress, 2010).

A pesar de esta situación, el uso de múltiples modos de comunicación constituye el estado normal de la comunicación humana. Kress (2010: 79) define la idea de «modo» como un recurso semiótico moldeado social y culturalmente, el cual habilita para construir significados. Ejemplos de estos modos son las imágenes, la escritura o el habla. Es común que en las explicaciones científicas se utilicen de manera conjunta diferentes modos, a este tipo de explicaciones se las denomina explicaciones multimodales (Gómez Galindo, 2008, 2013; Jaipal, 2010; Kress, 2010; Tamayo Alzate, 2006).

El uso de un determinado modo para representar está asociado a su estructura interna, que permitirá representar o transmitir información de manera distinta a otro modo. Así, el uso coordinado y dinámico de varios modos de representación para una misma explicación, posibilita una interacción entre ellos. Por ejemplo, la interacción puede ser de cooperación, cuando los distintos modos aluden a los mismos aspectos del modelo que se quiere representar, o de especialización, cuando los distintos modos aluden a aspectos diferentes (Izquierdo et al., 2003; Kress et al., 2001; Jaipal, 2010; Márquez et al., 2006). Retomando el caso de los dibujos, los investigadores consideran que poseen un gran potencial comunicativo para mostrar un escenario en el que pasan cosas, las relaciones de las partes con el todo o la simultaneidad y secuenciación de los procesos. La mayoría de estos aspectos serían más difíciles de comunicar a través de otros formatos, como un texto escrito o la oralidad (Gómez Llombart y Gavidia Catalán, 2015; Márquez, 2002).

En función de lo anterior, cabe resaltar que cada modo de representación tiene cierta potencia en relación con la comunicación de los aspectos del modelo científico que permite representar. Como mencionamos para el caso de los dibujos, cada modo de representación permitirá la explicitación de ciertos aspectos del modelo, y no así de otros. Esto se debe a que cada modo tiene una estructura interna diferente que está atravesada por aspectos culturales, sociales e históricos que han configurado la manera en que se puede construir significados a partir de ellos. Así, cada modo será capaz de construir determinados significados, pero no otros, lo que autores como Kress (2010) llaman «functional specialization». Esta característica permite seguir considerando la necesidad de utilizar diversos modos que articulen los significados que se desean construir en el aula.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

El objetivo de este trabajo es analizar la relación entre los procesos de regulación metacognitiva de los OE y los distintos modos de representación de las explicaciones construidas por estudiantes en el marco del aprendizaje de los modelos de evolución por selección natural y especiación alopátrica. Este trabajo es parte de una investigación más amplia correspondiente a la tesis doctoral del primer autor.

Para alcanzar el objetivo, el tipo de diseño de investigación adoptado es cualitativo-interpretativo (Creswell, 2012). En particular, hemos utilizado un análisis multimodal, (Kress, 2010), puesto que permite identificar las potencialidades de los diversos modos comunicativos en relación con la regulación metacognitiva de los OE.

Participantes

Del presente estudio participaron ochenta estudiantes de entre 14 y 16 años que asisten a una escuela de educación secundaria, de gestión pública, de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Dicha muestra fue por conveniencia, no probabilística y no aleatoria (Hernández Sampieri et al., 2014). Se trabajó con tres grupos-clase de entre 23 y 29 estudiantes cada uno, durante tres meses.

Los estudiantes y sus familias dieron un consentimiento informado dos meses antes de comenzar la investigación en el aula. En el consentimiento se explicitaba la importancia de las investigaciones en didáctica de la biología dentro de aulas reales y que esta se llevaría a cabo en el marco de una tesis doctoral.

Instrumentos para la toma de datos

Para recolectar los datos se utilizó una secuencia didáctica basada en la modelización escolar, con énfasis en el desarrollo de la vigilancia metacognitiva. Por limitaciones de espacio en este artículo solo mencionaremos algunas particularidades de la secuencia que están asociadas al análisis que aquí elaboramos. Para conocer en profundidad la propuesta sugerimos revisar trabajos ya publicados (Pérez et al., 2018; Pérez, 2020).

La secuencia didáctica implementada constó de 21 actividades basadas en la propuesta de secuenciación de Sanmartí (2002), que estuvieron orientadas a la construcción del modelo de evolución por selección natural y del modelo de especiación alopátrica. Se comenzó con una actividad preinstruccional en la que se solicitó a los estudiantes explicar el cambio del pelaje de lobos árticos a través del tiempo, así como el origen de diferentes especies de cánidos. Estas explicaciones iniciales fueron utilizadas por el investigador para armar un único esquema conceptual de todo el grupo-clase, que luego, por grupos de estudiantes, fue revisado y modificado en diversas oportunidades dentro de la secuencia didáctica. En dichos momentos se les solicitaba que, en función de lo aprendido, en estos pequeños grupos, modificaran el esquema y volvieran a responder las preguntas de la actividad preinstruccional. Hacia la mitad de la secuencia didáctica, el caso de los lobos árticos se constituyó en el hecho paradigmático (Astolfi, 2003; Izquierdo, 2014) de la secuencia didáctica, sobre el que se construyó una primera aproximación a los modelos de selección natural y especiación alopátrica. Al finalizar la secuencia didáctica, se presentaron los diferentes esquemas reelaborados en cada grupo.

Durante la secuencia se trabajó —en nueve actividades— de manera explícita sobre la teleología y el esencialismo. Se analizaron las explicaciones de la actividad preinstruccional para identificar expresiones de la teleología o el esencialismo, se discutió sobre la funcionalidad y la transversalidad de estos modos de razonar, y se analizó su conflictividad con los modelos de la biología evolutiva, entre otras acciones. Además, se consensuó con el grupo-clase una etiqueta lingüística para referirse a cada uno de estos OE. Estos términos, elegidos por el estudiantado, se plasmaron en un cartel en el aula para facilitar la referencia a estos modos de razonar durante el resto del trabajo en clase.

La actividad que analizaremos en profundidad en este artículo se encontraba dentro del momento de síntesis y estructuración del conocimiento (Sanmartí, 2002) de la secuencia didáctica. Esta actividad tuvo como objetivo que los estudiantes aplicaran el modelo de evolución por selección natural, construido sobre el caso de los lobos árticos, a dos casos novedosos para ellos: la evolución de la resistencia al vinagre de los piojos (*Pediculus humanus capitis*) y la evolución de las espinas en el arbusto calafate (*Berberis microphylla*). Hemos seleccionado esta actividad de entre todas las de la secuencia porque es en ella donde los estudiantes echaron mano de diversos modos de representación para la construcción de explicaciones.

En la actividad se propuso una versión de la estrategia denominada «Pensamiento en voz alta» o «*Thinking aloud*» (Hartman, 2001). En este caso, los estudiantes trabajaron en parejas, en las que cada uno de los miembros tenía un rol asignado: el rol del «resolvedor» y el rol del «observador». El «resolvedor» debía escribir una explicación del caso asignado, mientras que en voz alta hacía explícitos todos sus pensamientos respecto de la construcción de dicha explicación. Mientras tanto, el «observador» tomaba nota de los pensamientos que su compañero verbalizaba. En este último rol, y como se verá en los análisis que siguen, muchas veces el estudiante no solo registra lo que verbaliza su compañero, sino que también agrega registros de las acciones.

Los roles de quien resolvía y de quien observaba se alternaron en cada uno de los dos casos. La consigna otorgada a los estudiantes se encuentra en figura 1.

Para resolver la actividad, los alumnos contaron con distintos elementos: sus apuntes de clases, los esquemas conceptuales que se fueron revisando a lo largo de la secuencia didáctica y los carteles en

la pared del aula con el nombre que se había negociado para llamar a los OE. Entendemos que estos elementos permiten distribuir la cognición y disminuir la demanda cognitiva de la actividad, lo que posibilita a los estudiantes enfocarse mejor en la demanda metacognitiva (Salomon, 1993).

“Resolvedores” y “Observadores”

Resuelvan los problemas según el rol asignado, aplicando el modelo de evolución por selección natural.

Problema 1

Hace varios años atrás las familias quitaban los piojos de sus hijos e hijas lavándoles la cabeza con vinagre. El vinagre era un potente insecticida contra los piojos. Sin embargo, hoy en día la mayoría de las familias coinciden en que el vinagre ya no tiene efecto sobre los piojos. ¿Por qué crees que actualmente el vinagre, que es el mismo que se utilizaba con éxito anteriormente, ya no tiene efecto?

Problema 2

El Calafate, además de ser una ciudad, es un arbusto propio de la Patagonia que produce unas ricas bayas carnosas. Dichas bayas son el alimento de diversos animales herbívoros. Antiguamente el arbusto Calafate no poseía espinas. Sin embargo, actualmente puede observarse que tienen espinas punzantes en todos sus tallos. ¿Cómo podrías explicar que antiguamente los arbustos Calafate no tenían espinas, pero que hoy sus descendientes tienen espinas?

Fig. 1. Consigna ofrecida a los estudiantes en la actividad de pensamiento en voz alta.

Análisis multimodal

Para analizar la resolución de la actividad por parte de los estudiantes, se llevó adelante un análisis multimodal. Si bien existen distintos enfoques para este tipo de análisis (Jewitt, 2014), en este trabajo nos basamos en el enfoque de la semiótica social que propone el equipo del lingüista y semiótico Gunther Kress (Kress, 2010; Kress et al., 2001).

Se definieron como unidades de análisis el proceso de resolución de la actividad de pensamiento en voz alta, tanto la explicación en formato escrito construida por el «resolvedor» como la narración escrita de la observación realizada por el «observador» y los materiales utilizados para el desarrollo de la tarea (esquemas, dibujos, carteles, etc.).

Para el análisis desde la semiótica social se construyó una narrativa que describe, explica e interpreta la manera en la que los distintos modos de comunicación (oralidad, esquemas, dibujos y textos) interactúan, así como cuáles son sus potencialidades específicas en relación con la construcción de la explicación. Durante el análisis que se presentará se tuvieron en cuenta tres dimensiones. La primera se relaciona con el plano ideativo (elementos teóricos de los modelos construidos que los estudiantes desean comunicar), así como con el plano material (recursos utilizados por los estudiantes para la construcción de la explicación tales como esquemas, dibujos, u otros). La segunda dimensión corresponde al contexto en el que se utilizó el modo de comunicación o en el que se produjo la explicación multimodal. Desde esta perspectiva, las representaciones que crean los estudiantes tienen intereses particulares que son evocados por el contexto de uso. La tercera dimensión incluyó el análisis de las relaciones que se establecen entre los distintos modos de comunicación. El análisis de estas tres

dimensiones permite caracterizar las potencialidades de cada modo comunicativo en relación con la regulación de los OE.

Para lograr la validez de las interpretaciones y las confiabilidad de las ideas que se sostienen en el análisis, se realizaron triangulaciones de investigadores y de datos (Flick, 2007; Hernández Sampieri et al., 2014).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el marco del proceso de modelización llevado a cabo durante la secuencia didáctica, se trabajó desde una perspectiva multimodal. Esto es, se utilizaron diversos modos de representación de las explicaciones que construían los estudiantes. Estos modos fueron: la oralidad, el texto escrito, el dibujo y el esquema conceptual. En este apartado abordaremos la manera en la que se relacionan los procesos de regulación metacognitiva de los OE con los diferentes modos de representación de las explicaciones construidas a partir de los modelos de la biología evolutiva.

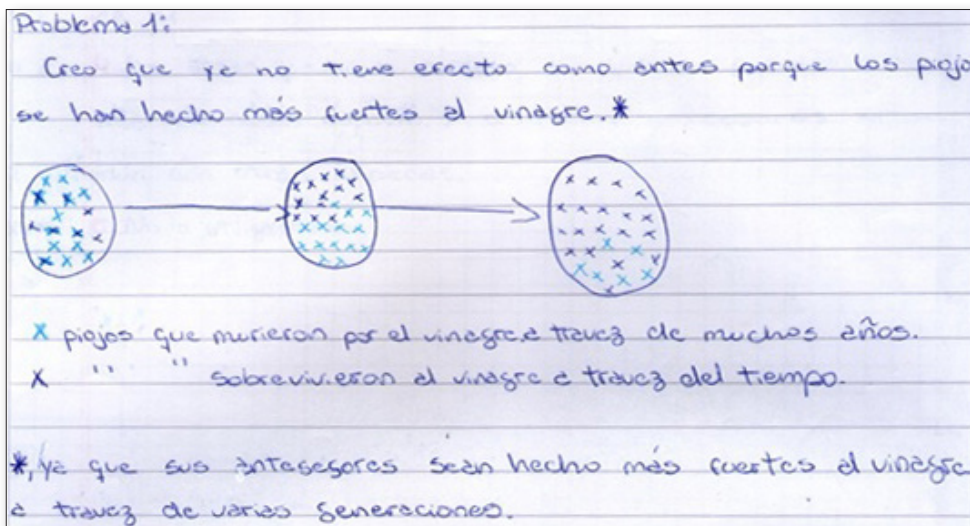
Presentaremos el análisis realizado poniendo el foco en cuatro modos de representación diferentes. En un primer momento abordaremos el rol que juegan los dibujos en el aprendizaje del modelo de selección natural. En un segundo momento nos centraremos en el papel que desempeñan los esquemas conceptuales en la elaboración de las explicaciones de los estudiantes. Finalmente, ahondaremos en la relación entre el modo oral y escrito que obliga a utilizar la actividad de pensamiento en voz alta. Si bien todos los modos de representación han estado presentes en el desarrollo de la actividad, se decidió analizar solo algunos de ellos en cada apartado. Dado que no disponemos de espacio para analizar todos los aspectos de la actividad, seleccionamos aquellos que son más informativos en relación con la actividad metacognitiva de los estudiantes.

Consideramos que estos tres apartados contribuirán a comprender las relaciones entre la regulación de los OE y los distintos modos de representación. En cada uno de ellos presentamos dos ejemplos. La selección de estos se debe a que muestran una variedad de relaciones entre modos de representación y regulación de los OE. En los materiales anexos de la tesis de Pérez (2020) pueden encontrarse ejemplos de otras actividades diferentes a las que aquí presentamos.

El dibujo como modo de hacer visibles las ideas sobre la variabilidad poblacional

En la actividad que aquí es objeto de análisis, los dibujos surgen espontáneamente de los estudiantes. Si bien en diversos momentos de la secuencia habían sido utilizados, aquí son los alumnos quienes optan por explicar a partir de dibujos acompañados de textos escritos. En las tablas 2 y 3 se muestran dos explicaciones para el caso de los piojos construidas por el estudiante que cumplía el rol del «resolvedor», y también se incluyen las notas del estudiante que cumplía el rol del «observador».

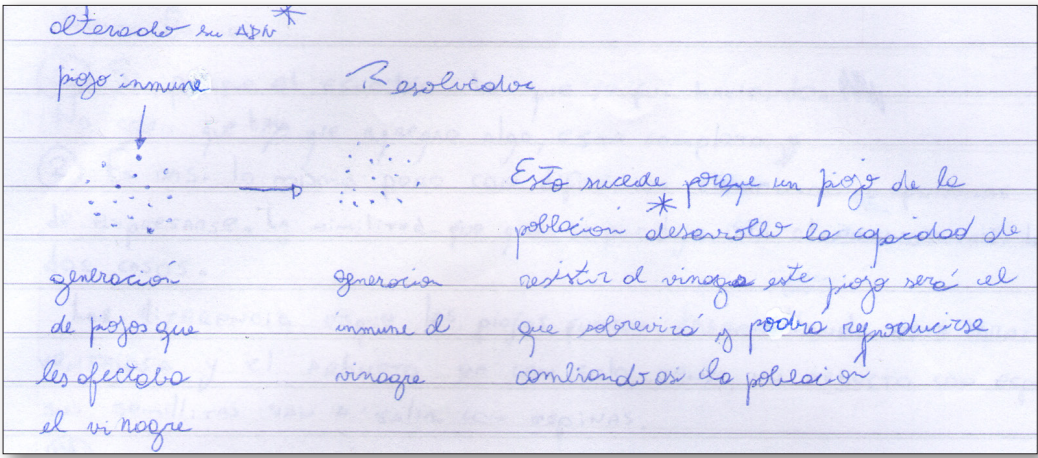
Tabla 2.
Resolución de la actividad de pensamiento en voz alta de Susana y Federico

<i>Resolución (Susana)</i>	<i>Observación (Federico)</i>
Creo que ya no tiene efecto como antes porque los piojos se han hecho más fuertes al vinagre. Ya que sus antecesores se han hecho más fuertes al vinagre a través de varias generaciones.	Está leyendo el caso. Está escribiendo lo que le parece que es la respuesta. Hizo un dibujo que explica cómo los piojos se hicieron más resistentes a través de los años. Puso referencias en el dibujo. Para ella se le hace más fácil explicar mediante un dibujo. Cree que ya terminó. Está revisando su trabajo para ver si tiene algún error. Se equivocó en algo y lo corrigió. Anotó algo que se olvidó de la explicación debajo de las referencias. Lo terminó.
<i>Texto y dibujo de Susana (resolvidor)</i>	
 Problema 1: Creo que ya no tiene efecto como antes porque los piojos se han hecho más fuertes al vinagre.* X piojos que murieron por el vinagre a través de muchos años. X " " sobrevivieron al vinagre a través del tiempo. * ya que sus antecesores se han hecho más fuertes al vinagre a través de varias generaciones. The diagram shows three circles representing populations of fleas. The first circle contains a mix of blue and light blue 'x' marks. An arrow points to the second circle, which contains mostly light blue 'x' marks. A second arrow points to the third circle, which contains mostly blue 'x' marks. This visualizes the process of natural selection where only the resistant fleas survive and reproduce.	

Tanto Susana como Lautaro construyen una explicación multimodal que integra texto y dibujo. Susana (tabla 2) indica en su texto que «los piojos se han hecho más fuertes al vinagre», pero esta explicación no da cuenta del mecanismo por el que se fortalecieron. En este sentido, la explicación podría entenderse como la expresión del obstáculo finalista, por ejemplo. Sin embargo, el dibujo muestra que la explicación es más cercana al modelo de evolución por selección natural. En el dibujo aparecen otros elementos diferentes al texto, como la representación de una población, entendida como el conjunto de dos variantes representadas por cruces celestes y cruces azules.

A diferencia de Susana, la explicación que construye Lautaro (tabla 3) sí parece estar basada en el obstáculo finalista. Este OE se expresa en el supuesto de que el ADN se modificó según las necesidades del individuo. Además, menciona que un piojo «desarrolló la capacidad de resistir al vinagre» sin escribir en términos poblacionales, sino centrándose en el nivel individual. A pesar de no hablar de la población, esta sí aparece en el dibujo que realiza. Según el alumno, los puntos más gruesos representan a «piojo inmune alterado en su ADN».

Tabla 3.
Resolución de la actividad de pensamiento en voz alta de Lautaro y Rubén

<i>Resolución (Lautaro)</i>	<i>Observación (Rubén)</i>
Esto sucede porque un piojo de la población ha alterado su ADN, desarrolló la capacidad de resistir al vinagre. Este piojo será el que sobrevivirá y podrá reproducirse cambiando así la población.	Empieza a leer el caso. Empieza a hablar sobre que hace varios años atrás las familias lavaban sus cabezas con vinagre por los piojos. Pero en la actualidad ya no se lavan con vinagre ya que éste no es muy potente porque los piojos se fortalecieron. Ahora empieza a hacer un esquema sobre como los piojos fueron cambiando. En el esquema representa a los piojos como una población. Habla sobre que actualmente los piojos son más potentes sobre el vinagre ya que uno nació con características que lo hacen más repelentes al vinagre.
<i>Texto y dibujo de Lautaro (resolvedor)</i>	
	

Rubén en su narración de la observación escribe que «En el esquema representa a los piojos como una población». Esta narración puede deberse a un análisis realizado por Rubén al observar las acciones de su compañero, o bien que Lautaro haya mencionado oralmente que iba a hacer un dibujo representando a los piojos como una población. Indistintamente de cuál sea el caso, cabe valorar que puedan explicitar la idea de población en el dibujo, cuestión que en el texto escrito parece no explicitarse.

En función de estos ejemplos, podemos considerar que el dibujo permite, por un lado, mostrar espacialmente la población y, por otro lado, representar la variabilidad que la constituye. Además, el dibujo nos permite entender cómo piensan que actúa la selección natural en relación con la variabilidad. Por ejemplo, en el caso de Susana se representa el proceso de supervivencia diferencial y por tanto de cambio en la proporción de individuos (representado por las cruces) a través del tiempo. En cambio, en el caso de Lautaro parecería que el proceso finaliza con una homogeneización de la población, en tanto que no aparecen variantes diferentes (todos los puntos son iguales). Así, ambos modos de representación (texto y dibujo) se entranan, son interdependientes uno de otro, comunicando distintos aspectos del modelo construido. El dibujo se constituye en un modo comunicativo que permite destacar ciertos elementos relevantes del modelo científico escolar que construyeron los estudiantes, como la idea de variabilidad de una población o la distribución espacial, lo cual sería difícil de realizar en un texto escrito u oralmente.

Con relación a la regulación de los OE pueden considerarse dos cuestiones. Por un lado, no aparece en la resolución de la actividad de estos estudiantes una regulación explícita del esencialismo. No obstante, podemos inferir que, dado el contexto en el que se realizó el dibujo, los estudiantes pueden haber regulado el esencialismo de manera implícita para lograr representar la variabilidad poblacional.

Ahondaremos en esto más adelante. Por otro lado, consideramos que, en el contexto de la enseñanza de los modelos evolutivos, los dibujos permitirían habilitar a los docentes la discusión explícita sobre el esencialismo en relación con el concepto de variabilidad, lo que suele ser una de las dificultades encontradas en el aprendizaje de la evolución (Álvarez Pérez, 2017; Gelman y Rhodes, 2012; González Galli y Meinardi, 2015).

El esquema como soporte que advierte sobre los obstáculos epistemológicos

Como hemos mencionado antes, para la realización de esta actividad los estudiantes tenían disponibles diversos materiales en los que podían apoyarse para resolver el problema planteado. Uno de ellos correspondía al esquema conceptual revisado. En este apartado presentaremos la solución al caso de los piojos de otro equipo de estudiantes: Fedra y Ciro; Alex y Bernardo. En este caso, Fedra utiliza el esquema para elaborar una explicación al caso de los piojos (rol de «resolverador»), mientras que su compañero Ciro ocupaba el rol del «observador». En la tabla 4 se encuentra la resolución en modo texto construida por Fedra, el registro de Ciro y una sección del esquema utilizado, que es de interés para el análisis. En la tabla 5 se muestra la solución al caso del calafate por Alex y Bernardo

Tabla 4.
Resolución de la actividad de pensamiento en voz alta de Fedra y Ciro

<i>Resolución (Fedra)</i>	<i>Observación (Ciro)</i>
Creo que el vinagre ya no tiene el mismo efecto porque los piojos evolucionaron. Lo hicieron porque: Piojos eran una población con variedad en sus características. Algunos no sobrevivían con el vinagre y a otros tardaban más en morir o no se morían. Estos últimos al tener seguramente además de esa característica favorable contra el vinagre, tenían características que hicieron que se reprodujeran con más efectividad que los otros piojos. Esto fue a través de las generaciones. Los piojos no decidieron este cambio pero les sirvió para mantener la especie. Esto fue una mutación genética, estos piojos eran de la misma especie pero con características diferentes que hicieron que evolucionaran.	Primero lee el problema. Lee el esquema y compara los piojos de los lobos. Cree que los piojos son una población con variedad en sus características. Piensa que algunos piojos no sobrevivían al vinagre y otros aguantaban más sobre los efectos del vinagre. Cree que la parte de generación de nuevas especies no sirve (habla del esquema). Piensa que los piojos con características más favorables se reprodujeron. Esto no fue un cambio pensado pero les sirvió para mantener la especie.
<i>Sección del esquema revisado</i> <pre> graph TD 1[1 Sin un propósito] --> 2[2 Un individuo cambia su pelaje] 2 --> A[Necesita adaptarse al ambiente (Para Caetano y Juani es verdad, para Florencia e Iván es no siempre)] 2 --> B[Se acostumbra al ambiente donde vive (Para Caetano y Juani es verdad, para Florencia e Iván es no siempre)] 2 --> C[Para mejorar. Algunas cosas son para mejorar y otras no (Ana no)] 2 --> D[Se reprodujeron con otro lobo de color más claro que hizo que las crías salieran con pelaje más blanco. Al ser esta característica favorable lograron sobrevivir y reproducirse más, aumentando la cantidad de lobos blancos en la población.] 2 --> E[ADN Acerca de los lobos podemos decir que de padre a hijo no todas las características son hereditarias como la posición social o la mandíbula] </pre>	

Tabla 5.
Resolución de la actividad de pensamiento en voz alta de Alex y Bernardo

<i>Resolución (Alex)</i>	<i>Observación (Bernardo)</i>
Sus ancestros no tenían espinas punzantes, pero ocurre una mutación al azar que le sirvió, pero no fue voluntaria e hizo que el arbusto tuviera espinas para defenderse de diversos animales obteniendo características ventajosas.	Piensa, tiene una idea pequeña pero se le complica al desarrollarla. Se olvida, se le complica. Piensa lo que se habló en clase de la mutación al azar. Escribe, se traba, piensa. Lee el diagrama, lo compara y escribe. Piensa un poco más para ver si le falta algo pero cree que no y finaliza
<i>Sección del esquema revisado</i>	
<pre>graph TD L[Lobos] --> T[Todos los lobos cambian su pelaje] T --> A[Ambiente/Hábitat/ Clima/Ecosistema nevado] T --> I[Un individuo cambia su pelaje] I --> M[Una mutación que les sirve, pero no es voluntaria] I --> C[Si un lobo marrón y un lobo blanco se cruzan, hay probabilidades de 50% y 50% de que la cría nazca marrón y/ blanca] A -.-> A Causa de M I -.-> A Causa de C</pre>	

El esquema, que contiene una explicación sobre la evolución de los lobos árticos, sirve a los estudiantes en dos sentidos. En primer lugar, como un análogo del nuevo problema que se intenta explicar. En el caso de Fedra (tabla 4), el esquema basado en el caso de la evolución de los lobos le sirve para dar una explicación al caso de los piojos. Así lo verbaliza en dos momentos registrados por Ciro: «Lee el esquema y compara el de los piojos con el de los lobos» y «Cree que la parte de generación de nuevas especies no sirve (habla del diagrama)». En el caso de Alex (tabla 5), el esquema le sirve para dar una explicación al caso del calafate. Allí, Bernardo registra que «Lee el diagrama, lo compara y escribe». En ambos casos la comparación sirve entonces para rescatar elementos teóricos útiles que permiten resolver el problema de los piojos y descartar otros elementos que no le servirían.

En segundo lugar, el esquema les sirve a los estudiantes para fomentar la atención sobre el obstáculo finalista. Al observar el esquema que se presenta en la tabla 4, en el punto (1) marcado, vemos que aparece escrito «un individuo cambia su pelaje sin un propósito», y en el punto (2) está tachada la expresión «Necesita adaptarse al ambiente». Ambos ítems pueden entenderse como expresiones de la regulación del obstáculo finalista, lo que parecería ser de ayuda para la construcción de la aclaración del final de la explicación de Fedra («Los piojos no decidieron este cambio pero les sirvió para mantener la especie. Esto fue una mutación genética»). Ella misma verbaliza «Esto no fue un cambio pensado», según registra Ciro. En el caso del equipo de Alex y Bernardo (tabla 5), ocurre algo similar. En el esquema se menciona que «una mutación que le sirve, pero no es voluntaria», y esta misma frase aparece nuevamente en la explicación construida por Alex para el caso del calafate.

Lograr identificar (y utilizar) la idea de que las mutaciones son al azar y que no están dirigidas por un fin es relevante en el aprendizaje del modelo de selección natural, tal como hemos indicado en el marco teórico. Interpretamos esto como una regulación del obstáculo finalista. La evidencia de esto es

que los estudiantes escriben una aclaración en su explicación, la cual alude directamente al OE, aunque lo hace de manera implícita ya que no nombra al finalismo como tal. No obstante, este señalamiento de carácter implícito del finalismo implicaría una consciencia sobre este OE. Hemos presentado, en otros trabajos, otros modos diferentes de regular (Pérez et al., 2021).

En función de estos ejemplos, y de otros que por espacio no podemos presentar, podemos indicar que el esquema, en esta actividad, podría funcionar activando caminos de recuperación (Salomon, 1993). Esto es, redirigiendo los modos de pensar de los estudiantes. Así, las «advertencias» escritas en el esquema conceptual («un individuo cambia su pelaje sin un propósito» o «una mutación que le sirve, pero no es voluntaria») sugerirían a quien lo lee prestar atención sobre el finalismo, lo que podría facilitar su regulación. Es importante destacar que la capacidad de regulación es propia de todas las personas, en este caso de Fedra o Alex, pero que la utilización de ciertos soportes como el esquema, ayudarían a que la regulación se lleve adelante.

El modo oral complementa al escrito posibilitando una regulación metacognitiva explícita

La actividad de pensamiento en voz alta obligaba a los estudiantes a comunicar sus ideas utilizando dos modos de comunicación distintos. Por un lado, el modo oral, cuando el «resolvedor» debía verbalizar de qué manera estaba construyendo su explicación. Por otro lado, el modo escrito en dos instancias, una de ellas cuando el «observador» registraba lo verbalizado (o actuado) por el «resolvedor» y otra de ellas cuando el «resolvedor» dejaba por escrito su explicación al caso.

Analizaremos aquí la resolución de la tarea llevada adelante por dos equipos. En la tabla 4 presentamos la resolución de Karina (rol de «resolvedor») y Agustina (rol de «observador»), mientras que en la tabla 5 presentamos la resolución de Amalia (rol de «resolvedor») y Lorena (rol de «observador»).

Tabla 6.
Resolución de la actividad de pensamiento en voz alta de Karina y Agustina

<i>Resolución (Karina)</i>	<i>Observación (Agustina)</i>
Había muchas plantas de calafate. A una de ellas le salió una espina y cuando los animales iban a comer sus bayas no lastimaban tanto a la planta. Lo que hizo que ésta se reprodujera más que las otras y al fin de varias generaciones todas tengan espinas.	Lee ambos y elige un problema. Pensando. Usa lo que ya sabe. Una hojita hizo ¡plop! Y se hizo «semi-espina». No sabe. Mira el diagrama y se queda pensando. No sabe si elegir el camino fácil que es el «con motivo». Razona. Pide ayuda a Alan. Piensa. Empieza a pensar en voz alta para razonar. Explica qué sucedía con las plantas. La hojita plop. Empieza de nuevo. Vuelve a mirar el diagrama. Habla sobre los animales con la planta. Hace un dibujo sobre la planta. Fin.

Tabla 7.
Resolución de la actividad de pensamiento en voz alta de Amalia y Lorena

<i>Resolución (Amalia)</i>	<i>Observación (Lorena)</i>
Al reproducirse estos piojos más tolerantes al vinagre (característica ventajosa al azar) lograron una población más. Simultáneamente se fueron produciendo productos para sacar piojos con más componentes y más potentes que el vinagre ya que los mataba al instante. Al ocurrir esto los piojos a través del tiempo fueron presentando mayor resistencia al vinagre lo cual no significa que hayan evolucionado para esto, sino que lo lograron a través de una característica ventajosa, la cual sería la «resistencia a los productos».	Lee la consigna. Dibuja y se trava. Se acuerda de los productos que se usan ahora y con los de antes. Anota la evolución de los piojos y como son ahora los productos para los piojos. Revisa lo que piensa. Tacha una palabra porque piensa que queda mejor dramáticamente. Agregar cosas porque considera que no cambian de un día para el otro. Borra porque dice que hizo un pensamiento con motivo. Pone otra conclusión de porque los piojos evolucionan y que lo fueron haciendo a través del tiempo. Resalta la palabra resistencia porque este es una de las características por lo cual lograron evolucionar más.

En los ejemplos presentados en las tablas 6 y 7, podemos inferir que la construcción de explicaciones en formato texto estuvo mediada por un proceso de regulación explícito. En el primer caso (tabla 6), de la observación realizada por Agustina podemos inferir que la construcción de la explicación de Karina estuvo mediada por un proceso de regulación explícito. Karina indicó verbalmente que no sabía qué camino elegir para resolver la actividad, distinguiendo un «camino fácil que es el “con motivo”» (etiqueta lingüística consensuada para el finalismo por el grupo-clase) de otro que correspondería a regular el finalismo. De esta manera, Karina muestra que es consciente de que existen dos caminos para resolver el problema, lo que permite inferir que la alumna construyó un conocimiento metacognitivo sobre el finalismo, asumiéndolo como un modo fácil de pensar. También resulta interesante que la estudiante muestre tener conciencia de que uno de los caminos resulta más «fácil» que el otro, ya que, en efecto, la explicación finalista, como parte del pensamiento intuitivo, requiere menos esfuerzo cognitivo que la alternativa basada en el modelo científico. Esto representa un conocimiento metacognitivo notablemente sofisticado, lo que evidencia la potencia de este tipo de actividades.

Por su parte, Amalia (tabla 7) escribe una explicación al caso de los piojos en la que podemos inferir que hay una regulación implícita del finalismo cuando indica «lo cual no significa que hayan evolucionado para esto». Sin embargo, podemos considerar que la escritura de esta aclaración estuvo atravesada por una regulación que fue explicitada oralmente. Esto último aparece en la observación que hace Lorena al indicar «Borra porque dice que hizo un pensamiento con motivo». Sobre este último caso, cabe reflexionar respecto del hecho de que muchas de las aclaraciones que realizan los estudiantes, que determinamos que corresponden a regulaciones de carácter implícito, podrían efectivamente serlas. Cuando «obligamos» a los estudiantes a verbalizar lo que piensan al construir la explicación, algunas regulaciones metacognitivas emergen de manera explícita.

En síntesis, utilizar el modo oral en esta actividad favoreció la expresión explícita de los procesos de regulación que subyacen a la construcción de una explicación. En el caso de Karina, su explicación no permite inferir procesos de regulación, a diferencia de la explicación de Amalia. En tal caso, consideramos que la utilización complementaria del modo oral podría dar al docente, y a quien ocupa el rol de observador, información sobre la manera en la que se construye la explicación. Los ejemplos planteados podrían ser un indicio de que ciertos procesos de regulación metacognitiva de los OE no aparecen en las explicaciones escritas de los estudiantes, no porque no estén ocurriendo sino porque tal vez están automatizados o no se percibe la necesidad de comunicarlos. Incluso esto podría estar ocurriendo en el primer ejemplo que presentamos, con el esencialismo.

En esta actividad concreta se obligaba a los estudiantes a comunicar los procesos de construcción de la explicación, lo que desembocó en una explicitación de la regulación que permitiría ser objeto de discusión para generar una retroalimentación positiva sobre esta (Veenman, 2012).

CONCLUSIONES E IMPLICANCIAS DIDÁCTICAS

En este trabajo nos preguntamos cuál era la relación entre los procesos de regulación metacognitiva de los OE y los distintos modos de representación de las explicaciones construidas por los estudiantes a partir de los modelos de evolución por selección natural y especiación alopátrica.

Encontramos que el lenguaje oral –en el marco de una actividad de pensamiento en voz alta– permite hacer explícitas algunas de las regulaciones metacognitivas de los estudiantes. Consideramos que estas explicitaciones, por parte de quien construye la explicación, pueden servir a los estudiantes que «observan» para retroalimentar sus propios modos de regular. En este sentido, y tal como mencionan diversos autores (Hartman, 2001; Monereo et al., 2012; Ritchhart et al., 2014), la explicitación oral no solo daría transparencia al modo de construcción de las explicaciones de un sujeto –ayudándolo a que se haga consciente de cómo piensa–, sino que además serviría a modo de ejemplo para sus compañeros.

Por su parte, el esquema conceptual, que los estudiantes han revisado en el transcurso de la secuencia didáctica, se constituye en un soporte simbólico para algunas «advertencias» sobre los OE, que pueden ser utilizadas para regular los obstáculos en el momento de construir una explicación. Podríamos decir que funcionan como «camino de recuperación» (Salomon, 1993), en el sentido de que las frases escritas en el esquema les recuerdan a los estudiantes la atención que deben tener sobre ciertos OE, lo que a su vez funcionaría apoyando la construcción de la explicación. En estos casos, las frases que encontramos en los esquemas podrían no hacer alusión explícita al OE (no utilizar la etiqueta lingüística consensuada con el grupo-clase), sino ser un señalamiento o una aclaración que remite directamente al OE sin nombrarlo de manera explícita.

Por último, el dibujo permite representar la dimensión poblacional del proceso evolutivo y, más específicamente, facilita la idea de variabilidad en una población, así como el dinamismo del cambio evolutivo. Estas dos cuestiones son fundamentales para el aprendizaje de los modelos de la biología evolutiva, ya que se trata de dificultades reconocidas en la investigación para el aprendizaje de dichos modelos (Berzal de Pedrazzini y Barberá, 1993; Jiménez Tejada, 2012). En relación con la regulación, consideramos que este modo de comunicación puede ser útil en el abordaje del esencialismo, ya que permite a los estudiantes representar de manera diferente a los individuos y no como un conjunto de seres homogéneos. Sin embargo, en los dibujos analizados no aparecen regulaciones explícitas de ninguno de los OE, lo que puede deberse a la dificultad de explicitar las regulaciones en este formato o porque estas se encuentran automatizadas.

Consideramos fundamental destacar que se recurre escasamente a los dibujos en las aulas tradicionales de nivel medio, debido a que factores sociales, culturales e históricos los han dotado de un sentido que parecería no tener espacio en las clases como modos de construir significados (Kress et al., 2001; Kress, 2010). En nuestra propuesta, el dibujo se integra en la cultura del aula durante la secuencia didáctica, en un principio, de manera obligatoria. Sin embargo, es destacable que a medida que se avanza, los estudiantes construyen explicaciones multimodales integrando espontáneamente dibujos y texto. Es su decisión seleccionar y utilizar diversos modos de representación para comunicar una explicación. Siguiendo a Kress (2010), la utilización del dibujo resultó del moldeado social dentro de estas aulas específicamente y de la propia historia dentro de la secuencia didáctica.

En conclusión, sugerimos que usar varios modos comunicativos puede favorecer la regulación de los OE de distintas maneras. Más específicamente, siguiendo a Oh y Oh (2011), cabe recalcar que de la misma manera en que cada modo permite representar solo algunos elementos del modelo científico, también permitirá la discusión de ciertos OE, o de ciertos aspectos de un OE, y no de otros. Como mencionamos, el dibujo, por ejemplo, permitirá más fácilmente abordar el esencialismo, que quizás otro modo de comunicación.

REFERENCIAS

- Álvarez Pérez, E. (2017). Enseñas en el camino de aprendizaje de biología evolutiva: fundamentos, propuesta y resultados. *Enseñanza de las Ciencias*, Número Extra, 1717-1722.
- Astolfi, J. P. (2003). *Aprender en la escuela* (2.^a ed.). Chile: Comunicaciones Noreste Ltda.
- Astolfi, J. y Peterfalvi, B. (2001). Estrategias para trabajar los obstáculos: dispositivos y resortes. En Camilloni, A. (comp.), *Los obstáculos epistemológicos en la enseñanza* (pp. 191-223). Barcelona.
- Berzal de Pedrazzini, M. y Barberá, O. (1993). Ideas sobre el concepto biológico de población. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(2), 149-159.
- <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4530>

- Coley, J. y Muratore, T. (2012). Trees, Fish, and Other Fictions. Folk biological thought and its implications for understanding evolutionary biology. En K. Rosengren, S. Brem, E. Evans y G. Sinatra (eds.), *Evolution Challenges. Integrating research and practice in teaching and learning about evolution* (pp. 22-46). Oxford University Press.
- Creswell, J. (2012). *Educational research. Planning, conducting, and evaluating quantitative and qualitative research*. Pearson.
- De Vecchi, G. y Giordan, A. (2006). *Guía práctica para la enseñanza científica*. Díada Editorial.
- Flick, U. (2007). *Introducción a la investigación cualitativa*. Morata.
- Futuyma, D. (2009). *Evolution*. Sinauer.
- Gelman, S. y Rhodes, M. (2012). Two-Thousand Years of Stasis. How psychological essentialism impedes evolutionary understanding. En K. Rosengren, S. Brem, E. Evans y G. Sinatra (eds.), *Evolution Challenges. Integrating research and practice in teaching and learning about evolution* (pp. 3-21). Oxford University Press.
- Gómez Galindo, A. (2008). Construcción de explicaciones multimodales: ¿Qué aportan los diversos registros semióticos? *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, 4(2), 83-99.
- Gómez Galindo, A. (2013). Explicaciones narrativas y modelización en la enseñanza de la biología. *Enseñanza de las Ciencias*, 31(1), 11-28.
- Gómez Crespo, M. A. (2017). *¿Por qué enseño como enseño? Tres actividades para aprender Ciencias*. Madrid: Morata.
- Gómez Llombart, V. y Gavidia Catalán, V. (2015). Describir y dibujar en ciencias. La importancia del dibujo en las representaciones mentales del alumnado. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 12(3), 441-455.
http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2015.v12.i3.04
- González Galli, L. y Meinardi, E. (2015). Obstáculos para el aprendizaje del modelo de evolución por selección natural, en estudiantes de escuela secundaria de Argentina. *Ciência & Educação*, 21(1), 101-122.
<https://doi.org/10.1590/1516-731320150010007>
- González Galli, L., Pérez, G., Alegre, C. y Joelson, S. (2018). Explicaciones, concepciones y obstáculos sobre el origen de las especies en estudiantes de Escuela Secundaria de Argentina. *Ciência & Educação*, 24(3), 741-758.
<https://doi.org/10.1590/1516-731320180030013>
- Gresch, H. (2020). Teleological explanations in evolution classes: video-based analyses of teaching and learning processes across a seventh-grade teaching unit. *Evo Edu Outreach*, 13(10).
<https://doi.org/10.1186/s12052-020-00125-9>
- Hartman, H. (2001). Developing students' metacognitive knowledge and skills. En H. Hartman (ed.), *Metacognition in learning and instruction. Theory, research and practice* (pp. 33-68). Springer.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Luciano, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6.ª edición). McGraw Hill.
- Inagaki, K. y Hatano, G. (2006). Young children's conception of the biological world. *Current Directions in Psychological Science*, 15(4), 177-181.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2006.00431.x>
- Izquierdo Aymerich, M., Márquez, C. y Espinet, M. (2003). Comunicación multimodal en la clase de ciencias: el ciclo del agua. *Enseñanza de las ciencias*, 21(3), 371-386.
<http://dx.doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3915>
- Izquierdo, M. (2014). Los modelos teóricos en la enseñanza de las «ciencias para todos» (ESO, nivel secundario). *Bio-grafía - Escritos sobre la Biología y su enseñanza*, 7(13), 69-85.
<https://doi.org/10.17227/20271034.vol.7num.13bio-grafia69.85>

- Jaipal, K. (2010). Meaning making through multiple modalities in a biology classroom: A multimodal semiotics discourse analysis. *Science Education*, 94(1), 48-72.
<http://dx.doi.org/10.1002/sce.20359>
- Jewitt, C. (2014). *The Routledge Handbook of Multimodal Analysis* (2.^a ed.). Routledge.
- Jiménez Aleixandre, M. P. (2002). Aplicar la idea de cambio biológico: ¿por qué hemos perdido olfato? *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 9(32), 48-55.
- Jiménez Tejada, M. (2012). Los conceptos de población y de especie en la enseñanza de la biología: concepciones, dificultades y perspectivas. *Enseñanza de las Ciencias*, 30(2), 243-246.
<http://dx.doi.org/10.5565/rev/ec/v30n2.773>
- Johsua, S. y Dupin, J. (2005). *Introducción a la didáctica de las ciencias y la matemática*. Colihue.
- Kress, G. (2010). *Multimodality. A social semiotic approach to contemporary communication*. Routledge.
- Kress, G., Jewitt, C., Ogborn, J. y Tsatsarelis, C. (2001). *Multimodal teaching and learning: the rhetorics of the science classroom*. Continuum.
- Márquez, C. (2002). Dibujar en clase de ciencias. *Aula de Innovación educativa*, 117, 54-57.
- Márquez, C., Izquierdo, M. y Espinet, M. (2006). Multimodal science teachers' discourse in modeling the water cycle. *Science Education*, 90(2), 202-226.
<http://dx.doi.org/10.1002/sce.20100>
- Monereo, C., Castelló, M., Clariana, M., Palma, M. y Pérez, M. (2012). *Estrategias de enseñanza y aprendizaje* (2.^a ed.). Grao.
- Oh, P. S. y Oh, S. J. (2011). What teachers of science need to know about models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109-1130.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2010.502191>
- Pérez, G. (2020). *La regulación metacognitiva de los obstáculos epistemológicos en la construcción de modelos de biología evolutiva en la escuela media* [Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales]. http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6792_Perez
- Pérez, G., Gómez Galindo, A. A. y González Galli, L. (2018). Enseñanza de la evolución: fundamentos para el diseño de una propuesta didáctica basada en la modelización y la metacognición sobre los obstáculos epistemológicos. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 15(2), 2102.
https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2018.v15.i2.2102
- Pérez, G., Gómez Galindo, A. y González Galli, L. (2021). La regulación de los obstáculos epistemológicos en la enseñanza y el aprendizaje de la evolución. *Enseñanza de las Ciencias*, 39(1), 27-44.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2968>
- Pérez, G., Gómez Galindo, A. y González Galli, L. (2022). Metacognitive Regulation of Essentialism in the Teaching of Evolution. *Interdisciplinary Journal of Environmental and Science Education*, 18(4), e2295.
<https://doi.org/10.21601/ijese/12223>
- Peterfalvi, B. (2001). Identificación de los obstáculos por parte de los alumnos. En Camilloni, A. (Comp.), *Los obstáculos epistemológicos en la enseñanza* (pp. 127-168). Barcelona: Gedisa.
- Ritchhart, R., Church, M. y Morrison, K. (2014). *Hacer visible el pensamiento*. Paidós.
- Ronfard, S., Brown, S., Doncaster, E. y Kelemen, D. (2021). Inhibiting intuition: Scaffolding children's theory construction about species evolution in the face of competing explanations. *Cognition*, 211.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104635>
- Salomon, G. (1993). *Cogniciones distribuidas. Consideraciones psicológicas y educativas*. Amorrortu.
- Sanmartí, N. (2002). *Didáctica de las ciencias en la educación secundaria obligatoria*. Síntesis.

- Silva, H., Peñaloza, G., Michaels, R. y Carvalho, G. (2021). Teleological vs. Scientific views of evolution theory among high school biology teachers in Argentina, Brazil, and Uruguay. *Jurnal Bioedukatika*, 9(2), 61-74.
<https://doi.org/10.26555/bioedukatika.v9i2.20715>
- Stamos, D. (2008). *Evolución. Los grandes temas: sexo, raza, feminismo, religión y otras cuestiones*. Biblioteca Buridán.
- Tamayo Alzate, O. (2006). Representaciones semióticas y evolución conceptual en la enseñanza de las ciencias y las matemáticas. *Educación y Pedagogía*, 18(45), 37-49.
- Veenman, M. (2012). *Metacognition in Science Education: Definitions, Constituents and Their Intricate Relation with Cognition*. En A. Zohar y Y Dori. (eds.), *Metacognition in Science Education. Trends in Current Research* (pp. 21-36). Springer.
- Werth, A. y Allchin, D. (2020). Teleology's long shadow. *Evolution: Education and Outreach*, 13(1), 1-11.
<https://doi.org/10.1186/s12052-020-00118-8>
- Wilkins, J. (2013). Biological Essentialism and the Tidal Change of Natural Kinds. *Science & Education*, 22, 221-240.
<https://doi.org/10.1007/s11191-012-9450-z>
- Wingert, J. y Hale, R. (2021). Teaching evolutionary principles in health promotion: A pilot study. *Pedagogy in Health Promotion*, 7(1), 60-70.
<https://doi.org/10.1177%2F2373379920908611>

Multimodality and Metacognitive Regulation in Learning Evolution

Gastón Pérez

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Buenos Aires. Argentina.

Instituto de investigaciones CeFIEC. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Argentina.

gastonperez@ccpems.exactas.uba.ar

Alma Adrianna Gómez Galindo

Cinvestav Monterrey, México.

agomez@cinvestav.mx

Leonardo González Galli

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Buenos Aires. Argentina.

Instituto de investigaciones CeFIEC. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Argentina.

leomgalli@gmail.com

In this article we explore the relationship between the metacognitive regulation of epistemological obstacles and the different modes of representation of the explanations constructed by the students from the models of evolution by natural selection and allopatric speciation. Epistemological obstacles are ways of reasoning that subjects have, which are not eliminable, so it is proposed to develop in students the ability to regulate them metacognitively when learning or using a scientific model. Examples of these obstacles are teleology or essentialism. Carrying out a multimodal analysis, we analyze the regulations of these epistemological obstacles made by students of secondary education in the framework of a didactic sequence to teach evolutionary models. We found that oral language makes it possible the explicitation of some of the students' metacognitive regulations, which can help other students to feedback their own ways of regulating. On the other hand, conceptual schemes can function as a symbolic support for some "warnings" about epistemological obstacles, which can be used to regulate them when building an explanation. Finally, the drawings allow students to represent the population dimension of the evolutionary process and, more specifically, the idea of variability in a population, which can be useful in the regulation of essentialism. In summary, we suggest that using various communicative modes can favor the regulation of epistemological obstacles in different ways. More specifically, in the same way that each mode of communication allows only some elements of the scientific model to be represented, it will also allow discussion of certain aspects of epistemological obstacles and not others.



Integración de la ingeniería en la educación científico-tecnológica desde un prisma CTS

Integration of Engineering in Science and Technology Education from an STS Perspective

Antonio García-Carmona

Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, Universidad de Sevilla, España.
garcia-carmona@us.es • <https://orcid.org/0000-0001-5952-0340>

RESUMEN • Presentamos un análisis crítico sobre la integración de la ingeniería en propuestas curriculares del ámbito científico-tecnológico, auspiciada por el movimiento educativo STEM. Para ello, revisamos las principales perspectivas y planteamientos que se están haciendo al respecto. A continuación, analizamos qué novedad supone introducir explícitamente la ingeniería en el tradicional currículo de tecnología en España. Luego, examinamos bibliografía relevante sobre el tema para determinar qué relaciones podrían establecerse entre la tecnología y la ingeniería. Finalmente, hacemos una propuesta de conceptualización de estas dos disciplinas, incluyendo sus relaciones con la ciencia, que sintoniza con el marco de la educación CTS, y que puede servir de referente en diseños didácticos de integración curricular para el ámbito científico-tecnológico.

PALABRAS CLAVE: Ámbito científico-tecnológico; Educación CTS; Educación STEM; Ingeniería; Tecnología.

ABSTRACT • We present a critical analysis of the integration of engineering in curricular proposals for science and technology education, sponsored by the STEM educational movement. To this end, we revise the main perspectives and approaches considered in this regard. Next, we analyse what novelty it means to explicitly introduce engineering into the traditional curriculum for technology education in Spain. Then, we review relevant literature on the topic to determine which relationships could be established between technology and engineering. Finally, we make a proposal for the conceptualization of these two disciplines, including their relationships with science, which is in line with the educational framework of STS and can serve as a benchmark in didactic designs for curricular integration in science and technology education.

KEYWORDS: Scientific-technological domain; STS education; STEM education; Engineering; Technology.

Recepción: enero 2022 • Aceptación: octubre 2022 • Publicación: marzo 2023

García-Carmona, A. (2023). Integración de la ingeniería en la educación científico-tecnológica desde un prisma CTS. *Enseñanza de las Ciencias*, 41(1), 25-41.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5611>

Si la actividad de diseño está muy valorada en el discurso, la ingeniería en la práctica incluye también y sobre todo actividades menos prestigiosas que, sin embargo, son decisivas [...]: mantenimiento, planificación, organización y respuestas a imprevistos.

(Vinck, 2014, p. 235, traducción propia)

INTRODUCCIÓN

En trabajos anteriores hemos analizado la llegada del movimiento STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*) a nuestro contexto educativo (García-Carmona, 2020a; Toma y García-Carmona, 2021). Concluimos que su acogida se está haciendo de forma acrítica y mediante una política de *hechos consumados* que, previsiblemente, no favorecerá la implantación generalizada y efectiva de un enfoque STEM¹ auténtico en las aulas. Para sostener esto, esgrimimos argumentos epistemológicos, ontológicos, didácticos, curriculares y basados en resultados de investigación; los cuales no vamos a reproducir aquí por razones de espacio, pero podríamos sintetizarlos diciendo que, en el impulso de la educación STEM, parece obviarse que *no es posible tener leche de vaca sin vacas*².

El problema es que esa acogida acrítica está propiciando que muchas propuestas educativas sean etiquetadas como STEM por el mero hecho de ser –continuando con la metáfora– «líquidos blanquecinos»; lo que no hace más que desvirtuar este enfoque. Si bien no vamos a detenernos tampoco en señalar los motivos y las consecuencias de ello en el ámbito de la educación científico-tecnológica (García-Carmona, 2020a). Asumimos que STEM es un movimiento educativo de enorme influencia cuyos designios, aunque controvertidos, han venido para quedarse. Tanto es así que el nuevo currículo para la educación básica establece la *competencia STEM* como una de las ocho competencias clave (Real Decreto 217/2022). De modo que ello obliga a seguir profundizando en el análisis de aquellos aspectos más peliagudos de la educación STEM, con vistas a dilucidar cómo podría bosquejarse su implementación en las aulas apropiadamente.

Uno de esos aspectos es la atención explícita a la *ingeniería* en la educación científico-tecnológica, y más concretamente a las *prácticas* que desempeñan las personas dedicadas a esta disciplina (National Research Council [NRC], 2012). La ingeniería se añade a la *tecnología*, una disciplina cercana a ella desde un punto de vista epistemológico y ontológico, que constituye un área curricular con gran tradición en la mayoría de los sistemas educativos del mundo (De Vries, 2018). Y sucede que los intentos de integrar la ingeniería con la tecnología en propuestas educativas STEM, tratando de visibilizar cada una de ellas, suelen tener como resultado aproximaciones bastante limitadas de ambas; pero, sobre todo, de la tecnología. Efectivamente, se manejan conceptualizaciones *reduccionistas* que confieren a la tecnología un estatus de cierta inferioridad con respecto a la ingeniería. Recuerda a lo que ya sucediera entre la ciencia y la tecnología en determinadas interpretaciones de la educación CTS (*Ciencia-Tecnología-Sociedad*), donde la tecnología era reducida a «ciencia aplicada» (Acevedo-Díaz, 1998; Buch, 2003). Una concepción que, además de errónea (Bunge, 2016), inducía a pensar en la tecnología como una disciplina subordinada o subsumida en la ciencia (Layton, 1988).

Pese a la importancia del tema, consideramos que no está siendo objeto de suficiente discusión en el ámbito de la educación científico-tecnológica. Pero ¿es apropiado admitir concepciones simplistas de la tecnología en propuestas curriculares donde se integra con la ingeniería? ¿Qué planteamientos suscitan esa simplificación conceptual de la tecnología con respecto a la ingeniería? Asimismo, ¿cuál es realmente la nueva aportación de la ingeniería al tradicional ámbito curricular científico-tecnológico? Por otra par-

1. Integración de varias de las materias curriculares que componen el acrónimo en una misma situación de aprendizaje.

2. Metáfora usada por Mario Bunge en su crítica al utilitarismo de los economistas neoclásicos y estadistas «miopes» sobre el peligro que enfrenta la tecnología, si no se apoya a las ciencias básicas (Raynaud, 2018, p. 14).

te, si la tecnología y la ingeniería deben visibilizarse en propuestas de integración curricular del ámbito científico-tecnológico, ¿qué aspectos y relaciones entre ciencia, tecnología e ingeniería podrían manejarse? La finalidad de este artículo es ofrecer algunas respuestas a estas preguntas, sin duda, complejas, apoyándonos para ello en planteamientos y perspectivas concordantes con marcos teóricos del enfoque CTS.

OBSTÁCULOS PARA LA INTEGRACIÓN DIDÁCTICA ENTRE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Tradicionalmente, la integración de la tecnología en la educación científica ha sido un asunto espinoso de resolver (Acevedo-Díaz, 1998; Layton, 1988; Maiztegui et al., 2002). Sin embargo, con el movimiento educativo STEM no solo no se ha avanzado en este propósito (García-Carmona, 2020a; Pleasants et al., 2019), sino que se ha complicado aún más por el agregado de la *ingeniería*.

Por ejemplo, Ring-Whalen et al. (2018) analizaron el proceso de diseño de unidades de STEM integrado, en una muestra de 21 profesores de ciencias preuniversitarios estadounidenses. Encontraron que la mayoría de los profesores integraba la ingeniería con relativa facilidad, mediante procesos de diseño ingenieril usados como contextos para el aprendizaje de contenidos de ciencias. En cambio, la tecnología supuso para algunos profesores una *pieza misteriosa* difícil de determinar y encajar en el diseño integrado de las unidades.

También se observan dificultades en el análisis de documentos educativos enmarcados en STEM. Por ejemplo, Park et al. (2020), al analizar la naturaleza de STEM en documentos curriculares de EE. UU., Corea y Taiwán, decidieron considerar la ingeniería y la tecnología como un único campo, argumentando que la línea entre ellas es *fluida*. Similarmente, Daugherty et al. (2014) se refieren a la tecnología y la ingeniería como un todo indisoluble con la expresión «educación en tecnología e ingeniería», al reflexionar sobre el papel de estas en la educación STEM. Kim y Song (2021) hacen algo parecido cuando analizan las concepciones de profesorado coreano sobre la naturaleza de la tecnología e ingeniería, usando «NOTE» (Nature of Technology and Engineering) como acrónimo unificador de ambas disciplinas.

Otros autores llegan aún más lejos y plantean prescindir directamente de una de esas dos disciplinas en el enfoque educativo STEM. Por ejemplo, McComas y Burgin (2020) proponen eliminar la «T» del acrónimo (sería «SEM», en tal caso) para favorecer su desarrollo en el aula, aduciendo la estrecha relación entre tecnología e ingeniería y –según ellos– la falta de estatus disciplinario de la tecnología frente a la ingeniería. Realmente, no entendemos este último argumento, a la vista de la bibliografía existente sobre la tecnología como disciplina académica y profesional (e.g., Acevedo-Díaz, 1998; Raynaud, 2018), además de como área curricular asentada en el ámbito educativo preuniversitario de la mayoría de los países (De Vries, 2018).

Lo anterior es solo una muestra de trabajos en los que se vislumbran dificultades para distinguir entre ingeniería y tecnología. En numerosas propuestas de educación STEM, la cuestión se resuelve concibiendo la tecnología como un *recurso* o *herramienta* (generalmente, *tecnologías de la información y comunicación*, y otras *aplicaciones* software) para facilitar el desarrollo de actividades enmarcadas en este enfoque educativo (Churi et al., 2021; Dogan y Robin, 2015; Ellis et al., 2020). Si bien, esto constituye una concepción simplista y, por tanto, *distorsionada* de la tecnología (Sanders, 2009). Como se verá después, la tecnología es un campo del saber humano mucho más amplio y holístico que esa simple idea.

Otra concepción bastante extendida es la de tecnología como *producto* o *resultado* de la ingeniería (Ellis et al., 2020). Lo cuestionable no es que esta sea una de las acepciones de tecnología, sino la limitación que supone restringirla a esa sola, tratándose de toda una disciplina académica (Acevedo, 1998;

Raynaud, 2018). Es como si redujéramos la ciencia a su producto final: el conocimiento científico. Sin embargo, nadie discute que la ciencia es, a la vez, un conjunto de conocimientos, un modo de conocer y una relación de procesos/métodos (Bell, 2009), cuyo desarrollo está íntimamente ligado a las circunstancias socioculturales de cada época (García-Carmona y Acevedo, 2018).

Entonces, ¿qué puede justificar que la concepción de tecnología sea reducida al producto o el resultado de la ingeniería en propuestas educativas de integración de ambas? Ciertamente es difícil saberlo, aunque podemos apuntar dos posibles razones a modo de conjeturas. Una es la *inercia* provocada por la necesidad de dar visibilidad y protagonismo a la ingeniería (NRC, 2012) que, hasta hace muy poco, era una disciplina desatendida –al menos, explícitamente– en los planes y las propuestas curriculares del ámbito científico-tecnológico. Prueba de esto es lo que Bybee³ (2011) escribió poco antes de la publicación de los últimos estándares nacionales para la enseñanza de las ciencias en EE. UU. (NRC, 2012), con relación a la educación en ingeniería:

[...] la verdad es que el acrónimo suele referirse a la ciencia o a las matemáticas, o a ambas. Rara vez se refiere a la tecnología y casi nunca incluye la ingeniería. Aunque la nación está preocupada por la educación STEM, la «T» es solo ligeramente visible y la «E», invisible. Una gran oportunidad para los estándares de educación en ingeniería es hacer visible la «E» en la educación STEM (Bybee, 2011, p. 26; traducción propia).

De manera que, en un afán por dar mayor protagonismo a la ingeniería en la educación STEM, y dada su gran proximidad a la tecnología, muchos rasgos o elementos característicos de esta última han sido ahora atribuidos a la ingeniería (véase, por ejemplo, Quellmalz, 2015). Lo cual se ha traducido, inevitablemente, en una merma de la noción de tecnología.

La otra razón posible, aunque ligada a la anterior, es que muchas propuestas educativas para un STEM integrado sitúan la ingeniería en el centro de estas; incluso cuando la integración se hace con solo dos de las disciplinas del acrónimo (Roehrig et al., 2021). De hecho, para Quinn et al. (2020) la ingeniería es la disciplina que mejor representaría la naturaleza integrada de STEM. Por tanto, la atribución a la tecnología de un estatus más desarrollado y ontológicamente similar al de la ingeniería supondría una *amenaza* para los cimientos de este marco de educación STEM. Sin embargo, la propuesta de *centralidad* de la ingeniería, en la integración disciplinar auspiciada por la educación STEM, genera dudas más que razonables en contextos educativos donde el ámbito curricular científico-tecnológico está conformado por materias de ciencias, matemáticas y tecnología; pero ninguna bajo la denominación de ingeniería.

QUÉ APORTA LA INGENIERÍA AL TRADICIONAL ÁMBITO CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO

La propuesta más conocida sobre la integración de la ingeniería en la educación científico-tecnológica es la establecida en el documento estadounidense *A Framework for K-12 Science Education* (NRC, 2012). Esta se concreta en que los estudiantes participen en las *prácticas de ingeniería* enumeradas en la tabla 1. No obstante, según esta propuesta, solo las prácticas 1 (*Definir problemas*) y 6 (*Diseñar soluciones*) son consideradas exclusivas de la ingeniería; las restantes se asumen indistintamente como prácticas de la ciencia y de la ingeniería, aunque luego esas prácticas se matizan para cada una de estas disciplinas. Además, las prácticas sugeridas en este documento poseen un marcado cariz *epistémico*, des- cuidándose así la *vertiente sociológica* de la actividad científico-tecnológica (García-Carmona, 2021b).

3. Conviene saber que Rodger Bybee fue uno de los académicos que lideraron la elaboración del documento *A Framework for K-12 Science Education* (NRC, 2012).

Tabla 1.
Prácticas de ingeniería propuestas en el documento
A Framework for K-12 Science Education
(NRC, 2012, p. 3; traducción propia)

- | |
|---|
| 1. Definir problemas |
| 2. Desarrollar y usar modelos |
| 3. Planificar y realizar investigaciones |
| 4. Analizar e interpretar datos |
| 5. Usar pensamiento matemático y computacional |
| 6. Diseñar soluciones |
| 7. Participar en la argumentación a partir de pruebas |
| 8. Obtener, evaluar y comunicar información |

En el contexto educativo español, el área curricular de tecnología se implantó a principios de los noventa con la LOGSE⁴. Ya entonces, muchas de las prácticas de ingeniería, antes citadas, se contemplaban de alguna manera en los objetivos generales de esta área (Real Decreto 1007/1991), solo que no eran etiquetadas como *prácticas*, sino como *capacidades* que desarrollar por el alumnado. Se hacía referencia, por ejemplo, a abordar problemas tecnológicos; diseñar y construir objetos; planificar proyectos; comunicar ideas y decisiones adoptadas; evaluar la idoneidad de los diseños desde diferentes puntos de vista; etc. Incluso se iba más lejos en determinados aspectos, con una atención expresa a la creatividad, organización, idoneidad, viabilidad, funcionalidad y gestión de recursos. Asimismo, se incluía la *dimensión sociológica* del desarrollo científico-tecnológico. Lo único que no hacía esta propuesta curricular era mencionar explícitamente la ingeniería. Todo esto puede comprobarse en la tabla 2.

Con la LOGSE se dio impulso también a la idea de *currículo integrado* y la *organización curricular en ámbitos* (García Rubio, 2018), que sugiere, entre otras, la posibilidad de integrar las áreas de ciencias, matemáticas y tecnología en un ámbito comúnmente llamado *científico-tecnológico*. En la propia propuesta de objetivos para el área de tecnología (tabla 2) se hace mención a ello (véase el objetivo 5).

4. Ley Orgánica 1/1990, de 3 de octubre, de Ordenación General del Sistema Educativo.

Tabla 2.
Objetivos generales para el área de tecnología
en el marco de la LOGSE (Real Decreto 1007/1991, Anexo I, pp. 74-75)

1. **Abordar con autonomía y creatividad problemas tecnológicos sencillos trabajando de forma ordenada y metódica para estudiar el problema, seleccionar y elaborar la documentación pertinente, concebir, diseñar y construir objetos o mecanismos que faciliten la resolución del problema estudiado y evaluar su idoneidad desde diversos puntos de vista.**
2. Analizar objetos y sistemas para **comprender** su funcionamiento, **la mejor forma de usarlos y controlarlos y las razones que han intervenido en las decisiones tomadas en su diseño y construcción.**
3. Planificar la ejecución de proyectos tecnológicos sencillos, anticipando los recursos materiales y humanos necesarios, seleccionando y elaborando la documentación necesaria para organizar y gestionar su desarrollo.
4. Expresar y comunicar las ideas y decisiones adoptadas en el transcurso de la realización de proyectos sencillos, así como explorar su viabilidad y alcance utilizando los recursos gráficos, la simbología y el vocabulario adecuado.
5. Utilizar en la realización de proyectos tecnológicos sencillos los conceptos y habilidades adquiridos en otras áreas, valorando su funcionalidad y multiplicidad de perspectivas y saberes que convergen en la satisfacción de las necesidades humanas.
6. *Mantener una actitud de indagación y curiosidad hacia los elementos y problemas tecnológicos, analizando y valorando los efectos positivos y negativos de las aplicaciones de la ciencia y de la tecnología en la calidad de vida y su influencia en los valores morales y culturales vigentes.*
7. Valorar la **importancia de trabajar como miembro de un equipo en la resolución de problemas tecnológicos**, asumiendo sus responsabilidades individuales en la ejecución de las tareas encomendadas con actitud de cooperación, tolerancia y solidaridad.
8. *Analizar y valorar críticamente el impacto del desarrollo científico y tecnológico en la evolución social y técnica del trabajo, así como en la organización del tiempo libre y en las actividades de ocio.*
9. *Analizar y valorar críticamente los efectos que sobre la salud y seguridad personal y colectiva tiene el respeto de las normas de seguridad e higiene, contribuyendo activamente al orden y a la consecución de un ambiente agradable en su entorno.*
10. *Valorar los sentimientos de satisfacción y disfrute producidos por la habilidad para resolver problemas que le permiten perseverar en el esfuerzo, superar las dificultades propias del proceso y contribuir, de este modo, al bienestar personal y colectivo.*

* Nota: Se resalta en **negrita** aquello que puede relacionarse con las prácticas de ingeniería, y en *cursiva*, lo relativo a la sociología de la tecnología.

Tres lustros después, se pondría en marcha la LOE⁵, en cuyas disposiciones curriculares (Real Decreto 1631/2006) se establecían prácticamente los mismos objetivos para el área de tecnología que en la LOGSE, por lo que no los vamos a reproducir⁶. Años más tarde entraría en vigor otra reforma curricular (Real Decreto 1105/2014) tras la puesta en marcha de la LOMCE⁷. Esta reforma del currículo no proponía objetivos generales para las materias, sino estándares de aprendizaje ligados a los distintos bloques de contenidos. Al revisar, por ejemplo, estos estándares en la concreción de la LOMCE para la Comunidad Autónoma de Andalucía (Orden de 14 de julio de 2016), se halla que la materia de tecnología para la ESO conservaba gran parte de los objetivos establecidos en las leyes precedentes. Asimismo, incorporaba el *Diseño Asistido por Ordenador* como una de las novedades más destacables.

5. Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación.

6. Con la LOE se introdujeron las *competencias básicas*; entre ellas, la *competencia matemática* y la *competencia en el conocimiento y la interacción con el mundo físico*, que integraba tímidamente la tecnología. A partir de la LOMCE, la *competencia matemática* y *competencias básicas en ciencia y tecnología* constituyen un solo bloque competencial.

7. Ley Orgánica 8/2013, de 9 de diciembre, para la mejora de la calidad educativa.

LA INGENIERÍA EN EL MARCO DE LA LOMLOE

No ha sido hasta la actual reforma curricular (Real Decreto 217/2022), derivada de la implantación de la LOMLOE⁸, cuando se ha empezado a hablar de *ingeniería*. Aunque su introducción es bastante general y parca. En la descripción de *la competencia STEM* se dice:

La competencia en matemática y competencia en ciencia, tecnología e ingeniería (competencia STEM por sus siglas en inglés) entraña la comprensión del mundo utilizando los métodos científicos, el pensamiento y representación matemáticos, la tecnología y los métodos de la ingeniería para transformar el entorno de forma comprometida, responsable y sostenible (Real Decreto 217/2022, p. 41.598).

No sabemos a qué se refiere el currículo con *los métodos de la ingeniería*. Asimismo, no se hace mención alguna a la ingeniería en los cinco descriptores operativos de la competencia STEM (Real Decreto 217/2022, pp. 41.599-41.600), solo a conocimientos y procedimientos/métodos científicos, matemáticos y tecnológicos. No obstante, resulta llamativo encontrar en el currículo de Biología y Geología, como algo aislado en la amplia prescripción de las materias del ámbito científico-tecnológico, el indicador competencial siguiente: «Analizar y explicar fenómenos biológicos y geológicos representándolos mediante modelos y diagramas, utilizando, cuando sea necesario, los pasos del diseño de ingeniería (identificación del problema, exploración, diseño, creación, evaluación y mejora)» (Real Decreto 217/2022, pp. 41.610 y 41.613). En nuestra opinión, es una mención forzada y poco precisa de la ingeniería. En primer lugar, porque es debatible que esos *pasos* sean propios o exclusivos de la ingeniería. Debería haberse concretado cuál es la naturaleza del *problema*, y especificar qué se *diseña*, ya que en ciencias experimentales y en matemáticas también se resuelven *problemas* y se *diseñan* investigaciones. En segundo lugar, porque no se aclara en qué fases de una investigación científica pueden aplicarse los pasos del diseño ingenieril, teniendo en cuenta que la finalidad de la ciencia no es fabricar *artefactos*, sino generar *conocimiento* sobre la naturaleza (el indicador competencial se refiere a *analizar y explicar fenómenos biológicos y geológicos*).

Poco más adelante, dentro de la descripción de la competencia STEM, se lee lo siguiente: «La competencia en tecnología e ingeniería comprende la aplicación de los conocimientos y metodologías propios de las ciencias para transformar nuestra sociedad» (Real Decreto 217/2022, p. 41.599). Con lo cual, el currículo transmite la idea de que la tecnología y la ingeniería consisten en *aplicar* conocimientos y prácticas de la ciencia. Esto, de algún modo, fomenta –y lamentablemente perpetúa– la idea ingenua de tecnología (ahora incluyendo a la ingeniería) como «ciencia aplicada».

Por lo demás, las disposiciones curriculares enmarcadas en la LOMLOE retoman muchos de los objetivos del área de tecnología, propuestos en las enseñanzas mínimas reguladas en las leyes anteriores. Asimismo, entre los aspectos más novedosos se incluyen saberes básicos relativos a: *pensamiento computacional* (mencionado también en las materias de biología y geología, y matemáticas), *inteligencia artificial*, *ingeniería de datos*, *automatización* y *robótica*. Su inclusión supone, sin duda, una actualización del área de tecnología. Si bien ello no es una consecuencia atribuible a influencias del movimiento educativo STEM. Como se ha visto, el área de tecnología, en España, se ha caracterizado por ir incorporando los últimos avances científico-tecnológicos a lo largo de las sucesivas reformas educativas.

Finalmente, criticamos con pesar que el nuevo currículo desatienda la comprensión de aspectos básicos sobre la *naturaleza de la ingeniería y de la tecnología*. Como ya se viene insistiendo, la simple participación en prácticas científicas y de ingeniería (o de tecnología, si se prefiere) no implica que se comprenda para qué son importantes estas prácticas, qué aportan en la construcción de conocimientos y productos tecnológicos, cuáles son sus limitaciones y cuándo son pertinentes desempeñarlas, entre

8. Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación.

otras cuestiones (García-Carmona, 2020b, 2021b; Pleasants y Olson, 2019). Este *metaconocimiento* resulta, además, imprescindible para promover integraciones curriculares apropiadas y significativas de dichas disciplinas (García-Carmona, 2020a). De modo que esto debería estar claramente establecido en el currículo, no solo como sugerencias dirigidas a los educadores y diseñadores de propuestas didácticas, sino también como meta de aprendizaje para el alumnado.

En síntesis, (1) la ingeniería no es mínima ni adecuadamente conceptualizada en el nuevo currículo para la educación científico-tecnológica básica en España, y su mención llega a ser casi *anecdótica*; (2) la adopción de la perspectiva STEM no aporta nada sustancialmente novedoso –para bien o para mal– a la tradición curricular de la educación científico-tecnológica de este país; y (3) la comprensión de la *naturaleza* de las disciplinas que comprenden STEM, esencial para dar sentido a este enfoque educativo, no es considerada explícitamente en el currículo, más allá de algunas referencias a la naturaleza de la ciencia (García-Carmona, 2022).

QUÉ ENTENDEMOS POR TECNOLOGÍA E INGENIERÍA

Acabamos de decir que una comprensión básica de la naturaleza de las disciplinas, que se desean transponer didácticamente para su uso escolar, debería ser tenida en cuenta por los educadores y diseñadores de currículos. Sin embargo, observamos que, en buena parte de las propuestas educativas STEM, la tecnología es reducida a *artefacto* (García-Carmona, 2020a) y la ingeniería a la *práctica de diseño* (Antink-Meyer y Brown, 2019; Cunningham y Carlsen, 2014). Por tanto, la naturaleza de ambos campos queda desvirtuada. En cuanto a la tecnología, porque también debería incluir, entre otros muchos aspectos, los conocimientos propios y procesos sistemáticos que aplica en la resolución de problemas (Acevedo-Díaz, 1998; Cullen y Guo, 2020; García-Carmona, 2021a). Y con respecto a la ingeniería, porque se obvian otras prácticas como el mantenimiento de sistemas sociotécnicos, la organización o la respuesta a imprevistos, que están entre las actividades más habituales de los ingenieros e ingenieras (Vinck, 2014).

Asimismo, algunos autores (*e.g.*, Pleasants y Olson, 2019) critican la desatención a una cuestión clave para lograr un enfoque educativo STEM auténtico: la relación de la ingeniería con la ciencia. Nosotros añadimos que este enfoque tampoco aborda adecuadamente la relación entre tecnología e ingeniería; o entre ciencia y tecnología, que sí ha sido profusamente conceptualizada en la educación CTS (*e.g.*, Acevedo-Díaz, 1998, 2006; Acevedo-Díaz et al., 2003; Buch, 2003).

En un estudio orientado a determinar los rasgos de la *naturaleza de la ingeniería*, Pleasants y Olson (2019) se quejan del poco interés que esta recibe en la educación STEM; y, por tanto, de la falta de un debate serio en torno al constructo de *ingeniería*. Aunque la naturaleza de la tecnología no ha sido tan desarrollada como la naturaleza de la ciencia, sí ha recibido más atención que la referente a la ingeniería durante las últimas décadas (*e.g.*, Acevedo-Díaz, 1998; Pleasants et al., 2019). Entre otras razones, porque, a diferencia de la ingeniería, la tecnología es una materia escolar con tradición en la educación preuniversitaria. Asimismo, los planteamientos de la educación CTS, cuyo origen es muy anterior al enfoque STEM, sugieren atender explícitamente a la tecnología en sus relaciones con la ciencia y la sociedad (Acevedo-Díaz et al., 2003; Buch, 2003; Layton, 1988).

Pleasants y Olson (2019) hacen un trabajo extraordinario para desentrañar los rasgos característicos de la ingeniería, incluyendo la relación que guarda con la ciencia, a fin de favorecer su integración en el ámbito escolar. Sin embargo, no se ocupan de las relaciones entre ingeniería y tecnología. Los rasgos o dimensiones que estos autores proponen para conceptualizar la naturaleza de la ingeniería se compendian en la tabla 3.

Tabla 3.
Dimensiones para conceptualizar la naturaleza
de la ingeniería, según Pleasants y Olson
(2019, p. 154; traducción propia)

1. Diseño en ingeniería
2. Especificaciones, limitaciones y objetivos
3. Recursos de conocimientos de ingeniería
4. Producción de conocimiento en ingeniería
5. Alcance de la ingeniería
6. Modelos de los procesos de diseño
7. Integración cultural de la ingeniería
8. Cultura interna de la ingeniería
9. Ingeniería y ciencia

Hace cerca de cuatro décadas, al tratar de clarificar el significado de tecnología en los estudios sobre CTS, Kline (1985) proponía las siguientes acepciones: (i) conjunto de productos artificiales fabricados por las personas (herramientas, instrumentos, máquinas, artefactos y todo tipo de sistemas); (ii) conocimientos, metodologías y destrezas necesarias para poder diseñar y realizar tareas productivas (*know-how*); (iii) recursos humanos y materiales del sistema sociotécnico de producción; y (iv) sistema sociotécnico necesario para el uso y mantenimiento de los productos fabricados, incluyendo los aspectos legales. De acuerdo con las dimensiones de Pleasants y Olson (2019) para la naturaleza de la ingeniería, puede decirse que la noción de tecnología propuesta por Kline integra muchos de los aspectos que ahora se atribuyen a la ingeniería.

En 1990, la American Association for the Advancement of Science [AAAS] publicaba el emblemático libro *Science for all Americans (Project 2061)*, que dedica un capítulo a la naturaleza de la tecnología. En este capítulo puede leerse: «La tecnología [...] es una empresa social compleja que incluye no solamente la investigación, el diseño y las artes, sino también las finanzas, la fabricación, la administración, el trabajo, la comercialización y el mantenimiento en el mundo actual» (AAAS, 1990, versión española *online* no paginada). A continuación, se dice que «La ingeniería es el componente de la tecnología que está ligado de manera más estrecha con la investigación científica y los modelos matemáticos. [...] consiste en el análisis de un problema y en el diseño de su solución» (AAAS, 1990, versión española *online* no paginada). Por tanto, en este marco didáctico la ingeniería es entendida como parte de la tecnología.

En un trabajo pionero para diferenciar entre ciencia y tecnología, Acevedo-Díaz (1998) analiza en profundidad la práctica tecnológica en sus dimensiones *técnica, organizativa e ideológico-cultural*. Concluye que la tecnología es un campo del saber humano complejo y holístico, que abarca: (1) productos y herramientas tecnológicas; (2) un conjunto de conocimientos, técnicas y métodos, incluyendo los sistemas organizativos y de desarrollo; y (3) todo lo que deriva de su sociología (economía, mercado, industria, consumo, política, ética, etc.). Por tanto, se trata de una visión multifacética de la tecnología, alineada con los dos marcos conceptuales anteriores, pero sin mencionar la ingeniería. Acevedo-Díaz cita a los *ingenieros* solamente para hacer referencia a profesionales que integran la *comunidad de tecnólogos*.

Waight y Abd-El-Khalick (2012) se posicionan en una perspectiva similar a la de Acevedo-Díaz, y sugieren las siguientes dimensiones de la naturaleza de la tecnología para fines educativos: (i) contexto cultural y papel de los valores en la tecnología, (ii) progreso tecnológico, (iii) tecnología como parte de sistemas, (iv) difusión tecnológica, (v) tecnología como solución y (vi) experticia tecnológica. Estos autores tampoco se ocupan explícitamente de la ingeniería en su conceptualización de tecnología, aunque puede decirse que las prácticas de ingeniería están incluidas, si se consideran los marcos de NRC (2012) y Pleasants y Olson (2019) para esta última.

Más recientemente, en un tratado extenso sobre el significado de tecnología, Raynaud (2018) se refiere a la *ingeniería* como la parte de la tecnología que produce *artefactos*. Y añade: «hay que distinguir la ingeniería de la tecnología a fin de no restringir el campo de la tecnología solo a las tecnologías productivas» (p. 36). Por tanto, la visión de Raynaud, por un lado, huye de la idea de delimitar la tecnología a sus «productos»; y, por otro, entiende la ingeniería como parte de un campo del saber más extenso y holístico, denominado *tecnología*. Esta última perspectiva, añadiendo la dimensión sociológica del desarrollo tecnológico, que Raynaud también aborda extensamente en su tratado, es la que subyace igualmente en el enfoque CTS para la educación científico-tecnológica en el ámbito iberoamericano (Acevedo-Díaz et al., 2003; Buch, 2003; Maiztegui et al., 2002).

Sin embargo, en la bibliografía hay también posiciones teóricas que asignan a la ingeniería los rasgos atribuidos normalmente a la tecnología. Por ejemplo, Quellmalz (2015) define la ingeniería como un enfoque sistemático e iterativo del diseño de objetos, procesos y sistemas para satisfacer las necesidades y los deseos humanos, mientras que la tecnología la reduce a los productos y procesos resultantes de la ingeniería. Se debe precisar, no obstante, que Quellmalz se apoya en los documentos de reforma curricular más recientes para la alfabetización científico-tecnológica en EE. UU. (e.g., National Assessment Governing Board [NAGB], 2013; NRC, 2012), los cuales plantean esa concepción preponderante de la ingeniería frente a la tecnología. Pero esto no era entendido así poco antes, en marcos curriculares para la educación ingenieril muy influyentes en ese mismo país. Por ejemplo, en el documento *Engineering in K-12 education* (NRC, 2009) se destaca que «la tecnología comprende todo el sistema de conocimientos, procesos y dispositivos que intervienen en la creación y el funcionamiento de artefactos tecnológicos, así como los propios artefactos» (p. 17; traducción propia). Es decir, que proyecta una idea de tecnología bastante más amplia que la de simple producto/resultado de la ingeniería, que sintoniza con las visiones expuestas más arriba.

Por otra parte, la concepción *aséptica* y algo idílica de la ingeniería, proyectada en los actuales marcos educativos estadounidenses (NAGB, 2013; NRC, 2012), ha sido también criticada por reconocidos académicos de la didáctica de las ciencias de ese mismo país. Por ejemplo, Zeidler et al. (2016) argumentan que «La imagen romántica de la ingeniería como un esfuerzo empático centrado en satisfacer las necesidades humanas, ignora que la nueva tecnología se desarrolla a menudo únicamente por motivos de beneficio empresarial» (p. 468, traducción propia). En el mismo sentido, Pleasants et al. (2019) se posicionan con una visión de la tecnología más amplia que la de simple «artefacto» (o producto de la ingeniería), y urgen a prestar atención a una perspectiva holística de la naturaleza de la tecnología⁹. Sugieren evitar los *enfoques acríticos y superficiales* que suelen hacerse en las propuestas educativas STEM con respecto a la tecnología (Pleasants et al., 2019), y plantean promover, en cambio, una capacitación para la toma de decisiones informadas en los ámbitos personal y social. Volvemos a recordar que este ha sido uno de los intereses nucleares del movimiento educativo CTS, en relación con el desarrollo tecnológico (Buch, 2003).

ADOPCIÓN DE UN MARCO CONCEPTUAL PARA LA INTEGRACIÓN CURRICULAR DE LA TECNOLOGÍA E INGENIERÍA CON LA CIENCIA

La exposición de los trabajos anteriores, aunque extensa, no emana de una revisión sistemática de toda la bibliografía existente sobre la naturaleza de la tecnología y la ingeniería. Aunque cabe decir que esta es más bien escasa, si se compara con otras cuestiones de la didáctica de las ciencias. En cualquier caso, las aportaciones citadas son suficientemente relevantes para arrojar luz sobre las relaciones entre tecnología e ingeniería, a fin de elaborar un posible marco conceptual con propósitos educativos, al respecto.

9. Pleasants y Olson (2019) apelan a esto mismo cuando se refieren a la naturaleza de la ingeniería.

Así, la bibliografía consultada permite defender la idea de que la tecnología *no es* solo la *resultante* o la *herramienta* de la ingeniería, sino un campo del saber más amplio y complejo, que incluye conocimientos, habilidades, técnicas, procesos/métodos y un gran abanico de aspectos sociológicos relacionados con su desarrollo. De igual forma, provee un buen apoyo para considerar *la ingeniería y sus prácticas* como una parte esencial del amplio campo de la tecnología; concretamente, la parte centrada en el diseño de productos tecnológicos. Con estos mimbres teóricos, junto con lo desarrollado en un estudio anterior sobre la comprensión de nociones básicas de naturaleza de la tecnología (García-Carmona, 2021a), proponemos el marco conceptual de la tabla 4.

Tabla 4.
Conceptualización para la integración de la ingeniería
con la tecnología y sus relaciones con la ciencia en la educación científico-tecnológica

A) *La tecnología es un sistema complejo, orientado a resolver ciertos problemas de la sociedad, que integra componentes de diversa naturaleza, tales como:*

- Productos tecnológicos: Instrumentos, herramientas, máquinas, aplicaciones y artefactos.
- Recursos naturales y artificiales.
- Destrezas y habilidades técnicas (*know-how*).
- Conocimientos tecnológicos (leyes de Little, Erlang, Moore, etc.; conceptos de máquina, autómata, optimización, funcionalidad, eficacia, etc.), científicos y matemáticos.
- Campo académico y profesional integrado por científicos/as, ingenieros/as y técnicos/as de diversa índole.
- Mantenimiento, planificación, organización y respuesta a imprevistos en el funcionamiento de sistemas sociotécnicos.
- Procesos de producción, mercado y consumo.
- Financiación.
- Valores (*e.g.*, ética, sostenibilidad, bienestar) y acuerdos sociales.
- Decisiones políticas, legales y administrativas (*e.g.*, permisos de concesión y leyes reguladoras).
- Preferencias culturales y estéticas.
- Innovación.

B) *Relaciones entre tecnología, ingeniería y ciencia*

- La *ciencia* busca explicar fenómenos de la naturaleza, mientras que la *tecnología*, mediante procesos de *ingeniería*, trata de elaborar productos (máquinas, artefactos, aplicaciones, etc.) que resuelvan problemas, o bien que satisfagan o creen necesidades sociales.
- La *ingeniería* es la parte de la *tecnología* que diseña y produce máquinas, artefactos, aplicaciones, etc.
- Tanto la *ciencia* como la *tecnología* y, por ende, la *ingeniería* están en permanente desarrollo.
- La *ciencia* y la *tecnología* abordan muchos problemas comunes, siendo la contribución de ambas difícil de diferenciar en estos casos (*e.g.*, *tecnociencia*).
- La creatividad juega un papel esencial en el desarrollo de la *ciencia* y de la *tecnología*; por tanto, también en el trabajo de *ingeniería*.
- La *ingeniería* se basa en conocimientos de la *ciencia* (leyes, modelos, teorías, etc.) y las matemáticas, así como en otros conocimientos experienciales, no necesariamente lógico-formales, para diseñar y producir artefactos.
- Al igual que la *ciencia*, la *ingeniería* emplea métodos de trabajo sistemáticos; no obstante, también usa métodos de ensayo y error para depurar los artefactos.
- El *conocimiento tecnológico* tiene una finalidad práctica, mientras que el *conocimiento científico* no necesariamente.
- Tanto la *ciencia* como la *ingeniería* generan conocimientos sobre aspectos mensurables que se validan empíricamente.
- El *desarrollo científico* se presenta sobre todo en publicaciones (artículos, libros, etc.), y el *desarrollo tecnológico*, en patentes de modo preferente.
- La *ciencia* y la *tecnología* requieren apoyo político y financiero en su desarrollo.

Lo más novedoso de la propuesta, si se compara con otras anteriores que conceptualizan las relaciones entre ciencia y tecnología (*e.g.*, Acevedo-Díaz, 1998; Acevedo-Díaz et al., 2003), es que incluye alusiones explícitas a la ingeniería; la cual se concibe como la parte de la tecnología que diseña y produce máquinas, artefactos, aplicaciones, etc. La propuesta establece, además, que la ingeniería se basa en conocimientos de la ciencia y las matemáticas, pero también en otros conocimientos experienciales, no necesariamente lógico-formales, a la hora de diseñar y producir artefactos. Asimismo, hace referencia a que la ingeniería, como la ciencia, emplea métodos de trabajo sistemáticos, aunque también aplica métodos de *ensayo y error* para hacer ajustes empíricos y depurar los diseños. En cuanto a la componente *sociológica* de la tecnología (financiación, mercado, valores, etc.) y, por ende, de la ingeniería, la propuesta incluye una perspectiva similar a la planteada en la educación CTS (Acevedo et al., 2003; Buch, 2003).

Queremos subrayar, por último, que no se trata de una propuesta para impulsar la consecución de aprendizajes declarativos, sino de un marco de *ideas clave* para tener en cuenta en diseños didácticos que propongan la integración curricular de la tecnología y la ingeniería en la ciencia. Sería una cuestión interesante abordar también cómo hacer una transposición didáctica de dicho marco para su introducción progresiva a lo largo de la educación básica. No nos hemos ocupados aquí de ello por razones de espacio.

COMENTARIOS FINALES

Echamos de menos un debate académico profundo en nuestra comunidad de didáctica de las ciencias sobre las influencias educativas que recibimos del exterior, a fin de analizar su aportación y encaje efectivo en nuestro contexto educativo. Pensamos que no se puede lograr una mejora de la educación científico-tecnológica asumiendo políticas de hechos consumados; por tanto, sin ningún tipo de crítica o discusión académica previa. La irrupción del movimiento educativo STEM, en España, apenas ha sido analizada desde la investigación didáctica y ya impregna el nuevo currículo oficial de la educación científico-tecnológica básica; por cierto, de una manera bastante mejorable, en nuestra opinión. Consecuentemente, lo menos que debemos hacer desde la didáctica de las ciencias es emprender estudios teóricos, crítico-constructivos y basados en investigaciones de aula, que ayuden a detectar y superar las limitaciones del «currículo STEM» impuesto, en aras de mejorar la educación científico-tecnológica básica del país.

En este artículo hemos analizado uno de los aspectos más complejos del movimiento educativo STEM: la integración de la *ingeniería* en el ámbito curricular científico-tecnológico. Para ello, hemos examinado críticamente las concepciones de la ingeniería que se suelen manejar en propuestas educativas STEM. También hemos determinado posibles obstáculos para la integración curricular efectiva de la ingeniería con la tecnología y la ciencia. Luego hemos discutido si ello realmente aporta algo novedoso al tradicional ámbito científico-tecnológico en España. Y, por último, hemos propuesto un marco conceptual, fundamentado en bibliografía especializada sobre el tema, para tratar de visibilizar la ingeniería en propuestas de integración curricular de dicho ámbito. Obviamente, es solo una propuesta entre otras posibles. No obstante, entendemos que el marco presentado es novedoso, y a la vez concordante con los pilares esenciales del enfoque educativo CTS, que cuenta con una larga tradición en nuestro contexto educativo, al menos, en el plano teórico. Así pues, esperamos que la propuesta sirva de referente para la discusión o el planteamiento de otras propuestas alternativas sobre el tema abordado.

DEDICATORIA

A la memoria de José Antonio Acevedo-Díaz, con quien tuve la oportunidad de departir sobre muchos de los asuntos tratados aquí.

REFERENCIAS

- Acevedo-Díaz, J. A. (1998). Análisis de algunos criterios para diferenciar entre ciencia y tecnología. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(3), 409-420. <https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/21546>
- Acevedo-Díaz, J. A. (2006). Modelos de relaciones entre ciencia y tecnología: un análisis social e histórico. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 3(2), 198-219. http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2006.v3.i2.03
- Acevedo-Díaz, J. A., Vázquez-Alonso, A., Manassero-Mas, M. A. y Acevedo-Romero, P. (2003). Creencias sobre la tecnología y sus relaciones con la ciencia. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 2(3), 353-376. http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen2/REEC_2_3_9.pdf
- American Association for the Advancement of Science [AAAS] (1990). *Science for all Americans*. Oxford University Press. Versión española online disponible en: <http://www.project2061.org/esp/publications/sfaa/online/intro.htm>
- Antink-Meyer, A. y Brown, R. A. (2019). Nature of engineering knowledge. *Science & Education*, 28(3-5), 539-559. <https://doi.org/10.1007/s11191-019-00038-0>
- Bell, R. (2009). Teaching the nature of science: Three critical questions. En *Best practices in science education*. National Geographic School Publishing.
- Buch, T. (2003). CTS desde la perspectiva de la educación tecnológica. *Revista Iberoamericana de Educación*, 32, 147-163. <https://doi.org/10.35362/rie320926>
- Bunge, M. (2016, 25 sept.). *Tecnología ≠ ciencia aplicada, e industria ≠ tecnología. Sinpermiso*. <https://www.sinpermiso.info/textos/tecnologia-ciencia-aplicada-e-industria-tecnologia>
- Bybee, R. W. (2011). K-12 engineering education standards: Opportunities and barriers. *Technology and Engineering Teacher*, 70(5), 21-29. <https://www.proquest.com/docview/853040699?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true>
- Churi, P. P., Kumar, V., Kose, U. y Rao, N. T. (Eds.). (2021). *Technology and tools in engineering education: Research and innovations*. CRC Press.
- Cullen, T. A. y Guo, M. (2020). The nature of technology. En V. L. Akerson y G. A. Buck (Eds.), *Critical Questions in STEM Education* (pp. 21-32). Springer.
- Cunningham, C. M. y Carlsen, W. S. (2014). Teaching engineering practices. *Journal of Science Teacher Education*, 25(2), 197-210. <https://doi.org/10.1007/s10972-014-9380-5>
- Daugherty, M. K., Carter, V. y Swagerty, L. (2014). Elementary STEM education: The future for technology and engineering education? *Journal of STEM Teacher Education*, 49(1), 45-55. <https://doi.org/10.30707/JSTE49.1Daugherty>
- De Vries, M. J. (2018). Technology education: An international history. En M. J. De Vries (Ed.), *Handbook of technology education* (pp. 73-84). Springer.
- Dogan, B. y Robin, B. (2015). Technology's role in STEM education and the STEM SOS model. En A. Sahin (Ed.), *A practice-based model of STEM teaching* (pp. 77-94). Sense.

- Ellis, J., Wieselmann, J., Sivaraj, R., Roehrig, G., Dare, E. y Ring-Whalen, E. (2020). Toward a productive definition of technology in science and STEM education. *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, 20(3), 472-496. <https://citejournal.org/wp-content/uploads/2020/06/v20i3science1.pdf>
- García-Carmona, A. (2020a). STEAM, ¿una nueva distracción para la enseñanza de la ciencia? *Ápice. Revista de Educación Científica*, 4(2), 35-50. <https://doi.org/10.17979/arec.2020.4.2.6533>
- García-Carmona, A. (2020b). From inquiry-based science education to the approach based on scientific practices. *Science & Education*, 29(2), 443-463. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00108-8>
- García-Carmona, A. (2021a). Reflexiones de estudiantes de profesorado de Física y Química sobre naturaleza de la tecnología en el contexto de la controversia Tesla-Edison. *Revista Iberoamericana de Educación*, 87(1), 35-48. <https://doi.org/10.35362/rie8714269>
- García-Carmona, A. (2021b). Prácticas no-epistémicas: ampliando la mirada en el enfoque didáctico basado en prácticas científicas. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18(1), 1108. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i1.1108
- García-Carmona, A. (2022). La comprensión de aspectos epistémicos de la naturaleza de la ciencia en el nuevo currículo de Educación Secundaria Obligatoria, tras la LOMLOE. *Revista Española de Pedagogía*, 80(283), 433-450. <https://doi.org/10.22550/REP80-3-2022-01>
- García-Carmona, A. y Acevedo-Díaz, J. A. (2018). The nature of scientific practice and science education. *Science & Education*, 27(5), 435-455. <https://doi.org/10.1007/s11191-018-9984-9>
- García Rubio, J. (2018). La organización curricular por ámbitos en educación secundaria obligatoria. En E. López-Meneses et al. (Eds.), *Experiencias pedagógicas e innovación educativa. Aportaciones desde la praxis docente e investigadora* (pp. 579-589). Octaedro.
- Kim, S. y Song, J. (2021). The nature of technology and engineering (NOTE) as perceived by science and technology teachers in Korea. *Research in Science & Technological Education*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/02635143.2021.1924656>
- Kline, S. J. (1985). What is technology? *Bulletin of Science, Technology, and Society*, 5(3), 215-218.
- Layton, D. (1988). Revaluing the T in STS. *International Journal of Science Education*, 10(4), 367-378. <https://doi.org/10.1080/0950069880100404>
- Maiztegui, A., Acevedo, J. A., Caamaño, A., Cañal, P., Carvalho, A. P. M., del Carmen, L. et al. (2002). Papel de la tecnología en la educación científica: una dimensión olvidada. *Revista Iberoamericana de Educación*, 28, 129-155. <https://doi.org/10.35362/rie280962>
- McComas, W. F. y Burgin, S. R. (2020). A critique of “STEM” education. *Science & Education*, 29(4), 805-829. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00138-2>
- National Assessment Governing Board [NAGB] (2013). *Technology and engineering literacy framework for the 2014 National Assessment of Educational Progress*. https://www.nagb.gov/content/dam/nagb/en/documents/publications/frameworks/technology/2014-technology-framework/ch_toc/index.html
- National Research Council [NRC] (2009). *Engineering in K-12 education*. National Academies Press.
- National Research Council [NRC] (2012). *A framework for K-12 science education*. National Academies Press.

- Orden de 14 de julio de 2016, por la que se desarrolla el currículo correspondiente a la Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Autónoma de Andalucía. *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía*, 144, de 28 de julio de 2016. <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2016/144/18>
- Park, W., Wu, J. Y. y Erduran, S. (2020). The nature of STEM disciplines in the science education standards documents from the USA, Korea and Taiwan. *Science & Education*, 29(4), 899-927. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00139-1>
- Pleasant, J. y Olson, J. K. (2019). What is engineering? Elaborating the nature of engineering for K-12 education. *Science Education*, 103(1), 145-166. <https://doi.org/10.1002/sce.21483>
- Pleasant, J., Clough, M. P., Olson, J. K. y Miller, G. (2019). Fundamental issues regarding the nature of technology. *Science & Education*, 28(3), 561-597. <https://doi.org/10.1007/s11191-019-00056-y>
- Quellmalz, E. (2015). Science, technology, and engineering interrelationships: assessment of the understanding of. En R. Gunstone (Ed.), *Encyclopedia of science education* (pp. 935-940). Springer.
- Quinn, C. M., Reid, J. W. y Gardner, G. E. (2020). S+ T+ M= E as a convergent model for the nature of STEM. *Science & Education*, 29(4), 881-898. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00130-w>
- Raynaud, D. (2018). *¿Qué es la tecnología?* Laetoli.
- Real Decreto 1007/1991, de 14 de junio, por el que se establecen las enseñanzas mínimas correspondientes a la Educación Secundaria Obligatoria (Anexo I). *Boletín Oficial del Estado*, 152, de 26 de junio de 1991. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1991/06/14/1007>
- Real Decreto 1631/2006, de 29 de diciembre, por el que se establecen las enseñanzas mínimas correspondientes a la Educación Secundaria Obligatoria. *Boletín Oficial del Estado*, 5, de 5 de enero de 2007. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2006/12/29/1631/con>
- Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato. *Boletín Oficial del Estado*, 3, de 3 de enero de 2015. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2014/12/26/1105/con>
- Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria. *Boletín Oficial del Estado*, 76, de 30 de marzo de 2022. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/03/29/217>
- Ring-Whalen, E., Dare, E., Roehrig, G., Titu, P. y Crotty, E. (2018). From conception to curricula: The role of science, technology, engineering, and mathematics in integrated STEM units. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 6(4), 343-362. <https://www.ijemst.net/index.php/ijemst/article/view/257/157>
- Roehrig, G. H., Dare, E. A., Ellis, J. A. y Ring-Whalen, E. (2021). Beyond the basics: a detailed conceptual framework of integrated STEM. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 3(1), 1-18. <https://doi.org/10.1186/s43031-021-00041-y>
- Sanders, M. (2009). STEM, STEM education, STEM mania. *The Technology Teacher*, 68(4), 20-26. <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/51616/STEMmania.pdf>
- Toma, R. B. y García-Carmona, A. (2021). «De STEM nos gusta todo menos STEM». Análisis crítico de una tendencia educativa de moda. *Enseñanza de las Ciencias*, 39(1), 65-80. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3093>
- Vinck, D. (2014). Pratiques d'ingénierie. Les savoirs de l'action. *Revue d'Anthropologie des Connaissances*, 8(2), 225-243. <https://www.cairn.info/revue-anthropologie-des-connaissances-2014-2-page-225.htm>

- Waight, N. y Abd-El-Khalick, F. (2012). Nature of Technology: Implications for design, development, and enactment of technological tools in school science classrooms. *International Journal of Science Education*, 34(18), 2875-2905.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2012.698763>
- Zeidler, D. L., Herman, B. C., Clough, M. P., Olson, J. K., Kahn, S. y Newton, M. (2016). Humanitas emptor: Reconsidering recent trends and policy in science teacher education. *Journal of Science Teacher Education*, 27(5), 465-476.
<https://doi.org/10.1007/s10972-016-9481-4>

Integration of Engineering in Science and Technology Education from an STS Perspective

Antonio García-Carmona

Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, Universidad de Sevilla, España.
garcia-carmona@us.es • <https://orcid.org/0000-0001-5952-0340>

The STEM education movement (Science, Technology, Engineering and Mathematics) has arrived in the Spanish educational context to stay; to the extent that, within the framework of the new education law (known as «LOMLOE» by its acronym in Spanish), the latest official curriculum approved for basic education establishes STEM competence as one of the eight key competences. This makes it necessary to continue to analyse the most critical or complex aspects of the STEM approach, with a view to elucidating how to favour its implementation in the classroom in a genuine and viable way.

One of the most complex aspects of STEM education is the explicit attention to engineering and more specifically to the practices of those engaged in this discipline. This brings engineering together with technology, which is a discipline that is epistemologically and ontologically very close to the former, as well as a curricular area with a long tradition in most education systems. It happens that many of the attempts to integrate engineering with technology in STEM educational proposals, trying to give visibility to each of them, result in quite limited approaches of both disciplines; but, above all, of technology. In effect, reductionist conceptualisations are used that give technology an inferior status with respect to engineering. This reminds us of what happened between science and technology at the beginning of STS (Science-Technology-Society) education, where technology was very often reduced to «applied science».

Despite the controversial nature of this matter, it is not currently the subject of sufficient discussion in the field of science and technology education. But is it appropriate to assume simplistic perspectives of technology in curricular proposals where it is integrated with engineering? Which perspectives or approaches give rise to this situation of a certain undervaluing of technology, with respect to engineering, in such proposals? Furthermore, what is the new contribution of engineering and its practices to the traditional scientific-technological curriculum? On the other hand, if technology and engineering are to be made visible in proposals for curriculum integration in the scientific-technological field, what aspects and relations between science, technology, and engineering could be handled?

This article presents a critical analysis of the integration of engineering in curricular proposals for science and technology education, sponsored by the STEM educational movement. To this end, the main perspectives and approaches considered in this regard are revised. Next, an analysis of what novelty it means to explicitly introduce engineering into the traditional curriculum for technology education in Spain. Then, literature on the topic is reviewed to determine which relationships could be established between technology and engineering. Finally, a proposal is made for the conceptualization of these two disciplines, including their relationships with science, which is in line with the educational framework of STS and can serve as a benchmark in didactic designs for curricular integration in science and technology education.

The most novel aspect of the proposal is that it includes explicit allusions to engineering, which is conceived as the part of technology through which technological products are designed and produced. The proposal also states that engineering is based on knowledge of science and mathematics but also on other experiential knowledge, not necessarily formal logic, when designing and producing artefacts. In addition, this refers to the fact that engineering, like science, employs systematic working methods; although it also applies trial-and-error methods to make empirical adjustments and refine designs. Regarding the sociological component of technology (financing, market, values, etc.) and, therefore, of engineering, the proposal assumes a similar perspective to that of STS education.



Comparación de resoluciones algebraicas con y sin tablas de problemas de edades

A Comparison of Algebraic Resolutions of Age Problems Using and Without Using Tables

Carlos Soneira

Departamento de Pedagogía y Didáctica, Universidade da Coruña, A Coruña, España
carlos.soneira@udc.es

RESUMEN • En el contexto de la resolución algebraica de problemas de edades, este trabajo estudia las similitudes y diferencias en la construcción del modelo de problema, los errores en las ecuaciones y los procesos subyacentes a estos, dependiendo de si se usan o no tablas. Mediante técnicas de interpretación cualitativa se analizó el discurso, los gestos y las producciones escritas de ocho pares de estudiantes de secundaria. Se obtuvo que cuando usaron tablas construyeron siempre un modelo de problema, mientras que cuando no en ocasiones usaron una estrategia sintáctica. Los errores en las ecuaciones fueron análogos en ambas formas de resolución –con y sin tablas– y la traducción fragmentada del lenguaje natural al algebraico fue un proceso subyacente a ellos en ambas formas.

PALABRAS CLAVE: Educación secundaria; Lenguaje algebraico; Resolución algebraica; Tabla.

ABSTRACT • This article studies the similarities and differences, when algebraically solving age problems, in the construction of the problem model, and the errors in the equations and its underlying processes, depending on whether the solver uses, or not, tables. The discourse, gestures, and written outputs of eight pairs of secondary school students were analysed by means of qualitative techniques. The results show that as long as students used tables, they managed to construct a problem model, but when they did not, in some cases they conducted a merely syntactic strategy. The errors in the equations were analogous in both solving approaches –with and without using tables– and the fragmented translation from the natural to the algebraic language was an underlying process to the errors in both.

KEYWORDS: Secondary education; Algebraic language; Algebraic solving; Table.

Recepción: septiembre 2021 • Aceptación: enero 2023 • Publicación: marzo 2023

Soneira, C. (2023). Comparación de resoluciones algebraicas con y sin tablas de problemas de edades. *Enseñanza de las Ciencias*, 41(1), 43-61.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5546>

INTRODUCCIÓN

La resolución algebraica de problemas –formulando ecuaciones que expresen la estructura del problema– ocupa un lugar importante en el currículum de la Educación Secundaria en España (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2014). Es más, constituye una de las formas de acceso al álgebra escolar (Bednarz et al., 1996) y una fuente de significado para el simbolismo algebraico (Kieran, 2007). Sin embargo, la resolución algebraica de problemas verbales es difícil para los estudiantes (Kieran, 2007). Una dificultad está en entender las relaciones matemáticas expresadas en el texto (Kintsch, 1998), pero muchos estudiantes sí las entienden y las representan mal en lenguaje algebraico (Stacey y MacGregor, 2000).

Por ello, la traducción del lenguaje verbal al algebraico al resolver problemas suscita interés entre los investigadores (Cerdán, 2010; Clement, 1982; Filloy, Rojano y Puig, 2008; Kaput, 1989; Rellensmann et al., 2017; Sanjosé et al., 2009). Para facilitar la transición a la resolución algebraica se han diseñado varias propuestas de instrucción. Destacamos el escalonamiento de los pasos que hay que seguir (Filloy, Puig y Rojano, 2008), con el que se obtuvieron buenos resultados en problemas de ciencias (Sanjosé et al., 2009); aunque, según otras investigaciones, a la larga los estudiantes tienden a no proceder secuencialmente y los errores reaparecen (Soneira, González-Calero y Arnau, 2018). Arnau y Puig (2013) basan su propuesta en el uso de la hoja de cálculo, pero en el caso de los llamados «problemas de edades», los resultados fueron negativos al testar la transferencia a la resolución con lápiz y papel.

Otras propuestas usan representaciones intermedias menos abstractas como paso intermedio, arguyendo que una progresión suave hacia las ecuaciones reporta mejores resultados (Ding y Li, 2014; McNeil y Fyfe, 2012). De hecho, el uso de representaciones intermedias se enseña como método de resolución en varios países (Ding et al., 2019; Ng y Lee, 2009). Sin embargo, el uso de estas representaciones no siempre se asocia con mejores resultados (Ainsworth, 2006; Rellensmann et al., 2017), y centrarse en características visuales de la representación puede inhibir estrategias más generales de resolución e inducir a errores (Bieda y Nathan, 2009). Con algunos tipos de problemas, como los de edades, los diagramas de cinta tampoco lograron tasas de éxito altas (Ng y Lee, 2009).

Precisamente, los problemas de edades suelen resolverse algebraicamente en la educación secundaria –tema tratado en la literatura (Bloedy-Vinner, 1996; Filloy et al., 2010)– y en el sistema educativo español es común usar una tabla como representación intermedia. La disposición espacial de la tabla aportaría un recurso visual adicional para entender la estructura del problema e induciría a proceder más secuencialmente al formular ecuaciones, aunando potencialidades de otras propuestas. Sin embargo, estudios previos no hallaron diferencias significativas en la tasa de error entre la resolución con y sin tablas (Soneira, 2022).

Ante tal situación, este trabajo pretende comparar los procesos de resolución algebraica de problemas de edades con y sin tablas en estudiantes de secundaria, centrándose en los fenómenos desencadenantes de errores. Los resultados permitirían explicar por qué el uso de tablas no siempre mejora la tasa de éxito y valorar el modo de utilizarlas.

CONTEXTO TEÓRICO

El rol de los sistemas de signos

Este trabajo sigue la idea de que en la actividad matemática la cognición está vinculada al uso de signos (Duval, 2017), siendo estos medios de objetivación con los que el sujeto expresa intenciones, adquiere conciencia estable y actúa sobre constructos mentales en el contexto de una tarea concreta (Radford, 2003). Así, su significado emerge de las tareas en las que median, y su uso está condicionado por la

meta de la tarea. Además, las tareas matemáticas escolares se sitúan en una comunidad que establece unos significados y formas de uso «institucionales» de los signos (Arzarello et al., 2009). Al participar en esas tareas, el individuo desarrolla su significado e interpretación personal, que puede no coincidir con los institucionales (Ernest, 2006).

Asimismo, en la actividad matemática lo relevante no son los signos aislados, sino los sistemas de signos con estructuras semántico-sintácticas propias (Duval, 2017; Filloy, Rojano y Puig, 2008). Tales sistemas pueden estar formados por signos propios de las matemáticas (por ejemplo, lenguaje algebraico), por signos no exclusivos de las matemáticas (como el lenguaje natural) o por combinar signos de distintos sistemas en una disposición espacial determinada (por ejemplo, en tablas en problemas de edades). Estos son ejemplos de sistemas con una estructura semántico-sintáctica socialmente acordada, pero los sujetos pueden crear sistemas idiosincráticos combinando signos y estructuras de otros sistemas (Filloy, Rojano y Puig, 2008).

Por otra parte, la objetivación en matemáticas implica varios sistemas entrelazados, incluyendo gestos, tono de voz y cadencia del habla (Radford, 2003; Radford et al., 2007). Así, en tareas que incluyen la producción de expresiones algebraicas –expresiones en simbolismo algebraico–, los gestos y la cadencia de habla del sujeto desvelan el significado personal de las expresiones algebraicas (Radford et al., 2007).

Siguiendo estas ideas, los análisis en este trabajo se basan en que, si la cognición en matemáticas se realiza mediante signos, el análisis de su producción y transformación durante la realización de una tarea permite estudiar los procesos cognitivos que tienen lugar.

La resolución de problemas verbales

Nathan et al. (1992) proponen un modelo para el proceso de comprensión y resolución de problemas verbales con tres componentes interrelacionados: el texto-base, el modelo de situación y el modelo de problema. El texto-base es la red de proposiciones que representa el significado que puede extraerse exclusivamente del texto, sin añadir nada no explicitado. Esa red suele ser incompleta, y para dotarla de coherencia el sujeto debe integrarla con su conocimiento personal del mundo real construyendo un modelo de situación. Este expresa las relaciones entre los eventos y agentes del problema y, a partir de él, se construye el modelo de problema, que es un constructo puramente matemático que expresa su estructura algebraica. Además, el modelo de problema es un constructo mental, que el sujeto puede representar externamente o no. Considérese el siguiente ejemplo:

Problema P2. En la familia vecina, la abuela Gertrudis tiene 60 años más que su nieto Rigoberto. Dentro de 12 años, la edad de Gertrudis será 4 veces la de Rigoberto. ¿Cuántos años tiene cada uno?

Un modelo de situación incluiría a dos personajes de los que hallar la edad, y que existe una relación entre las edades en el presente y otra en el futuro. Además, incluye el conocimiento personal de que la abuela es mayor que el nieto, que el tiempo pasa igual para ambos, un rango para la diferencia entre sus edades y otro para las edades presentes de cada uno. Un modelo de problema incluiría que la edad presente de Gertrudis es 60 más la presente de Rigoberto, que la edad futura de cada personaje se calcula sumando 12 a la edad presente correspondiente y que la edad futura de Gertrudis es 4 multiplicado por la futura del nieto. Esta interpretación es la única considerada correcta en este artículo porque en el lenguaje natural «Dentro de 12 años» afecta a las edades de ambos personajes y a su relación multiplicativa, aunque algún resolutor podría interpretar que la edad futura de la abuela será cuatro veces la actual del nieto.

La identificación de estos constructos parte de la comprensión del texto (Sanjosé et al., 2009) y, según Kintsch (1998), durante la lectura, en cuanto el sujeto identifica una pieza semántica significativa,

la procesa e integra en una red proposicional en la memoria de trabajo. Tal integración se realiza en ciclos progresivos. Además, para construir un modelo de problema, el sujeto realiza sucesivas transformaciones sobre su representación mental del texto de partida.

La resolución algebraica y el uso de tablas

La resolución algebraica consiste en representar el modelo de problema en una o varias ecuaciones y luego resolverlas. El proceso puede descomponerse formalmente en una secuencia de pasos llamada método cartesiano (Fillooy, Puig y Rojano, 2008):

1. Leer analíticamente el enunciado del problema para reducirlo a una lista de cantidades y relaciones entre cantidades.
2. Escoger una cantidad que se va a designar por una letra (o varias cantidades que van a ser designadas con letras diferentes).
3. Representar las otras cantidades con expresiones algebraicas que describen las relaciones aritméticas entre esas cantidades y otras previamente designadas con una letra o una expresión algebraica.
4. Escribir una ecuación (o tantas independientes como letras en el paso 2) igualando dos expresiones algebraicas no equivalentes (escritas en los pasos 2 y 3) que designen la misma cantidad.
5. Transformar la ecuación en una forma canónica.
6. Resolver la ecuación.
7. Interpretar el resultado de la ecuación en términos del problema.

La lectura analítica (paso 1) consiste en inferir la red de relaciones entre cantidades conocidas y desconocidas, esto es, construir un modelo de problema. Del paso 2 al 4 se realiza un cambio de sistema de signos desde el lenguaje natural al algebraico, pudiendo pasar por uno intermedio. Cada cambio constituye una submeta de la tarea, ergo condiciona el procesamiento del enunciado durante su lectura (Kintsch, 1998; Radford, 2003).

Por otra parte, los pasos del método serían seguidos secuencialmente por un resolutor ideal, pero eso no es frecuente en resolutores reales. Es común que estos comiencen a escribir la ecuación (paso 4) sin completar antes un modelo de problema (paso 1). Además, hay estudiantes que siguen la estrategia sintáctica –traducir directamente y manteniendo su orden cada grupo de palabras clave a simbología algebraica– sin construir el modelo de problema (Clement, 1982; Ding et al., 2019). Esto suele llevar a ecuaciones incorrectas porque los lenguajes verbal y algebraico tienen estructuras semántico-sintácticas diferentes.

Producir ecuaciones a partir del enunciado verbal resulta difícil a los estudiantes (Duval, 2017; Fillooy, Rojano y Puig, 2008; Kieran, 2007) y a veces necesitan representaciones intermedias (Duval, 2017). De hecho, en el sistema educativo español es común iniciar a los estudiantes en la resolución algebraica de problemas de edades usando una tabla como representación intermedia.

Estas tablas incluyen un encabezado para cada fila y columna donde se indica en lenguaje natural el nombre de un protagonista o un momento temporal (figuras 1, 2 y 3). El procedimiento habitual consiste en: leer comprensivamente el texto del enunciado; esbozar una tabla según el modelo de situación construido a partir de la lectura; escribir en cada celda una expresión algebraica que represente la edad del protagonista en el momento temporal indicado por los encabezados de fila y columna; cuando toda celda contiene una expresión, basarse en ellas para escribir fuera de la tabla una ecuación o sistema; y resolver la ecuación o sistema. El formato de estas tablas y el modo de usarlas los introduce explícitamente el profesorado, y puede incluso figurar en el libro de texto, por lo que tendrían así carácter institucional en el sentido de Arzarello et al. (2009).

Errores de resolución y sus desencadenantes

Las dificultades para producir ecuaciones a partir del enunciado verbal se evidencian en los errores de los estudiantes. Aunque su catálogo es amplio, se describen a continuación algunos recurrentes (Cerdán, 2010). La polisemia de la letra consiste en asignarle a una misma letra dos cantidades diferentes, bien en una misma ecuación o en ecuaciones o etapas de resolución distintas (Fillooy, Rojano y Puig, 2008; Stacey y McGregor, 2000). El error de inversión consiste en escribir las letras con una relación inversa a la expresada en el enunciado (Clement, 1982), y el error por operación equivocada consiste en escribir una operación diferente a la indicada en el enunciado. El de información extra consiste en añadir símbolos superfluos e incorrectos (Molina et al., 2017).

Estos errores se ilustran con el *Problema P2*. Un sistema correcto sería:

$$\begin{aligned}g &= r + 60; \\ g + 12 &= 4(r + 12)\end{aligned}$$

con g , r para las edades presentes respectivas de Gertrudis y Rigoberto.

Un ejemplo de polisemia de la letra r sería $g = r + 60$; $g + 12 = 4 \cdot r$, si la letra r designase la edad presente en la primera ecuación, y la futura, en la segunda. Ejemplos de error de inversión multiplicativo y aditivo serían, respectivamente, $4(g + 12) = r + 12$ y $g + 60 = r$. Un ejemplo de operación equivocada sería $g = r \cdot 60$, y uno de información extra $g = r + 60 + 4y$.

Estos errores pueden clasificarse en tres grandes tipos. En concreto, según Molina et al. (2017), los dos primeros derivan de las características del simbolismo algebraico, el tercero, de la aritmética, y el último se refiere a la compleción del enunciado.

Analizar las ecuaciones escritas permite detectar errores, pero un mismo error puede derivar de procesos cognitivos diferentes. Puede que el resolutor use una estrategia sintáctica (véase tabla 1), con lo que no construye un modelo de problema (por ejemplo, Ding et al., 2019). Pero hay al menos otras dos posibilidades no excluyentes entre sí: construir un modelo de problema correcto mentalmente y cometer errores al expresarlo en ecuaciones; o construir un modelo de problema incorrecto mentalmente (Soneira, González-Calero y Arnau, 2018). Para paliar el error, habría que actuar sobre los procesos cognitivos que lo causan, de ahí que este trabajo analice el proceso de resolución.

Objetivos

El objetivo general es comparar los procesos de resolución algebraica de problemas de edades cuando se usan tablas y cuando no. Se concreta en dos específicos:

1. Identificar los puntos en común y las diferencias en los procesos realizados por estudiantes de 4.º de la ESO para construir y expresar el modelo de problema.
2. Caracterizar los procesos que subyacen a la comisión de errores en cada caso.

MÉTODO

Muestra

En una fase preliminar participaron 3 clases de 4.º de la ESO (de 15 a 16 años) de dos institutos públicos, de la opción de enseñanzas académicas. De esos grupos se seleccionaron individuos con unos resultados académicos en matemáticas medios o medio-bajos (nivel concordante con la opinión del

profesorado), por centrarse el interés en los resolutores no ideales. Según el profesorado, los participantes resolvían algebraicamente problemas de edades desde 2.º de la ESO. El profesorado se centraba en el uso de tablas con el procedimiento descrito en la sección 2.3 hasta que el dominio del lenguaje algebraico permitiese plantear las ecuaciones directamente a partir del texto.

Se aplicó una prueba escrita inicial consistente en la resolución de problemas para identificar el nivel en matemáticas de los estudiantes y a aquellos con las mismas tendencias en cuanto al uso o no de tablas. A partir de ahí y del criterio del profesorado, y descartando a los que dejaron en blanco todos los problemas de edades, se preseleccionaron 28 estudiantes para participar en un estudio por pares. Tras dar su consentimiento por escrito, 8 pares de estudiantes, cada par con ambos miembros de la misma clase, fueron analizados.

Procedimiento

Se estudiaron cualitativamente ocho casos, analizando vídeos donde pares de estudiantes resuelven problemas en voz alta en el encerado. Según Peräkylä (2005), el agrupamiento por pares permite un conocimiento intrasubjetivo de las intenciones y los razonamientos, así como una recogida de información más rica. Además, Schoenfeld (1985) recomienda agrupar por pares porque los resolutores pueden alterar sus razonamientos debido al entorno experimental, pero al resolver por pares el fenómeno de «reconocimiento de ignorancia compartida» reduce esas alteraciones. Por esto mismo, los pares eran de sujetos de la misma clase, y las intervenciones del investigador se redujeron a tomar notas, instar al par a hablar en caso de no verbalizar el pensamiento, o a hablar más alto si resultaba necesario.

Dentro de un estudio más amplio sobre la resolución de problemas verbales, cada par participó en una única sesión de entre 40 y 70 minutos con 6 problemas –P1 a P6–, de los que P2 y P5 son de edades y el resto de otros temas. En la sección 2.2 figura P2. El enunciado de P5 es como sigue:

P5. La edad de Marta es 5 veces la de su hija Julia. Calcula la edad de cada una sabiendo que dentro de 10 años la edad de Marta será solamente el triple de la de Julia.

La dificultad de la traducción a ecuaciones es similar en todos excepto P1 y P6 (véase nota en la tabla 4). En todos los casos, el par se situó delante del encerado y se le entregó una hoja con el enunciado del problema que había que resolver. Cuando indicaban haber terminado o no ser capaces de continuar, se les entregaba el siguiente. Las instrucciones fueron: *i)* empezar a resolver leyendo el enunciado en voz alta; *ii)* hablar suficientemente alto para ser oídos; *iii)* informar a su pareja de sus pensamientos y acciones.

Para evidenciar más claramente las similitudes y diferencias entre la resolución con y sin tablas, se ilustra el análisis con un mismo problema (*Problema P2*).

Codificación

Usando técnicas de interpretación de datos inspiradas en los trabajos de Radford (2000) y Radford et al. (2007), se realizó un análisis conjunto del discurso, lo escrito en el encerado, los gestos, el ritmo del habla, la entonación y la mirada. En concreto, partiendo de un esquema preliminar de categorías basado en el marco teórico, primero se transcribieron los diálogos y se realizó una codificación abierta para dividirlos en partes que, conteniendo una idea o un proceso, fuesen comprensibles por sí mismas. A continuación, se realizó una primera categorización de esos procesos e ideas observados. Posteriormente, esta se refinó incorporando primero información sobre las producciones escritas, los gestos y la mirada en cada momento del diálogo, y luego la relativa al tono de voz y las pausas en el habla. Después, todos los recursos expresivos fueron interpretados conjuntamente guiándose por los objeti-

vos de investigación y el marco teórico, lo que provocó cambios en la categorización. El profesorado de los estudiantes actuó primero como panel de expertos validando estos procedimientos. Después, según avanzaba la codificación, valoraba la verosimilitud de las categorías emergentes sobre la base de su experiencia en el aula.

Los análisis se realizaron a partir del diálogo completo correspondiente a un problema, además de cada frase e incluso cada palabra por separado. Se prestó especial atención a determinar si los resolutores incidían o no en las mismas (sub)categorías cuando usaban tablas que cuando no, y a los recorridos que devienen en errores en cada caso. Será la descripción de las categorías lo que desvele los procesos subyacentes tras cada error.

La tabla 1 contiene las categorías finales jerarquizadas y su descripción general, y las tablas 2 y 3, sus subcategorías y los fenómenos tomados como evidencia de la categoría correspondiente. La definición y la descripción detallada se exponen en la sección Resultados.

Tabla 1.
Categorías y su descripción general

<i>Categoría</i>	<i>Descripción</i>
C1. Construcción de ecuaciones	Escritura de ecuaciones o expresión de esa intención.
C2.1 Traducción fragmentada	Interrupción de la lectura o comentario sobre el enunciado para traducir parte de él a lenguaje algebraico, retomando la lectura en un punto posterior.
C2.2 Traducción no fragmentada	Lo contrario de lo anterior.
C3.1 Construcción de modelo de problema C3.2 Estrategia sintáctica	Inferencia de la estructura algebraica del problema. Traducción directa de cada grupo de palabras clave a simbología algebraica manteniendo su orden y sin tener en cuenta el significado.
C4 Escritura de ecuaciones	Escritura de ecuaciones con letras.
C5 Revisión	Evaluación de la solución propuesta.

Tabla 2.
Subcategorías 1

C3.1 Construcción de modelo de problema	C3.2 Estrategia sintáctica
Relectura de representación escrita previa Uso de la estructura de la tabla Interpretación idiosincrásica de la tabla Comentarios y transformaciones de producciones escritas propias	
C3.1.1 Modelo de problema incorrecto C3.1.2 Modelo de problema correcto	

Tabla 3.
Subcategorías 2

C4 Escritura de ecuación (o ecuaciones)	
Ecuación correcta	Error de inversión Polisemia de la letra Operación equivocada Información extra
C5 Revisión	
Alusión a compatibilidad con modelo de situación Interpretación fragmentada de ecuación Uso del lenguaje aritmético para testar el modelo de problema Sustitución de valores en las ecuaciones Detección de errores	

RESULTADOS

Se muestran, a continuación, los análisis de extractos de resoluciones que ilustran las categorías, el recorrido por estas y la emergencia de errores. La definición y la descripción de cada categoría (véanse, además, tablas 1, 2 y 3) se incluyen en los propios análisis. En ocasiones, una categoría abarca muy pocas líneas de diálogo o se refleja mediante los gestos, la mirada y la cadencia del habla en una sola línea; en otras, abarca un diálogo extenso y la realización de representaciones escritas. Es también frecuente que en los diálogos se intercalen varios procesos e ideas en pocas líneas, lo que concuerda con que los resolutores reales tienden a recorrer los pasos del método cartesiano de manera no secuencial.

Caso 1. Rosa y Luz

El extracto comienza cuando Rosa (R) y Luz (L) han representado en el encerado la tabla de la figura 1 y L ha sugerido borrar «+ 60» en la celda [1,2].

	Presente	Dentro de 12 años
x Gertrudis	y + 60	4(y+ 60)
Rigoberto y		

Fig. 1. Tabla al inicio del extracto de R y L.

L1. R: ¡Ah, no! Sería más 12. Porque tú ahora tienes 15, dentro de cuatro años vas a tener 15 más cuatro. [...]

L2. L: Vale, ahora piénsalo así: Imagínate que esto no existiese, esta parte de aquí, ¿vale? (señala la columna completa encabezada por «Presente»). Dentro de 12 años, ¿vale? (señalando «Dentro de 12 años» en la tabla), solamente dentro de 12 años. ¿Para qué vuelves a poner lo de más 12 cuando ya sabemos que es dentro de 12 años? (señalando el encabezado de la segunda columna).

El extracto comienza con R expresando que para ella el paso del tiempo debe indicarse en la expresión de la celda [1,2]. Sin embargo, para L, la letra y en la celda [1,2] actúa como un deíctico —expresión que cambia de significado dentro de un mismo texto—. En efecto, L expresa explícitamente en L2 con verbalizaciones acompañadas de gestos que, para ella, el encabezado «Dentro de 12 años» hace redundante escribir «+12» en las expresiones algebraicas de las celdas de esa columna, luego la letra y cambia su significado en esa columna. Esta interpretación personal de L de las tablas causó un error por la polisemia de la letra, aunque a lo largo de la resolución R expresó varias veces su discrepancia con esa interpretación de la tabla (véase L1).

Caso 2. Tomás y Bruno

Extracto 1 de Tomás y Bruno

Tomás (T) lee el enunciado completo en voz alta y Bruno (B) escucha. A continuación, comienza el siguiente diálogo:

- L1. T: Bueno, Rigoberto es x (B escribe Rigoberto). Rigoberto sería x , y Gertrudis sería... x más 60 (T mira alternativamente lo que escribe B y la hoja; B escribe « $\Rightarrow x$ » y «Gertrudis $\Rightarrow x + 60$ », figura 2). Esto es «ahora» ... (mirando lo escrito por B; después T escribe «Ahora») y dentro de 12 años (leyendo; escribe línea vertical y luego «+ 12 años», figura 2; luego mira la hoja) esto sería... (mira la hoja). Gertrudis será cuatro veces la de Rigoberto (leyendo, después mira «Rigoberto $\Rightarrow x$ » en la tabla, figura 2).
- L2. B: O sea, cuatro x (señalando la celda [1,2]).
- L3. T: Sí (escribe « $G \rightarrow 4x$ » en la tabla). Y cuántos años tiene cada uno (mirando la hoja; luego alza la vista hacia la tabla). Bueno, y esto sería $x + 12$ (escribe « $R = x + 12$ », figura 2).

Ahora	+ 12 años
Gertrudis $\Rightarrow x + 60$	$G \rightarrow 4x$
Rigoberto $\Rightarrow x$	$R = x + 12$

Fig. 2. Tabla al final del extracto 1 de T y B.

Al leer el enunciado, ambos dan por sentado que usar una tabla con estructura 2×2 y encabezados es adecuado. Su tabla parece admitir deícticos, con x para las edades presente y futura del nieto.

Hacen una traducción fragmentada del lenguaje natural a la tabla, interrumpiendo la lectura para incorporar en la tabla cada componente de información en cuanto la procesan y retomando la lectura en la siguiente. Por ejemplo, T en L1 verbaliza «Dentro de 12 años» solo una vez, interrumpe la lectura para escribir y verbaliza otro sintagma antes de retomar la lectura en «cuatro veces». Escriben en la tabla teniendo en cuenta la menor cantidad posible de sintagmas susceptible de traducirse a lenguaje algebraico como una relación aritmética, aunque eso conlleve perder información esencial y representar relaciones incorrectas en el contexto del problema. Por ejemplo, «la edad de Gertrudis será 4 veces la de Rigoberto» puede traducirse como la expresión incorrecta $4 \cdot x$ sin tener en cuenta el sintagma «dentro de 12 años» que llevaría a escribir $4 \cdot (x + 12)$. A esto puede contribuir también el que la información omitida «+ 12» se incluya en el encabezado de la columna y la tabla admita deícticos (véase Caso 1).

Extracto 2 de Tomás y Bruno

Este extracto es continuación del anterior.

- L4. B: Pues a ver, mmh... (mirando pensativo la tabla). ¿Y cómo se hace esto? Yo ese no lo sé hacer... (T también mira pensativo la tabla) Gertrudis... pero ¿cómo es la pregunta? ¿Cuántos años tiene cada uno? ... Sí...
- L5. T: Cuántos años tiene cada uno ahora.
- L6. B: Ahora, o sea... eh... aquí hay que encontrar yo creo, eh... (mira con atención la tabla), $4x$... (pausa, señala $4x$ en la tabla) menos 12 (pausa de 17 segundos pensativo mirando la tabla) es igual a x más 60 (pausa, señala « $x + 60$ » en la tabla, mira a T como pidiendo su opinión) porque si te dice que tiene el cuádruple... ¡no! para, para, para; x es Rigoberto... (señala la celda [2,1] en la tabla).
[...]
- L7. B: Claro, $4x$. Ponemos... cuatro x menos 12 igual a x más 60 (mientras escribe « $4x - 12 = x + 60$ » fuera de la tabla).
- L8. T: Sí.
- L9. B: Y hay que resolver esto.

A continuación, resuelven correctamente la ecuación $4x - 12 = x + 60$, incorrecta por polisemia de la x , y obtienen valores 24 y 84 para las edades respectivas del nieto y la abuela. Aceptan el resultado como correcto sin hacer una revisión, puede que por ser compatible con el modelo de situación.

No mostraron dudas mientras completaban la tabla, sino al plantear una ecuación una vez completada esta. De L4 a L8 ambos señalan partes de la tabla mientras hablan, e intercalan en la escritura y verbalización intervalos en los que miran pensativos dicha tabla. Esto sugiere que la usan para construir un modelo de problema y la ecuación que lo representa. Es plausible que de L6 a L7 el argumento de B sea: «si por la segunda columna de la tabla dentro de 12 años la edad de Gertrudis será $4x$ (señala “ $4x$ ” en la segunda columna), entonces ahora es $4x - 12$, y como en virtud de la primera columna su edad ahora es $x + 60$ (señala $x + 60$ en la tabla), entonces $4x - 12 = x + 60$ ».

El uso de la tabla no impidió un error en la ecuación por una x polisémica, que podría proceder de la admisión de déicticos en la tabla (x en la figura 2) o de un error en la celda [1,2] debido a la traducción fragmentada de componentes aisladas de L1 a L2.

Caso 3. Simón e Íñigo

Tras leer el enunciado Simón (S) e Íñigo (I) realizan una traducción fragmentada (véase Caso 2) a la tabla idiosincrásica –la edad futura de la abuela se representa en las celdas [1,2] y [2,2]– de la figura 3.

	Ahora	Dentro 12 años
Ger	x	$x + 12$
Rig:	$x - 60$	$4x - 240^*$

Fig. 3. Tabla completa de Simón e Íñigo. *Proviene de $4 \cdot (x - 60)$.

No mostraron dudas al producir la tabla de la figura 3 a partir del texto (pese al error), pero sí al plantear una ecuación a partir de la tabla una vez que las cuatro celdas contenían una expresión.

Finalmente, plantean la ecuación incorrecta $x + 12 = 4x - 240$ y la resuelven obteniendo las soluciones incorrectas 84 y 24 como edades presentes. El extracto de diálogo comienza durante la fase de revisión, tras calcular en el encerado $4 \cdot 84 - 240 = 96$.

- L1. S: Pero esto (señala el 96) te da (coloca el dedo sobre $x + 12$ en la tabla) la edad que tiene Gertrudis dentro de 12 años.
 L2. I: Claro, eso es de 84. Si le sumas a 84, a 12, 84, 96, la edad de Gertrudis.
 L3. S: Eso la edad de Gertrudis (señala « $x + 12$ » en la tabla) dentro de 12 años.
 L4. I: Claro.
 L5. S: Pero como aquí (señala « $4x - 240$ » en la tabla) te dice que es la edad del nieto, cuatro veces, o sea sería, 24 más 12, que serían treinta y... 36... por cuatro.
 L6. I: 36 por cuatro... (S calcula en el encerado) 144.
 L7. S: Entonces no nos da (pensativo).

La verbalización y los gestos en L5 indican que usando el lenguaje aritmético (operando sobre números en vez de letras) S es capaz de construir y evaluar un modelo de problema correcto, aunque la ecuación producida no lo sea. Entonces, el error no se debe a la falta de capacidad para construir un modelo de problema correcto ni a la lectura fragmentada del texto, pues, de ser así, dado que tras resolver el sistema no realizan más lecturas, el error también debería cometerse al usar el lenguaje aritmético. El error se debería a la traducción fragmentada del lenguaje natural a las expresiones algebraicas, que se traslada de la tabla a la ecuación.

Caso 4. Mar y Rui

El extracto comienza tras leer Mar (M) el enunciado y Rui (R) permanecer escuchando. Pasan del enunciado a las ecuaciones sin usar tablas.

- L1. M: Pon x , y (R escribe x e y en el encerado) x edad Gertrudis, y edad Rigoberto (R escribe « x : edad Gertrudis»; « y : edad Rigoberto») vale, Gertrudis tiene 60 años más que Rigoberto (R también lee la hoja) y ... x menos 60 es igual a y (pausa, R escribe « $x - 60 = y$ »). Entonces... dentro de (leyendo) 12... entre paréntesis (pausa, gesto ordenando escribir. R escribe «12»), la edad de Gertrudis será 4 veces la de Rigoberto. Entonces, 12, x , es igual (pausa más larga para mirar la hoja, R borra el «(» y escribe « $12x =$ ») a 12 (pausa) más cuatro y (mirando la hoja, R completa $12x = 12 + 4y$, pone una llave indicando un sistema con las dos ecuaciones). ¿Así? (Ambos miran alternativamente la hoja y las ecuaciones) Tiene 60 años más... sí, yo creo que sí (R asiente).

Resuelven correctamente el sistema incorrecto y descartan la solución por ser negativa. Retomamos el extracto cuando tienen escrito en el encerado el sistema $y + 60 = x$, $12x = 12 + 4y$.

- L2. M: Dentro de 12 años, la edad de Gertrudis (pausa, al leer «Gertrudis» pronuncia más despacio, eleva el tono de voz y señala con el rotulador «12x») será igual (pausa, mira la hoja y señala el «=») a la edad (mirando la ecuación y señalando « $12 + 4y$ ») a $4y$... sí, este está bien. A ver... es que tiene que dar positivo.

Comienzan a resolver el sistema, pero antes de terminar lo descartan al anticipar que dará negativo. Detectan el error de operación equivocada y aceptan como válida la solución del sistema incorrecto $x = y + 60$, $12 + x = 12 + 4y$.

Este par realiza una traducción fragmentada aislando componentes del texto traducibles mediante una única relación aritmética, evidenciada en L1 por las pausas en la lectura y las verbalizaciones, y cuando retoma la lectura justo después de la última componente representada. No siguen una estrategia sintáctica porque al pasar al lenguaje algebraico varían la sintaxis del texto, con un «12» a ambos

lados del «=». Construirían un modelo de problema correcto a nivel mental, pues en L1, tras verbalizar «dentro de 12 años», M ordena escribir un paréntesis, y después otro 12 a la derecha de este, conque sabría que la relación multiplicativa se refiere a las edades futuras.

Sin embargo, aunque la relación «dentro de 12 años» se represente dos veces, igualmente se traduciría de manera aislada. En efecto, las pausas en la verbalización en L1 y L2, y el hecho de que en L2 «dentro de 12 años» solo se verbalice una vez, indicarían que una vez que M sabe que la relación se establece en el futuro interrumpe el procesamiento de la información para representar el «12 +» a ambos lados del «=» y así descargar la memoria de trabajo. El procesamiento se reiniciaría en «cuatro veces», de forma desligada del «12 +» ya descargado de la memoria de trabajo, lo que desencadenaría el error en la ecuación.

Caso 5. Ana y Bea

Ana (A) y Bea (B) no usaron tablas. El extracto comienza tras leer B el enunciado y A escucharla y escribir «Gertrudis (x); Rigoberto (y)».

L1. B: En la familia [...] nieto. (Relee la primera frase del enunciado). Vale, x es igual a $60y$ (escribe « $x = 60y$ »), no, más y (corrige a « $x = 60 + y$ »). Vale, dentro de doce años, la edad de Gertrudis (leyendo, pausa, gesto ascendente-descendente con la mano, terminando el movimiento y elevando el tono de voz en «Gertrudis») será (leyendo, pausa, asiente con la cabeza, mismo gesto con la mano) cuatro veces la de Rigoberto (pausa, asiente con la cabeza, mismo gesto con la mano y ascenso de tono de voz). Vale, eh... (mirando el encerado) x (pausa, gesto ascendente-descendente con la mano) más 12 (pausa, mismo gesto con la mano) es igual (pausa, asiente con la cabeza, mismo gesto con la mano) a cuatro y (pausa, mismo gesto con la mano. Instantes después A escribe « $x + 12 = 4y$ »).

Resuelven correctamente el sistema incorrecto y obtienen $x = 84$, $y = 24$. Revisan la solución substituyendo los valores 84 y 24 en las ecuaciones y dan la solución por válida. En la primera parte de L1, cada pausa en el discurso de B, acompañada del gesto descendente con la mano, se corresponde con un componente del texto traducible con un solo símbolo algebraico o una sola relación aritmética. En la segunda parte de L1 se repiten las mismas pausas y gestos con la mano, correspondiéndose con la verbalización de la traducción al lenguaje algebraico de los componentes anteriores. Esta correspondencia en las pausas, junto con la traducción $x + 12 = 4y$, manteniendo la sintaxis del lenguaje natural, indica que B usa una estrategia sintáctica para escribir las ecuaciones, sin evidencias de construcción de un modelo de problema y cometiendo una polisemia de la y . Posteriormente, realizaron una revisión del sistema substituyendo las letras por las soluciones halladas, sin detectar el error.

Respecto a los seis problemas, todos los pares construyeron siempre modelos de problema, excepto Ana y Bea, que lo hicieron en P1, pero siguieron una estrategia sintáctica de P2 a P6. La tabla 4 resume los resultados más destacados sobre el proceder de los pares de los Casos 1 a 5 de P1 a P6.

Tabla 4.
Resumen de resultados en los problemas P1-P6 para los Casos 1 a 5

<i>Par</i>	<i>Resultados</i>
R y L	En los dos problemas de edades, para L las tablas admiten déicticos y para R no. Traducción fragmentada de P1 a P6, que lleva a ecuaciones incorrectas (errores de polisemia, inversión, información extra). En P1, P3 y P5, tras detectar errores en la revisión por incompatibilidad con modelo de situación, R corrige a L haciendo traducción no fragmentada, y obtienen ecuaciones correctas.
T y B	Traducción fragmentada solo en P2 y P6, con ecuación incorrecta en P2. En P1 y de P3 a P6, ecuaciones correctas. En P5 existen dificultades para escribir ecuaciones una vez completada la tabla.
S e I	Traducción fragmentada siempre que conduce a errores (polisemia, inversión, operación equivocada, información extra). Detectan errores por incompatibilidad con modelo de situación. En P1, S corrige mediante traducción no fragmentada y obtiene la ecuación correcta. De P2 a P5 acaban desistiendo o con nuevos errores no detectados.
M y R	Traducción fragmentada excepto en P1, P4 y P5, con ecuaciones correctas en ellos y en P6. En P3, R corrige a M mediante traducción no fragmentada y obtiene la ecuación correcta. Solo revisan en P1.
A y B	Estrategia sintáctica con traducción fragmentada de P2 a P6 que lleva a ecuaciones incorrectas de P2 a P5 (polisemia, inversión, información extra). Revisiones sustituyendo valores y con interpretación fragmentada de ecuaciones sin detectar errores. En P1, traducción parcialmente fragmentada por grupos de componentes y ecuación correcta.

Nota: Solo en P1 y P6 una traducción fragmentada podía llevar a ecuaciones correctas. P1 y P6 fueron resueltos incorrectamente, respectivamente, por un solo par.

Sobre el resto de los pares, uno no usó tablas en los problemas de edades y los otros dos sí, pero en los tres casos la traducción fragmentada llevó a errores de inversión, polisemia o información extra, pese a construir un modelo de problema correcto. No se detectaron fenómenos diferentes a los vistos en los casos 1 a 5.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este trabajo analiza las diferencias y similitudes, en función de si se usan o no tablas, en la resolución algebraica de problemas de edades por estudiantes de 4.º de la ESO con rendimiento académico medio o medio-bajo en álgebra.

En cuanto al uso de tablas, pese a ser un sistema de signos institucional en el sentido de Arzarello et al. (2009), la interpretación personal de los estudiantes no siempre coincidió con la institucional, tal y como ocurre con otros sistemas (Ernest, 2006). Para algunos estudiantes, las letras en las expresiones algebraicas dentro de las tablas eran déicticos, siendo modificado su significado por el encabezado de la columna (por ejemplo, en el Caso 1). Sería un caso particular de la influencia del lenguaje natural al interpretar otros sistemas de signos (Kaput, 1989), que podría desencadenarse por combinar los lenguajes natural y algebraico en la propia tabla (véase L2 de Luz). Esta admisión de déicticos en la tabla provocó errores por letras polisémicas en las ecuaciones (Caso 2). Entonces, el uso de tablas puede suponer una dificultad en sí mismo, igual que ocurre con otras representaciones auxiliares que requieren un aprendizaje específico (Ainsworth, 2006; Rellensmann et al., 2017). Además, aunque la manifestación del error por letras polisémicas en las ecuaciones sea como en otros contextos (Cerdán, 2010; Filloy, Puig y Rojano, 2008; Filloy, Rojano y Puig, 2008; Molina et al., 2017; Stacey y MacGregor, 2000), cuando se usan tablas su interpretación personal podría ser un desencadenante añadido.

Sobre las diferencias en la resolución en función de si se usan tablas o no, los estudiantes que las usaron construyeron un modelo de problema apoyándose en la disposición espacial de la tabla. En efecto, en todos esos casos, los estudiantes escrutaban y señalaban con gestos la tabla durante sus verbalizaciones y mientras reflexionaban. Además, hacían comentarios relacionando el enunciado verbal y las expresiones en la tabla y modificaban estas a lo largo de la resolución. Este uso de las tablas tiene rasgos comunes con el de los dibujos esquemáticos en problemas de modelización, pues para realizar el dibujo es necesario saber qué elementos intervienen en el problema y, a su vez, el dibujo muestra las relaciones entre esos elementos (Rellensmann et al., 2017). Algo similar ocurre con los diagramas de cinta en problemas aritméticos y algebraicos (Ng y Lee, 2009). Cuando no usaron tablas, en ocasiones también pudieron construir un modelo de problema (véase Caso 4), pero en otras aplicaron la estrategia sintáctica (Caso 5). Esto concuerda con lo reportado por Ding et al. (2019) sobre el mayor uso de la estrategia sintáctica cuando no se usan representaciones intermedias, y por Ding y Li (2014), Duval (2017) o Kieran (2007) sobre la utilidad de estas para dar significado al simbolismo algebraico. Una explicación sería que la reflexión durante la resolución –parafraseo del enunciado, comentarios sobre este, producciones escritas– y el tiempo de resolución fueron mayores cuando se usaron tablas, pues eso coincidiría con los efectos, detectados por Neuman y Schwarz (2000) en problemas de mezclas, de las explicaciones dadas por el resolutor a sí mismo a partir de la tabla.

No obstante, en el estudio de Neuman y Schwartz (2000), las dificultades de los resolutores con las tablas se concentraban en el paso del lenguaje natural a la tabla, mientras que en el presente estudio se encontraron al pasar de la tabla a la ecuación. En efecto, salvo Rosa y Luz (Caso 1), que negociaron el significado de las letras en la tabla debido a sus distintas interpretaciones personales de esta, el resto de los pares apenas necesitó diálogo para acordar su estructura o las expresiones algebraicas que había que incluir en ella. Las dudas y modificaciones de escrituras previas se concentraron al plantear la ecuación una vez que cada celda contenía ya una expresión (por ejemplo, en los casos 2 y 3). Una explicación sería que en el estudio de Neuman y Schwartz (2000) las ecuaciones obtenidas a partir de la tabla solo tenían letras a la izquierda del signo igual. Además, los problemas de edades podrían tener características específicas que dificultan su resolución, pues usando hojas de cálculo (Arnau y Puig, 2013) o diagramas de cinta (Ng y Lee, 2009) con estos problemas también se obtuvieron peores resultados que con otros.

Sobre los fenómenos observados en ambas formas de resolución, con y sin tablas, por una parte, algunos pares no aludieron al modelo de situación mientras planteaban la ecuación, pero en todos los casos solo aceptaron como correctas aquellas soluciones incorrectas compatibles con un modelo de situación plausible. Esto también ocurrió en los casos en los que siguieron una estrategia sintáctica, corroborando lo apuntado por Sanjosé et al. (2009) sobre lo relativamente fácil que resulta construir un modelo de situación comparado con construir un modelo de problema a partir de él.

Por otra parte, también se detectó, tanto en resoluciones con tablas como sin ellas, un fenómeno de traducción fragmentada del lenguaje natural al algebraico, construyendo el modelo de problema a medida que se traducía. Durante la relectura del enunciado, en cuanto los estudiantes retoman una componente de la oración traducible con un único símbolo o relación aritmética, interrumpían la lectura para representarla algebraicamente, y retomaban el proceso en la siguiente componente. Esto provocó errores en las expresiones algebraicas, pues al retomar la traducción del enunciado los estudiantes dejaban de tener en cuenta componentes anteriores ya representadas pero que afectaban a la representación de las siguientes (por ejemplo, en el extracto 1 del Caso 2 con tablas, o en los casos 4 y 5 sin tablas).

Existen varias explicaciones plausibles de la traducción fragmentada. Una sería que producir expresiones algebraicas es una meta de la tarea en cualquier resolución algebraica, por lo que condiciona la lectura del enunciado (Kintsch, 1998), orientándola a esa meta inmediata. Otra sería que, para hacer la traducción, han de cargarse en la memoria de trabajo las proposiciones verbales que se van a traducir,

las reglas del lenguaje algebraico y los símbolos que se emplearán, con todos esos elementos interaccionando entre sí. Según Phan et al. (2017), la cantidad de elementos que interaccionan al mismo tiempo es lo que determina la carga cognitiva, y solo los resolutores con buen dominio del lenguaje algebraico podrían movilizar sus reglas y símbolos como un único elemento, sin saturar la memoria de trabajo (Phan et al., 2017). Esto es coherente con que la traducción fragmentada al lenguaje aritmético no causó errores (por ejemplo, en el Caso 3), pues dada su edad los estudiantes dominarían este lenguaje. Todo en conjunto justificaría que muchos estudiantes puedan resolver problemas aritmética pero no algebraicamente (Stacey y McGregor, 2000). La tendencia a la traducción fragmentada al álgebra en resolutores no expertos se explicaría también porque las personas tienden a usar la estrategia con la que prevén una menor carga cognitiva (Uesaka y Manalo, 2012). Una forma de reducir la carga de la resolución algebraica sería reducir el número de elementos que interaccionan tomando la menor cantidad posible de componentes verbales que traducir en cada momento.

Acerca de los errores, sus manifestaciones en las ecuaciones (polisemia de la letra, error de inversión, operación equivocada, información extra) se identifican con las catalogadas en la literatura (por ejemplo, Cerdán, 2010; Clement, 1982; Molina et al., 2017) y fueron análogas en las resoluciones con y sin tablas.

Sobre los procesos subyacentes tras esos errores, en los pares que no usaron tablas, el error provino a veces de aplicar la estrategia sintáctica sin construir un modelo de problema (Caso 5), mientras que los que las usaron construyeron siempre un modelo de problema y, cuando además revisaron la solución, mostraron que el modelo era correcto a nivel mental (por ejemplo, en el Caso 3). Usando el lenguaje aritmético con valores concretos, expresaron sin dificultad modelos de problema correctos y detectaron el error en las ecuaciones (Caso 3). En cambio, los pares que no usaron tablas solo detectaron aquellas soluciones erróneas incompatibles con el modelo de situación (Caso 4). No obstante, cabe destacar que la traducción fragmentada al lenguaje algebraico fue un proceso subyacente tras los errores en las ecuaciones tanto con tablas (casos 2 y 3) como sin ellas (casos 4 y 5). Esto es fundamental, pues hace que el uso de tablas no palíe errores con este origen, lo que afectaría principalmente a los tipos de errores más ligados a la coordinación entre lenguajes. Según la clasificación de Molina et al. (2017), serían los derivados de las características del simbolismo algebraico y los relativos a la compleción del enunciado. Esto explicaría en parte lo duradero de las dificultades de los estudiantes con la resolución algebraica (Kieran, 2007), pues los errores derivados de las características del simbolismo algebraico son los más persistentes (Molina et al., 2017).

Como implicaciones didácticas, estos resultados muestran que emplear tablas es útil para construir el modelo de problema y evitar la estrategia sintáctica en resolutores no expertos, en línea con lo reportado por Ding et al. (2019) y Ng y Lee (2009) para otras representaciones auxiliares. Sin embargo, también indican la pertinencia de reforzar el dominio del lenguaje algebraico y de explicitar sus diferencias estructurales con el lenguaje natural y las consecuencias de la traducción fragmentada. Esto incluye el convenio de uso de las tablas y la interferencia con el lenguaje natural en cuanto a la admisión de deícticos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del proyecto de investigación PGC2018-096463-BI00 del Programa Estatal de Generación de Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico del Sistema de I+D+i, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Agencia Estatal de Investigación.

REFERENCIAS

- Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16, 183-198.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>
- Arnau, D. y Puig, L. (2013). Actuaciones de alumnos instruidos en la resolución algebraica de problemas en la hoja de cálculo y su relación con la competencia en el método cartesiano. *Enseñanza de las Ciencias*, 31(3), 49-66.
<https://doi.org/10.5565/rev/ec/v31n3.967>
- Arzarello, F., Paola, D., Robutti, O. y Sabena, C. (2009). Gestures as semiotic resources in the mathematics classroom. *Educational Studies in Mathematics*, 70, 97-109.
<https://doi.org/10.1007/s10649-008-9163-z>
- Bednarz, N., Kieran, C. y Lee, L. (Eds.) (1996). *Approaches to algebra: Perspectives for research and teaching*. Kluwer Academic Publishers.
- Bieda, K. N. y Nathan, M. J. (2009). Representational disfluency in algebra: evidence from student gestures and speech. *ZDM Mathematics Education*, 41, 637-650.
<https://doi.org/10.1007/s11858-009-0198-0>
- Bloedy-Vinner, H. (1996). The analgebraic mode of thinking and other errors in word problem solving. En L. Puig y A. Gutiérrez (Eds.), *Proceedings of the 20th International Conference for the Psychology of Mathematics Education* (pp. 105-112). International Group for the Psychology of Mathematics Education.
- Cerdán, F. (2010). Las igualdades incorrectas producidas en el proceso de traducción algebraico: un catálogo de errores. *PNA*, 4(3), 99-110.
<https://doi.org/10.30827/pna.v4i3.6164>
- Clement, J. (1982). Algebra word problem solutions: Thought processes underlying a common misconception. *Journal for Research in Mathematics Education*, 13(1), 16-30.
<https://doi.org/10.2307/748434>
- Ding, M., Chen, W. y Hassler, R. S. (2019). Linear quantity models in US and Chinese elementary mathematics classrooms. *Mathematical Thinking and Learning*, 21(2), 105-130.
<https://doi.org/10.1080/10986065.2019.1570834>
- Ding, M. y Li, X. (2014). Transition from concrete to abstract representations: The distributive property in a Chinese textbook series. *Educational Studies in Mathematics*, 87, 103-121.
<https://doi.org/10.1007/s10649-014-9558-y>
- Duval, R. (2017). *Understanding the mathematical way of thinking - The Registers of semiotic representations*. Springer International Publishing.
- Ernest, P. (2006). A semiotic perspective of mathematical activity: the case of number. *Educational Studies in Mathematics*, 61, 67-101.
<https://doi.org/10.1007/s10649-006-6423-7>
- Filloy, E., Puig, L. y Rojano, T. (2008). El estudio teórico local del desarrollo de competencias algebraicas. *Enseñanza de las Ciencias*, 25(3), 327-342.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3746>
- Filloy, E., Rojano, T. y Puig, L. (2008). *Educational algebra. A theoretical and empirical approach*. Springer.
- Filloy, E., Rojano, T. y Solares, A. (2010). Problems Dealing with Unknown Quantities and Two Different Levels of Representing Unknowns. *Journal for Research in Mathematics Education*, 41(1), 52-80. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc.41.1.0052>

- Kaput, J. J. (1989). Toward a theory of symbol use in Mathematics. En C. Janvier (Ed.), *Problems of representation in the teaching and learning of mathematics* (pp. 159-196). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Kieran, C. (2007). Learning and teaching algebra at the middle school through college levels: Building meaning for symbols and their manipulation. En F. K. Lester, Jr. (Ed.), *Second handbook of research on mathematics teaching and learning* (pp. 707-762). Information Age Publishing.
- Kintsch, W. (1998). *Comprehension. A paradigm for cognition*. Cambridge University Press.
- McNeil, N. M. y Fyfe, E. R. (2012). «Concreteness fading» promotes transfer of mathematical knowledge. *Learning and Instruction*, 22(6), 440-448. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.05.001>
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (2014). Real Decreto 1105/2014, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato. *Boletín Oficial del Estado*, 3, 169-546.
- Molina, M., Rodríguez-Domingo, S., Cañadas, M. C. y Castro, E. (2017). Secondary school students' errors in the translation of algebraic statements. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 15(6), 1137-1156. <https://doi.org/10.1007/s10763-016-9739-5>
- Nathan, M. J., Kintsch, W. y Young, E. (1992). A theory of algebra-word-problem comprehension and its implications for the design of learning environments. *Cognition and Instruction*, 9(4), 329-389. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0904_2
- Neuman, Y. y Schwarz, B. (2000). Substituting one mystery for another: the role of self-explanations in solving algebra word-problems. *Learning and Instruction*, 10, 203-220. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(99\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(99)00027-4)
- Ng, S. y Lee, K. (2009). The Model Method: Singapore Children's Tool for Representing and Solving Algebraic Word Problems. *Journal for Research in Mathematics Education*, 40(3), 282-313. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc.40.3.0282>
- Peräkylä, A. (2005). Analysing talk and text. En N. K. Denzin y Y. S. Lincoln (Eds.), *The SAGE handbook of qualitative research* (pp. 869-886). SAGE Publications.
- Phan, H. P., Ngu, B. H. y Yeung, A. S. (2017). Achieving optimal best: Instructional efficiency and the use of cognitive load theory in mathematical problem solving. *Educational Psychology Review*, 29(4), 667-692. <https://doi.org/10.1007/s10648-016-9373-3>
- Radford, L. (2000). Signs and meanings in students' emergent algebraic thinking: a semiotic analysis. *Educational Studies in Mathematics*, 42, 237-268. <https://doi.org/10.1023/A:1017530828058>
- Radford, L. (2003). Gestures, speech, and the sprouting of signs. *Mathematical Thinking and Learning*, 5(1), 37-70. https://doi.org/10.1207/S15327833MTL0501_02
- Radford, L., Bardini, C. y Sabena, C. (2007). Perceiving the general: The multisemiotic dimension of students' algebraic activity. *Journal for Research in Mathematics Education*, 38(5), 507-530. <https://doi.org/10.2307/30034963>
- Rellensmann, J., Schukajlov, S. y Leopold, C. (2017). Make a drawing. Effects of strategic knowledge, drawing accuracy, and type of drawing on students' mathematical modelling performance. *Educational Studies in Mathematics*, 95, 53-78. <https://doi.org/10.1007/s10649-016-9736-1>

- Sanjosé, V., Solaz-Portolés, J. J. y Valenzuela, T. (2009). Transferencia inter-dominios en resolución de problemas: una propuesta instruccional basada en el proceso de traducción algebraica. *Enseñanza de las Ciencias*, 27(2), 169-184.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3729>
- Schoenfeld, A. H. (1985). *Mathematical problem solving*. Academic Press.
- Soneira, C. (2022). The Use of Representations when Solving Algebra Word Problems and the Sources of Solution Errors. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 20(5), 1037-1056.
<https://doi.org/10.1007/s10763-021-10181-2>
- Soneira, C., González-Calero, J. A. y Arnau, D. (2018). Indexical Expressions in Word Problems and their Influence on Multiple Referents of the Unknown. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 16(6), 1147-1167.
<https://doi.org/10.1007/s10763-017-9824-4>
- Stacey, K. y MacGregor, M. (2000). Learning the Algebraic Method of Solving Problems. *The Journal of Mathematical Behavior*, 18(2), 149-16.
[https://doi.org/10.1016/S0732-3123\(99\)00026-7](https://doi.org/10.1016/S0732-3123(99)00026-7)
- Uesaka, Y. y Manalo, E. (2012). Task-Related Factors that Influence the Spontaneous Use of Diagrams in Math Word Problems. *Applied Cognitive Psychology*, 26(2), 251-260.
<https://doi.org/10.1002/acp.1816>

A Comparison of Algebraic Resolutions of Age Problems Using and Without Using Tables

Carlos Soneira

Departamento de Pedagogía y Didáctica, Universidade da Coruña, A Coruña, España
carlos.soneira@udc.es

The algebraic solving of word problems is a relevant topic in secondary education, but students face difficulties when posing the equations that represent the problem structure. Indeed, errors in the resulting equations, such as the polysemy of the letter, reversal errors, wrong operation, or extra information, are widespread. What is more, the same error can be triggered by different cognitive process. On the one hand, the solver can follow a syntactic strategy and translate the words of the verbal statement into symbols in algebraic language, preserving the order of the meaningful pieces of information without inferring the network of relationships between the known and unknown quantities –the problem model. On the other hand, the solver may construct a valid problem model in their mind, but make errors when expressing it into equations.

Using auxiliary representations as a bridge between the natural and the algebraic languages has been proposed as way to ease the access to the algebraic solving. Particularly, in the case of the called age problems, tables –tabular configurations with headings for rows and columns specifying a character and a point in time, as well as an expression in algebraic language in each cell representing the corresponding age– are widely used. Even more, it is common for the format and way of using such tables to be explicitly taught in the classroom, which means that the tables become a sign system with socially shared rules. However, prior research has not found a significative difference in the rate of successful solutions depending on whether the solver uses tables or not.

In this article, the performances of eight pairs of secondary school students in speaking-aloud problem sessions were analysed. Their discourse, written inscriptions in the blackboard, gestures, tone of voice, and pauses in speech, were analysed together. The performances in which students used tables were compared with those in which they did not.

The aims were to identify the commonalities and the differences in the construction and expression of the problem model, and to determine the processes underlying errors in each case.

The results showed that as long as the students used tables, they constructed a correct problem model by relying on both the table and the problem statement. When they did not, however, they sometimes mentally constructed a correct problem model, but in other cases followed a syntactic strategy. This was the main difference between both solving procedures. However, the errors in the equations were the same in both procedures, and so did the origin of the errors: the fragmented translation from the natural to the algebraic language. Specifically, students tended to stop the processing of the problem statement when they identified a piece of information which could be translated by means of just one algebraic symbol or a single arithmetic relationship, and to restart the process only after having written the corresponding symbol. This caused that they no longer considered parts of the statement which they had already translated, but which –according to the structural rules of the natural language– did modify the meaning of other parts of the statement not yet translated. Moreover, the fragmented translation seemed to cause errors just when the target of the translation was the algebraic language, because when translating to the arithmetic language errors were not made. This suggests that using the algebraic language may overload the students' working memory and that they download the already translated information to make room for the structural rules of the algebraic language and the remaining pieces of information.

Furthermore, the results showed that students may use tables as an idiosyncratic sign system which admits deictic expressions –as in natural language–, which in turn causes errors when translating to the algebraic language. This could pose an additional difficulty linked to the use of tables.



Analogías y enseñanza de la genética y la biología evolucionista

Analogies and Teaching of Genetics and Evolutionary Biology

Leonardo González Galli

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

Instituto de Investigaciones CeFIEC, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires,

Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

leomgalli@gmail.com

RESUMEN • En este trabajo se distinguen tres modos de tener en cuenta las analogías en la enseñanza de las ciencias naturales y se discuten algunas implicancias didácticas de la perspectiva, poco mencionada en el ámbito de la didáctica, según la cual algunas metáforas y analogías son una parte no eliminable de las teorías científicas. Tras esto, estos análisis de índole general se ponen en juego en una discusión sobre posibles aportes a la enseñanza de la genética y la biología evolucionista a partir del trabajo sobre la analogía informática, en el primer caso, para contribuir a un aprendizaje tendiente al cuestionamiento del determinismo genético, y sobre la analogía del diseño, en el segundo caso, para contribuir a la regulación metacognitiva del pensamiento teleológico.

PALABRAS CLAVE: Analogías; Metáforas; Enseñanza; Genética; Biología evolucionista.

ABSTRACT • This paper distinguishes three ways of taking analogies into account when teaching natural sciences and discusses some didactic implications of the perspective, rarely mentioned in the field of didactics, according to which some metaphors and analogies are a non-removable part of scientific theories. These general analyses are then brought into play in a discussion of possible contributions to the teaching of Genetics and Evolutionary Biology based on the work on the informatics analogy, in the first case, to contribute to a learning process that throw into questions genetic determinism, as well as on the analogy of design, in the second case, to contribute to the metacognitive regulation of teleological thinking.

KEYWORDS: Analogies; Metaphors; Teaching; Genetics; Evolutionary biology.

Recepción: enero 2022 • Aceptación: enero 2023 • Publicación: marzo 2023

González Galli, L. (2023). Analogías y enseñanza de la genética y la biología evolucionista.

Enseñanza de las Ciencias, 41(1), 63-78.

<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5615>

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de este artículo es presentar los fundamentos teóricos para el uso de las metáforas y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales, enfatizando algunos aspectos poco atendidos en la literatura ya existente sobre el tema. La potencial utilidad de estos fundamentos teóricos se ilustrará analizando algunos casos de analogías importantes para la genética y la biología evolucionista. Aunque no se presentarán actividades de aula concretas, se ofrecerán algunas sugerencias generales para el diseño de tales actividades.

El rol que las metáforas y analogías juegan en la construcción del conocimiento científico ha sido un tema controvertido. Sin embargo, el hecho de que en la ciencia se haya recurrido con frecuencia (por no decir siempre) a las analogías parece innegable. Esto último supone dos problemas epistemológicos: el primero se refiere a qué rol cumplen las analogías en la ciencia; el segundo, a si sería deseable o no que la ciencia prescindiera de ellas. Dado que la epistemología constituye una referencia central para la didáctica de las ciencias naturales (DCN) (Adúriz-Bravo, 2005), es esperable que la discusión epistemológica sobre el rol de las analogías en la ciencia tenga importantes implicancias para la DCN. Así como es un hecho innegable que en las ciencias naturales se utilizan profusamente las analogías, con independencia de lo que en el ámbito de la epistemología se piense al respecto, es igualmente innegable que en la docencia también las utilizamos profusamente, con independencia de lo que se piense al respecto en el ámbito de la DCN. Podría decirse, entonces, que la discusión más interesante no es si este recurso debe o puede utilizarse, sino cuáles serían los modos adecuados de utilizarlo para favorecer el aprendizaje.

El principal objetivo específico de este trabajo es analizar algunas implicancias didácticas de la tesis según la cual algunas metáforas y analogías, que, siguiendo a Palma (2015), llamaré *metáforas epistémicas*, son una parte *no eliminable* de las teorías científicas. Esto ha sido poco tenido en cuenta en el ámbito de la DCN, donde se tendió a considerar las analogías desde un punto de vista más bien instrumental. En este trabajo distinguiré tres modos de tener en cuenta las analogías en la enseñanza, e ilustraré dichos análisis con ejemplos de la enseñanza de la biología. En las secciones siguientes discutiré brevemente qué son las analogías, y abordaré sus aspectos psicológicos y epistemológicos. Allí concluiré que algunas analogías son una parte *no eliminable* de las teorías científicas y, al mismo tiempo, que el pensamiento analógico constituye un aspecto fundamental de la cognición humana. Luego exploraré las implicancias de esta conclusión para la discusión sobre el rol de las analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. En esa sección, distinguiré tres modos de tener en cuenta las analogías. Finalmente, intentaré mostrar cómo el trabajo sobre ciertas *metáforas epistémicas* de la genética y la biología evolucionista puede contribuir a una mirada crítica sobre el determinismo genético, en el primer caso, y a la regulación del pensamiento teleológico, en el segundo.

METÁFORAS Y ANALOGÍAS

Existen en la literatura diferentes distinciones entre «metáfora» y «analogía» (Gentner, 1999); pero, en general, la distinción se basa en que en la metáfora se comparan dos entidades de modo implícito, mientras que en la analogía dicha comparación es explícita (Aubusson y otros, 2006; Linares e Izquierdo Aymerich, 2006). En el ámbito de la DCN, Adúriz-Bravo (2005, p. 28) define *analogía* como «un recurso común del lenguaje y del pensamiento, que consiste en buscar semejanzas entre dos situaciones, una conocida y otra novedosa, con el fin de dar sentido a la última por medio de la primera». Los «escenarios» comparados están asociados a ciertos «campos semánticos», de modo que el «campo fuente» sirve de punto de partida conocido para facilitar la comprensión del «campo blanco». En general, hablaré de *analogías*, y solo utilizaré el término *metáfora* cuando esté citando o reseñando

la obra de alguna autora o autor que utilice dicho término, pero, en cualquier caso y a los fines de este trabajo, *metáfora* y *analogía* pueden considerarse sinónimos.

La psicología cognitiva ha puesto en evidencia que los razonamientos analógicos son una parte constitutiva y principal de la mente humana (Glucksberg, 1999; Hofstadter y Sander, 2018; Lakoff y Johnson, 2012; Pinker, 2007). Tal vez, el principal aspecto de la analogía que explica su rol central en el pensamiento es que permite la categorización. Es más, resulta difícil distinguir claramente ambos procesos (Hofstadter y Sander, op. cit.). Una vez construida una categoría, luego, mediante la analogía, extendemos esa categoría, de modo que ante una nueva situación nos permita identificar similitudes que nos ayudarán a lidiar adecuadamente con esa nueva situación. En la actualidad, existe un amplio consenso sobre este rol central del pensamiento analógico en la mente humana (Gentner, 1999).

En relación con lo epistemológico, en la ciencia siempre se ha recurrido a las analogías con diversos fines: retóricos, heurísticos y epistémicos o teóricos (Aubusson y otros, 2006; Bradie, 1999; Keller, 2000; Ruse, 1994; Thagard, 1995). Más allá de este reconocimiento, han existido diferentes posturas en relación con la legitimidad y conveniencia de la utilización de analogías (Hoffman, 1980; Palma, 2015). Las perspectivas en relación con esta cuestión dependen de cuestiones epistemológicas más generales tales como la concepción de teoría que se tenga. Simplificando, podemos decir que la filosofía de la ciencia clásica (el empirismo lógico y la concepción heredada) tendió, desde una perspectiva normativista, a condenar el uso epistémico de las metáforas. En el mejor de los casos, se reconocía el valor heurístico, estético o retórico de este recurso, pero se negaba que tuviera una relevancia propiamente teórica (Bradie, 1999; Hoffman, 1980). Desde este punto de vista, lo que se dice analógicamente podría, e idealmente *debería*, decirse de un modo literal (Bradie, 1999; Ortony, 1993; Palma, 2015).

Más tarde, la nueva filosofía de la ciencia puso en evidencia las limitaciones de la concepción heredada, y, en ese contexto, se puso en cuestión la pretensión de excepcionalidad epistémica de la ciencia. En un extremo relativista, la ciencia era un discurso sobre el mundo como cualquier otro, y dada la omnipresencia de las analogías en todas las formas del discurso humano, su presencia en la ciencia sería inevitable. Sin embargo, este reconocimiento de la inevitabilidad de las metáforas en la ciencia se utilizó, en cierta medida, para rebajar el estatus epistemológico de toda la ciencia. Así, muchas veces se reconoce la omnipresencia inevitable de las analogías en la ciencia, pero se sigue negando que dicho recurso tenga un rol epistémico específico y relevante y, menos aún, deseable (Palma, 2015).

Aquí adoptaré una tercera perspectiva, defendida por varios autores (Bradie, 1999; Palma, 2015; Ruse, 2008, 2003, 2000), que reconoce en las analogías una función epistémica central, inevitable e insustituible. En palabras de Palma (2015, p. 16): «las metáforas que utilizan los científicos dicen algo por sí, y no como meras subsidiarias de otras expresiones consideradas literales y, por tanto, tienen una función cognoscitiva y epistémica legítima y, sobre todo, insustituible». Más específicamente, desde la denominada «teoría cognitiva de la ciencia», desarrollada por Ronald Giere (véase Adúriz-Bravo y Ariza, 2014; Giere, 1999a, 1999b, 1992; Izquierdo Aymerich y Adúriz-Bravo, 2021), el rol de las analogías resulta aún más central. Esta teoría forma parte de la llamada «concepción semántica» de las teorías científicas (Díez y Moulines, 2008), que considera que lo principal de una teoría científica es qué dice sobre el mundo, y no tanto cómo lo dice. Los principales componentes de una teoría son, desde este enfoque, los modelos que la conforman (Giere, 1992). Desde el semanticismo (en la versión de Giere, al menos), los modelos se entienden como objetos abstractos que guardan una relación de *semejanza, analógica*, con los sistemas reales que representan. Es decir, el modelo *es como* el sistema real que representa *en ciertos aspectos y grados*. De hecho, podemos considerar que los modelos científicos no son más que un tipo especial de analogías (Palma, 2007). Por lo tanto, desde esta perspectiva epistemológica, la analogía resulta ser un aspecto fundamental de la ciencia. Así, resultará evidente que una de las principales herramientas cognitivas con las que en las ciencias se construyen modelos es el razonamiento analógico (Nersessian, 1992; Schuster, 2005). En síntesis, el razonamiento analógico

constituye uno de los procesos cognitivos más importantes con los que las científicas y los científicos construyen el conocimiento y, además, los productos de ese proceso, los modelos científicos, tienen una naturaleza intrínsecamente analógica.

Aquí adoptaré esta última perspectiva, y asumiré, además, que, tal como señalan autores como Palma (2015), las teorías científicas en general, de hecho, implican analogías con funciones epistémicas no eliminables, *metáforas epistémicas*, y exploraré algunas de las implicancias de esta perspectiva para la enseñanza en el caso de biología.

ANALOGÍAS EN LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS NATURALES

En la DCN se ha discutido la conveniencia, las ventajas y las desventajas de utilizar las analogías en la enseñanza (Linares e Izquierdo Aymerich, 2006; Oliva, 2004; Taylor y Desbury, 2018; Venville y Treagust, 1997). Por ejemplo, se ha sugerido que pueden facilitar los procesos de cambio conceptual, pero también que pueden generar aprendizajes erróneos. Sin embargo, esta discusión está en gran medida ligada a las discusiones epistemológicas y psicológicas esbozadas en los apartados anteriores. Si la ciencia implica la existencia de analogías en un sentido epistémico fuerte (son parte de las propias teorías), y si el pensamiento consiste en buena parte en razonamientos analógicos, entonces la pretensión de evitarlas en la enseñanza carecería de fundamentos. Uno de los pilares de la DCN de orientación constructivista es que los conocimientos ya presentes condicionan fuertemente el proceso de aprendizaje. En gran medida, esa interacción entre lo ya sabido y el nuevo conocimiento consiste en un proceso en el que la persona intenta comprender lo nuevo buscando semejanzas con lo conocido, en un proceso de evidente naturaleza analógica (González Labra, 1997; Hofstadter y Sander, 2018). Más allá de estos análisis, la investigación muestra que, de hecho, en la docencia utilizamos profusamente las analogías, y esto vale incluso para quienes tienen una baja estima por este recurso (Dagher, 1995; Linares e Izquierdo Aymerich, 2006). Es por eso por lo que actualmente la discusión se centra en cómo utilizar adecuadamente las analogías, más que en si deben o no ser utilizadas (Aubusson y otros, 2006; Brown y Clement, 1989; Clement, 1993; Clement y Rea-Ramirez, 2008; Galagovsky y Adúriz-Bravo, 2001; González Labra, 1997; Linares e Izquierdo Aymerich, 2006; Oliva, 2004; Oliva y otros, 2001; Oliva Martínez y Aragón-Méndez, 2009).

La literatura sobre el uso didáctico de las analogías ofrece diversas sugerencias prácticas (Brown y Clement, 1989; González Labra, 1997; Linares e Izquierdo Aymerich, 2006). Mencionaré solo dos que luego recuperaré en la discusión de los casos particulares a analizar. La primera de estas sugerencias consiste en favorecer la discusión explícita acerca de cuál de entre varias analogías específicas es más adecuada en relación con ciertos aspectos del modelo científico estudiado (De Vecchi y Giordan, 2006). La segunda se refiere a la utilidad de identificar los componentes específicos de las entidades comparadas y analizar cuáles tienen (o no) su equivalente en el otro campo semántico (González Labra, 1997). Esto permite hablar de los *alcances* de la analogía (aquellos componentes del campo blanco que tienen sus equivalentes en el campo fuente) y de sus *limitaciones* (aquellos componentes del campo blanco que no tienen sus equivalentes en el campo fuente) (Galagovsky y Adúriz-Bravo, 2001). Ambas estrategias sirven para facilitar la explicitación de las concepciones de las y los estudiantes y para prevenir el establecimiento de relaciones espurias entre ambos campos semánticos.

Para finalizar esta sección, diferenciaré tres modos (no excluyentes) en los que se pueden tener en cuenta las analogías en la enseñanza. El primer modo (modo 1), el más usual, consiste en utilizar una analogía meramente como un medio para facilitar el aprendizaje de un modelo. El segundo (modo 2) trata de introducir en la enseñanza el tópico metacientífico del rol histórico o psicológico de las analogías en la construcción del conocimiento científico. Es importante notar que se pueden utilizar analogías de acuerdo con los modos 1 y 2 sin asumir que las analogías analizadas son parte intrínseca

de alguna teoría científica. El tercero (modo 3), rara vez considerado, consiste en analizar una analogía en cuanto que parte no eliminable de una teoría que se va a enseñar, es decir, en cuanto que *metáfora epistémica* (Palma, 2015). Si la analogía A1 es parte de la teoría T1, esta propuesta supone la necesidad de analizar este hecho explícitamente con las y los estudiantes. Dado que el modo 1 es el más frecuentemente utilizado y analizado, agregaré algunos comentarios sobre los modos 2 y 3.

De acuerdo con el modo 2, se podría analizar con las y los estudiantes el rol que una analogía jugó en el desarrollo de una teoría (véase, por ejemplo, Noguera Solano, 2013 y Sterrett, 2002, para el caso de la analogía entre selección artificial y selección natural en Darwin). Estos análisis tienen un gran potencial para una buena enseñanza de la *naturaleza de la ciencia* (Adúriz-Bravo, 2005) por dos razones. En primer lugar, las metáforas son un vehículo privilegiado mediante el cual la cultura general, y, por lo tanto, los llamados «valores no epistémicos», influyen en la actividad científica, cuestionando así la imagen de ciencia ahistórica y neutral. En segundo lugar, la discusión sobre el razonamiento analógico da pistas sobre lo que se ha llamado el «contexto de descubrimiento», sobre cómo en la ciencia se crean nuevas hipótesis (Nersessian, 1992; Schuster, 2005). Estos aspectos contextuales y creativos del proceso científico son poco atendidos en la educación en comparación, por ejemplo, con el rol de la experimentación. Así, el recurso a las analogías en el sentido del modo 2 podría contribuir a cuestionar ciertas «visiones deformadas» de la ciencia (Fernández et al., 2002).

En relación con el modo 3, si una teoría que se va a enseñar implica una *metáfora epistémica*, entonces ese hecho también debería ser objeto de enseñanza. Las y los estudiantes deberían comprender que pensar y explicar fenómenos con cierta teoría implica *necesariamente* pensar con cierta analogía. Nótese que, aunque los modos 2 y 3 están muy relacionados, no son lo mismo: se podría enseñar qué rol jugó una analogía en la creación de una teoría, pero asumir que la teoría, en cuanto que producto, no implica la analogía en cuestión, ya que esta ha cumplido un papel de mero andamiaje temporal durante el proceso creativo. Inversamente, de acuerdo con el modo 3, uno podría analizar una teoría, mostrando cómo pensar con esa teoría implica *necesariamente* echar mano de cierta analogía, sin hacer referencia al proceso histórico de creación de dicha teoría.

A continuación, ilustraré estos análisis proponiendo algunas formas posibles de tener en cuenta las *metáforas epistémicas* en la enseñanza de algunos contenidos centrales de la biología, señalando en cada caso cuál de los tres modos antes mencionados está en juego.

ANALOGÍAS Y ENSEÑANZA DE LA BIOLOGÍA

En el caso de la enseñanza de la biología se han llevado a cabo reflexiones de índole general sobre el uso de analogías (Venville y Treagust, 1997) y algunas en relación con la enseñanza de ciertos contenidos particulares (González Galli, 2016; González Labra, 1997). Tal vez, el tópico más explorado sea el rol de las analogías en la biología evolucionista (Archibald, 2014; Evans, 1984; Gildenhuys, 2004; González Galli, 2019, 2016; Shelley, 1999; Theunissen, 2012) y las implicancias educativas de tales análisis (Pramling, 2008). En las siguientes secciones exploraré dos *metáforas epistémicas* específicas y discutiré las potenciales contribuciones de su análisis en relación con algunos problemas centrales de la enseñanza de ciertos contenidos centrales de biología y con la *naturaleza de la ciencia*.

Analogías para cuestionar el determinismo genético

Las ideas de sentido común sobre los genes suelen implicar alguna forma de determinismo genético según el cual el fenotipo de un organismo se debe totalmente a su constitución genética (Dar-Nimrod y Heine, 2011; Puig y Jiménez Aleixandre, 2015). Esta idea es, en primer lugar, científicamente insostenible (Dawkins, 2017), ya que el fenotipo resulta siempre de una compleja interacción entre

genes y entorno. En segundo lugar, se trata de una idea que tiene implicancias ideológicas negativas, ya que, por ejemplo, puede ser utilizada para apuntalar ideas eugenésicas. Por estas razones, uno de los principales objetivos de la enseñanza sería dar a las y los estudiantes las herramientas conceptuales necesarias para analizar críticamente el discurso del determinismo genético (Ageitos y Puig, 2021; Castéra y Clément, 2012; Jiménez Aleixandre, 2012; Puig y Jiménez Aleixandre, 2015). Para tal fin deberíamos enseñar adecuadamente los modelos de la biología pertinentes y, además, provocar una revisión explícita del discurso determinista recurriendo a dichos modelos. A continuación, propondré que el análisis de ciertas analogías sobre el rol de los genes en el desarrollo de los organismos puede contribuir a estos objetivos.

Partiré de asumir que la analogía informática (tal vez sería más correcto hablar de una «familia de analogías informáticas», ya que, según el contexto, se habla del genotipo como plano, como programa, como código, etc.) constituye una parte constitutiva (una *metáfora epistémica*) de los modelos de la genética. Este hecho se evidencia en la terminología estándar utilizada en esta ciencia («traducción», «transcripción», «programa», «código», etc.). Por ejemplo, Dawkins (2005, p. 132) afirma que «El ADN lleva información de un modo muy semejante al de un ordenador, y también podemos medir la capacidad del genoma en bits (...)». Por supuesto, quienes tienden a negar un valor epistémico a las analogías cuestionan este uso que en genética se hace del lenguaje informático (Mahner y Bunge, 2000). En cualquier caso, desde una epistemología naturalista (no normativista) asumiré que la analogía informática es, de hecho, una parte importante de la genética como ciencia (Keller, 2002, 2000).

La pregunta central en relación con este tema es qué rol cumplen los genes en el proceso de desarrollo del organismo, ya que la comprensión de las respuestas que la biología ofrece es una condición necesaria para comprender el carácter falaz del determinismo genético. Y dichas respuestas están plagadas de terminología informática. Según Keller (2000), fueron James Watson y Francis Crick quienes introdujeron esta analogía en su artículo clásico de 1953. La noción de «programa genético» habría sido introducida en la biología molecular por Francis Jacob y Jaques Monod en 1961 (Keller, 2002). Los actuales textos de biología sugieren que, de algún modo, el ADN contenido en la cigota contiene la *información* necesaria para construir el organismo. Sin embargo, y contra el determinismo genético, esta información solo resulta útil en cierto entorno. La biología de las últimas décadas ha tendido a enfatizar la importancia de la regulación de la actividad génica, y esos mecanismos de regulación (AA. VV., 2015) dependen en última instancia del entorno (entendido como todo aquello que no es el ADN). Así, el desarrollo es producto de la interacción entre la información genética y la influencia ambiental, que, al menos en parte, también podría concebirse en términos informáticos. Así, la información para el desarrollo estaría *distribuida* entre el ADN y el ambiente.

Pero esta perspectiva no debe hacernos olvidar que los genes sí influyen en el fenotipo (el determinismo ambiental es tan falso como el genético), lo que nos lleva de nuevo a la pregunta en relación con cómo ejercen dicha influencia, y lo dicho anteriormente sugiere como respuesta que lo hacen aportando *parte de* la información necesaria para el desarrollo. Podemos pensar esta primera respuesta como basada en una familia de analogías asociadas a la noción de información. A continuación, analizaré (siguiendo en parte a Dawkins, 2009) algunas de las analogías que forman parte de esta «familia» de analogías informáticas, centrándome en la comparación entre las analogías del genoma como un plano y el genoma como una receta.

¿Es el plano una buena analogía para comprender el rol que el genotipo juega en el desarrollo? La respuesta es negativa por varias razones. Lo más importante es que, entre un plano y el objeto que se va a construir, existe una relación de *isomorfismo*. Por ejemplo, el plano de un edificio cuya planta tiene una sección circular incluirá la representación gráfica de un círculo. Esto supone una relación de reversibilidad: podemos construir el objeto utilizando el plano, pero también podemos reconstruir el plano observando el objeto. En el caso del ADN y el fenotipo, la ausencia de isomorfismo y reversibilidad

resultan evidentes. La relación entre un plano y el objeto para cuya construcción dicho plano aporta información es mucho más rígida que la relación, extremadamente compleja y flexible y modulada por el ambiente, que existe entre el genotipo y el fenotipo. Así, el análisis de esta limitación de la analogía del plano ayuda a explicitar que el ADN no contiene *toda* la información necesaria para el desarrollo, lo que, a su vez, ayuda a evidenciar las falencias del determinismo genético.

¿Qué sucede con la analogía del genotipo como receta o programa informático? Estas analogías ayudan a poner en evidencia el carácter *inerte* del ADN, una idea fundamental para cuestionar el determinismo. La cuestión del carácter químicamente inerte del ADN es importante porque las ideas de sentido común sobre el rol de los genes suelen corresponderse con lo que Keller (2000) ha denominado el «discurso de acción de los genes». Este discurso se basa en otra analogía según la cual los genes *son como* agentes (Keller, 2002). Según Keller (2002), esto supone atribuir a los genes: 1) materialidad (en forma de partículas) y permanencia, 2) agencia (capacidad de acción), 3) reproducción (una capacidad que otorga «vitalidad» al gen) y 4) capacidad de dirección y control del desarrollo. Así, las personas suelen creer que, de algún modo, los genes *nos hacen ser* como somos. Por el contrario, de acuerdo con el modelo científico, el ADN es un tipo de sustancia especialmente inerte. Sin embargo, y por supuesto, influye en el desarrollo.

Aquí es donde la analogía informática de genotipo como receta entra en juego sugiriendo una respuesta clara y sencilla a la pregunta «¿qué hacen los genes?»: lo único que hacen es aportar información que otras entidades (las enzimas, por ejemplo), esta vez sí con capacidad de acción, utilizarán para realizar el trabajo de construcción orgánica. Consideremos las implicancias de las siguientes observaciones básicas en relación con la analogía del genotipo como una receta culinaria: a) las recetas no hacen pasteles, solo aportan información que alguien utiliza para hacerlos, y b) las recetas influyen en el producto final (el pastel), pero no lo determinan porque existen muchos otros factores ajenos a la propia receta (tales como la temperatura del horno) que influyen significativamente en el resultado final. Así, las recetas, como los genes, no construyen por sí mismas el producto final, pero influyen en —no determinan— las características de dicho producto. En ambos casos, la influencia se ejerce indirectamente, aportando información a un proceso de construcción ejecutado por otros agentes y sensible a los factores ambientales.

Un posible modo para trabajar en el aula a partir de la analogía entre el genotipo y las recetas culinarias consiste en, en una primera instancia, trabajar a partir de preguntas sobre el rol de los genes en el desarrollo para hacer explícitas las ideas intuitivas deterministas. Tras ello, se les propondría reflexionar a partir de preguntas sobre el rol de las recetas en el proceso de producción de un pastel. En una tercera instancia, se les sugeriría explicitar la analogía con preguntas tales como «¿Qué sería, en la genética, el equivalente a la receta de cocina?», «¿Qué sería equivalente a las variaciones en la temperatura del horno y sus efectos en el pastel?», etc. La discusión de este tipo de preguntas permitiría expresar los *alcances* y las *limitaciones* de la analogía. Luego, en una cuarta instancia de naturaleza metacognitiva, se les podría proponer comparar sus respuestas con las preguntas planteadas en la primera y segunda instancias de trabajo. En este momento, las y los estudiantes podrían tomar consciencia de que en el caso del desarrollo de los organismos produjeron explicaciones unicasales deterministas (basadas solo en la influencia de los genes), mientras que en el caso de la cocina fueron capaces de tomar en cuenta dos grandes conjuntos de factores causales (la receta y «todo lo demás»). Para explicitar el carácter inerte de los genes se puede preguntar al estudiantado «Si los genes —como la receta— no hacen el trabajo, ¿quién o qué lo hace?», cuestión que permitirá introducir la importancia del complejo sistema molecular que «lee» el ADN (Keller, 2002). Esta última cuestión podría abordarse introduciendo nociones de epigenética (Zudaire y Freile, 2021), pero lo central, más en general, es la idea de que el ambiente también influye en el desarrollo.

Aunque tanto la comparación entre el genotipo con un programa informático (que, por razones de espacio, no desarrollaré aquí) como con una receta culinaria pueden ser de utilidad, sugiero que esta última analogía es más adecuada debido a que comprender en qué consiste un programa informático puede resultar difícil para las y los estudiantes, y uno de los supuestos del uso didáctico de las analogías es que el «campo fuente» sea familiar y comprensible para quien aprende. En este sentido, considero que la analogía con la receta culinaria es más adecuada.

Los análisis y las discusiones precedentes se corresponderían principalmente con el modo 1 de tener en cuenta las analogías. Luego, además, podríamos discutir en las clases cómo, por qué, con qué intenciones y consecuencias, las investigadoras e investigadores introdujeron y adoptaron la analogía informática en la genética (modo 2). Finalmente, podríamos analizar con el estudiantado que la analogía informática constituye una *metáfora epistémica*, es decir, una parte no eliminable de la actual teoría genética, por ejemplo, analizando explícitamente la naturaleza informática del lenguaje técnico estándar, que por su ubicuidad (aún en los textos más técnicos) se interpreta aquí como la expresión del modelo y no como un mero recurso retórico (modo 3). Mientras que el modo 1 contribuiría a aprender en qué consisten los modelos de la genética, los modos 2 y 3 ayudarían, además, a aprender aspectos de naturaleza de la ciencia.

Analogías para regular el pensamiento teleológico

En la filosofía de la biología existe un debate sobre la naturaleza de las explicaciones basadas en el *modelo de evolución por selección natural* (MESN) (Allen y Neal, 2020; Caponi, 2003). El desarrollo de las filosofías de las ciencias específicas llevó a comprender que cada ciencia tiene aspectos idiosincráticos (Adúriz-Bravo y Erduran, 2003), y esto permitió pensar que existe una diversidad de estilos explicativos.

En relación con esta cuestión, existe otro debate sobre el rol y la legitimidad de las explicaciones teleológicas en biología. Desde la revolución científica se cuestionó la validez de las explicaciones teleológicas (Allen y otros, 1998; Díez y Moulines, 2008; Estany, 1993). Sin embargo, este tipo de explicaciones persistieron en la biología, ligadas sobre todo a las nociones de adaptación y función (Allen y otros, 1998; McLaughlin, 2003; Rosenberg y McShea, 2008). Así, al mismo tiempo que las biólogas y los biólogos, así como las y los docentes, en general niegan la validez de las explicaciones teleológicas (e insisten en que «no se dice *para*»), no dejan de utilizar expresiones y explicaciones teleológicas en sus discursos (Jacob, 1986; Mahner y Bunge, 2000). Esta situación ambigua dio lugar a un complejo debate sobre el rol y legitimidad de este tipo de explicaciones (véase Ayala, 1970; Allen y Neal, 2020; Allen et al., 1998; McLaughlin, 2003).

En este contexto, diversos análisis convergen en la conclusión según la cual el MESN implica *cierta forma de teleología científicamente legítima* (Ayala, 1970; Brandon, 1981; Caponi, 2003; Dennett, 1995; Depew, 2008; Lennox, 1993; Ruse, 2008, 2003, 2000; Short, 2002; Sober, 1996 y Walsh, 2000). Considero especialmente útil, a los fines didácticos y en relación con el tema central de este artículo, la propuesta de Ruse (2008, 2003, 2000), quien sugiere que la biología retiene cierta forma de teleología porque las explicaciones de los rasgos adaptativos basadas en el MESN implican *necesariamente* el recurso a la metáfora del diseño. Así, para Ruse, la metáfora del diseño sería una *metáfora epistémica*. De acuerdo con este autor, para construir una explicación basada en el MESN que dé cuenta de la evolución de un rasgo primero debemos observar dicho rasgo *como si* fuera producto del diseño deliberado y preguntarnos qué utilidad tiene, qué problema resuelve mejor que las versiones alternativas del rasgo. Todas estas preguntas tienen evidentes connotaciones teleológicas. Así, aunque las versiones más técnicas de la explicación no incluyan términos teleológicos, solo es posible construir dichas explicaciones porque antes se analizó el organismo *como si* fuera un producto de diseño.

Por otro lado, la investigación muestra que las y los estudiantes tienen concepciones teleológicas sobre el dominio biológico fuertemente resistentes al cambio (González Galli y Meinardi, 2015, 2011; Kampourakis, 2014; Settlage, 1994). En la mayor parte de la literatura se ha supuesto que dichas concepciones son erróneas, sin matices, porque se asumió el rechazo a toda forma de teleología establecido por la filosofía de la ciencia clásica. Esto, a su vez, llevó en la enseñanza a plantear el objetivo de eliminar las concepciones teleológicas y censurar sus expresiones. Sin embargo, este enfoque ha sido cuestionado en los últimos años por dos razones principales (González Galli, Pérez y Gómez Galindo, 2020). En primer lugar, desde el punto de vista psicológico, los razonamientos teleológicos son una parte central, funcional y constitutiva de la cognición humana (Kelemen, 2012). En segundo lugar, desde una perspectiva epistemológica –y por las razones expuestas en los párrafos precedentes–, no es cierto que los razonamientos teleológicos no cumplan un rol importante y legítimo en la biología actual.

Por supuesto, muchas ideas del alumnado son erróneas, *además de* teleológicas. Pero el reconocimiento de que el propio MESN es, en algún sentido, teleológico obliga a distinguir diversas formas de teleología y a preguntarnos cuáles son compatibles con el modelo científico y cuáles no. Este análisis ha llevado a proponer que el pensamiento teleológico funciona como un obstáculo epistemológico (González Galli y Meinardi, 2011) y que el principal objetivo didáctico sería el desarrollo por parte de las y los estudiantes de una «vigilancia metacognitiva» sobre dicho modo de pensar (González Galli, Pérez y Gómez Galindo, 2020). Esta capacidad consiste en saber qué es un razonamiento teleológico, en poder reconocer sus múltiples y diversas expresiones, y en saber evaluar en qué casos es adecuado recurrir a dicho razonamiento. Con respecto a esto último, la o el estudiante debería ser capaz de evaluar la adecuación de cada expresión teleológica en relación con la consistencia con el MESN.

Para ayudar al conjunto de los alumnos a autorregular sus intuiciones teleológicas, se puede realizar un trabajo que incluya los siguientes momentos: 1) una explicitación de las concepciones teleológicas (a partir, por ejemplo, de una pregunta sobre el origen de alguna adaptación, del tipo: «¿Cómo podrían explicar el origen del notable parecido entre la coloración de un saltamontes y el del entorno en el que vive?»); 2) un trabajo explícito sobre la teleología (para este objetivo se puede ofrecer al estudiantado una definición sencilla y algunos ejemplos claros); 3) la identificación en sus respuestas a las primeras preguntas de expresiones teleológicas (para tal fin, deberían utilizar las ideas consensuadas en el segundo momento); y 4) una discusión de la «corrección científica» de sus ideas teleológicas (aquí se trata de pedirles explícitamente que analicen en qué medida esas ideas son o no compatibles con el MESN). Los momentos 3 y 4 son de naturaleza metacognitiva, y es ese tipo de trabajo didáctico el que puede favorecer una autorregulación del obstáculo epistemológico que facilite un buen aprendizaje del modelo científico (Astolfi y Peterfalvi, 2001; González Galli, Pérez y Gómez Galindo, 2020). Ahora bien, ¿cómo entra en juego en este esquema de trabajo el recurso a la metáfora del diseño? La propuesta es que, en algún momento, se puede introducir la idea de que cuando pensamos sobre los seres vivos tendemos a producir explicaciones teleológicas porque, intuitivamente y de un modo no consciente, pensamos en los organismos y sus partes *como si* fueran objetos de diseño, *como si* fueran artefactos producto del diseño humano. En otros trabajos (González Galli, 2019, 2016), hemos sugerido que la explicitación de este aspecto de nuestra cognición podría ayudar a las y los estudiantes a tomar conciencia de sus sesgos teleológicos, lo que, a su vez, contribuiría al desarrollo de la mencionada «vigilancia metacognitiva». La principal razón por la que esta toma de conciencia podría ayudar a un buen aprendizaje del MESN es que el *campo fuente* de la analogía (el diseñador y sus obras) implica un componente intencional ausente en el *campo blanco*, lo que obliga a analizar el modelo científico para pensar cómo es que tanto el proceso de diseño como la selección natural producen entidades complejas y funcionales, aunque este último proceso carezca de todo componente intencional.

Es importante destacar que, contra las propuestas que tienden a censurar el lenguaje y el pensamiento teleológicos en el aula, el tipo de trabajo didáctico propuesto implica fomentar su uso y explicitación (González Galli, 2019; González Galli, Ginnobili, Ariza, 2022; González Galli, Pérez y Gómez Galindo, 2020). Esta estrategia supone el riesgo de que se concluya, erróneamente, que «no hay ningún problema con la teleología». Sin embargo, el desarrollo de la «vigilancia metacognitiva» incluye la evaluación crítica –basada en los modelos científicos– de qué formas de teleología son científicamente aceptables y cuáles no lo son. Específicamente, en relación con la teoría de la evolución, las y los estudiantes deberían comprender claramente que –contra lo que muchas personas creen– las mutaciones no se producen preferentemente en sentido adaptativo, que el proceso evolutivo como un todo no está dirigido a ciertos fines predeterminados, y que los procesos evolutivos no están guiados por ninguna forma de intencionalidad (para analizar este último punto es útil abordar la analogía entre la selección natural y la selección artificial, ya que en este último caso el proceso de cambio sí es orientado por la intención humana) (véase González Galli, 2019, 2016; González Galli, Pérez y Gómez Galindo, 2020). Así, por ejemplo, el estudiantado debería comprender que la expresión «las bacterias mutaron para resistir al antibiótico» es teleológica y, además, incorrecta por ser incompatible con el modelo científico (en este caso el MESN). Por el contrario, debería comprender que la expresión «Los osos polares son blancos porque el color blanco sirve para camuflarse en un ambiente nevado» es tan teleológica como la anterior, pero, a diferencia de aquella, podría ser correcta (por ser compatible con el MESN). En general, podrían considerarse aceptables aquellas expresiones teleológicas que se refieran a las razones por las cuales cierta variante de un rasgo fue seleccionada. Estas cuestiones deben ser explícitamente abordadas en las clases para prevenir confusiones acerca del rol de la teleología en la biología.

Estos análisis serían un ejemplo del modo 1 de tener en cuenta la metáfora del diseño en la enseñanza de la biología evolucionista. Con respecto a los otros modos de considerar esta analogía, por ejemplo, el análisis de los textos de Darwin permitiría además discutir el rol que esta analogía ha jugado en la historia de la biología, lo que contribuiría a enriquecer la imagen de la ciencia (modo 2) (véanse Ginnobili, González Galli y Ariza, 2021; González Galli, 2014). Finalmente, se podría discutir con el alumnado el hecho de que la analogía del diseño no constituye solo un recurso al que Darwin (y las biólogas y biólogos desde entonces) echó mano en el proceso de creación científica, o de comunicación de la teoría, sino que dicha analogía forma parte de la teoría, es decir, la metáfora del diseño de la que habla Ruse (2000) constituye lo que Palma (2015) denomina una *metáfora epistémica*: aún en la biología actual, no se puede utilizar la teoría sin recurrir (en general de un modo implícito) a dicha analogía (modo 3). Al igual que en el caso de la genética, estos análisis contribuirían tanto al aprendizaje de un modelo científico como de aspectos de naturaleza de la ciencia.

CONCLUSIONES

En este trabajo partí de la perspectiva epistemológica según la cual las analogías son parte intrínseca de la ciencia. Esta conclusión (junto con algunas consideraciones psicológicas) basta para afirmar que la enseñanza de las ciencias naturales no puede pretender evitar completamente el recurso a las analogías. Quise mostrar también que un análisis más detallado del rol de las analogías en la ciencia puede darnos pistas más específicas acerca de cómo tener en cuenta esta cuestión en la enseñanza. Luego distinguí tres modos de tener en cuenta las metáforas y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. En la literatura sobre DCN suele mencionarse la utilidad de las analogías como recurso didáctico para un mejor aprendizaje de los modelos científicos (modo 1). Pero esto es aún compatible con una mirada epistemológica totalmente adversa en relación con las analogías: el recurso a la analogía podría ser simplemente una herramienta para, finalmente, alcanzar un ideal de conocimiento literal, con lo que las analogías quedan como un mero andamiaje temporal. Sin embargo, el creciente reconocimiento

del rol de las analogías en las ciencias ha llevado a que en la DCN se valore también el análisis de dicho rol en la ciencia, por ejemplo, como un elemento central en relación con los aspectos creativos de la ciencia o en relación con los modos en los que la cultura general influye en la ciencia (modo 2). Luego he defendido la perspectiva según la cual algunas analogías o metáforas (*metáforas epistémicas*) constituyen una parte no eliminable de los propios modelos científicos. De esto último se infiere otra implicancia importante para la didáctica: aprender una teoría supone aprender también qué analogías la integran y qué rol cumplen en los análisis y explicaciones derivados de la teoría en cuestión (modo 3). Finalmente, ilustré de qué modo estos análisis pueden contribuir a la enseñanza, e indiqué cómo tener presente la analogía informática puede ayudar a repensar la enseñanza de la genética para tender a una mirada crítica sobre el determinismo genético, así como la manera en que tener presente la analogía del diseño puede contribuir a una mejor enseñanza de la biología evolucionista en relación con el problema de la teleología. Aunque en este artículo, por cuestiones de espacio, no se profundizó en este aspecto, quisiera destacar el valor de estas propuestas en relación con los aprendizajes sobre la naturaleza de la ciencia, al destacar que las analogías son centrales en la ciencia como proceso y como producto, al ayudar a comprender cómo se crean nuevas hipótesis científicas (¿mediante un proceso cognitivo que todas las personas utilizamos habitualmente!) y, finalmente, al mostrar cómo la cultura en general influye en la ciencia (ofreciendo ciertos «campos fuente» que, mediante las analogías, influyen en la creación de nuevas hipótesis científicas).

La experiencia y algunas de las investigaciones citadas aportan señales alentadoras en relación con las propuestas que aquí ofrezco. Sin embargo, se necesitan análisis epistemológicos detallados que ayuden a dilucidar el rol que ciertas analogías juegan en teorías específicas, así como estudios empíricos para evaluar los resultados de la implementación de actividades basadas en este marco teórico. Espero que este texto aporte algunos elementos útiles a la discusión y contribuya a motivar nuevas investigaciones.

REFERENCIAS

- AA. VV. (2015). Epigenética. La herencia más allá de los genes. *Investigación y Ciencias*, 81.
- Adúriz-Bravo, A. (2005). *Una introducción a la naturaleza de la ciencia*. Fondo de Cultura Económica.
- Adúriz-Bravo, A. y Ariza, Y. (2014). Una caracterización semanticista de los modelos científicos para la ciencia escolar. *Bio-grafía. Escritos sobre la Biología y su Enseñanza*, 7(13), 25-34.
<https://doi.org/10.17227/20271034.vol.7num.13bio-grafia25.34>
- Adúriz-Bravo, A. y Erduran, S. (2003). La epistemología específica de la Biología como disciplina emergente y su posible contribución a la didáctica de la Biología. *Revista de Educación en Biología*, 6(1), 9-14.
- Ageitos, N. y Puig, B. (2021). Análisis del determinismo en una tarea de Genética sobre una enfermedad animal. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 39(1), 33-50.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3315>
- Allen, C. y Neal, J. (2020). Teleological Notions in Biology. En E. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2020 Edition)* (página web). Recuperado el 6 de enero de 2022 de <https://plato.stanford.edu/archives/spr2020/entries/teleology-biology/>
- Allen, C., Bekoff, M. y Lauder, G. (Eds.). (1998). *Nature's purposes. Analyses of Function and Design in Biology*. MIT Press.
- Archibald, D. (2014). *Aristotle's ladder, Darwin's tree. The evolution of visual metaphors for biological order*. Columbia University Press.

- Astolfi, J. y Peterfalvi, B. (2001). Estrategias para trabajar los obstáculos: dispositivos y resortes. En A. Camilloni (Ed.), *Los obstáculos epistemológicos en la enseñanza* (pp. 191-223). Gedisa.
- Aubusson, P., Harrison, A. y Ritchie, S. (2006). *Metaphor and analogy in science education*. Springer.
- Ayala, F. (1970). Teleological explanations in evolutionary biology. *Philosophy of Sciences*, 37(1), 1-15.
- Bradie, M. (1999). Science and metaphor. *Biology and Philosophy*, 14(2), 159-166.
<https://doi.org/10.1023/A:1006601214943>
- Brandon, R. (1981). Biological teleology: Questions and explications. *Studies in History and Philosophy of Science*, 12(2), 91-105. [https://doi.org/10.1016/0039-3681\(81\)90015-7](https://doi.org/10.1016/0039-3681(81)90015-7)
- Brown, D. y Clement, J. (1989). Overcoming misconceptions via analogical reasoning: abstract transfer versus explanatory model construction. *Instructional Science*, 18(4), 237-261.
<https://doi.org/10.1007/BF00118013>
- Caponi, G. (2003). Darwin: entre Paley y Demócrito. *História, Ciências, Saúde. Manguinhos*, 10(3), 993-1023.
<https://doi.org/10.1590/S0104-59702003000300010>
- Castéra, J. y Clément, P. (2012). Teachers' Conceptions About the Genetic Determinism of Human Behaviour: A Survey in 23 Countries. *Science & Education*, 23(2), 417-443.
<https://doi.org/10.1007/s11191-012-9494-0>
- Clement, J. (1993). Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with student's preconception in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(10), 1241-1257.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660301007>
- Dagher, Z. (1995). Analysis of analogies used by science teachers. *Journal of Research in Science Teaching*, 32(3), 259-270.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660320306>
- Dar-Nimrod, I. y Heine, S. (2011). Genetic essentialism: on the deceptive determinism of DNA. *Psychological bulletin*, 137(5), 800-818.
<https://doi.org/10.1037/a0021860>
- Dawkins, R. (2005). *El capellán del Diablo. Reflexiones sobre la esperanza, la mentira, la ciencia y el amor*. Gedisa.
- Dawkins, R. (2009). *Evolución. El mayor espectáculo sobre la Tierra*. Espasa Calpe.
- Dawkins, R. (2017). *El fenotipo extendido. El largo alcance del gen*. Capitán Swing.
- De Vecchi, G. y Giordan, A. (2006). *Guía práctica para la enseñanza científica*. Díada.
- Dennett, D. (1995). *Darwin's dangerous idea: Evolution and the meanings of Life*. Simon and Schuster.
- Depew, D. (2008). Consequence etiology and biological teleology in Aristotle and Darwin. *Studies in History and Philosophy of Biology and Biomedical Sciences*, 39, 379-390.
<https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2008.09.001>
- Díez, J. y Moulines, U. (2008). *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. Ariel.
- Else, M., Clement, J. y Rea-Ramirez, M. (2008). Using Analogies in Science Teaching and Curriculum Design: Some Guidelines. En J. Clement. y M. Rea-Ramirez (Eds.), *Model Based Learning and Instruction in Science* (pp. 215-232). Springer.
- Estany, A. (1993). *Introducción a la filosofía de la ciencia*. Grijalbo-Mondadori.
- Evans, L. (1984). Darwin's Use of the Analogy between Artificial and Natural Selection. *Journal of the History of Biology*, 17(1), 113-140.
[https://doi.org/10.1016/S1369-8486\(01\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S1369-8486(01)00039-5)
- Fernández, I., Gil, D., Carrascosa, J., Cachapuz, A. y Praia, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 20(3), 477-488.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3962>

- Galagovsky, L. y Adúriz-Bravo, A. (2001). Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 19(2), 231-242.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4000>
- Gentner, D. (1999). Analogy. En R. Wilson y F. Keil (Eds.), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences* (pp. 17-20). The MIT Press.
- Giere, R. (1992). *La explicación de la Ciencia*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Giere, R. (1999a). Del realismo constructivo al realismo perspectivo. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, número extra, 9-13.
- Giere, R. (1999b). Un nuevo marco para enseñar el razonamiento científico. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, número extra, 63-70.
- Gildenhuys, P. (2004). Darwin, Herschel, and the role of analogy in Darwin's origin. *Studies in History and Philosophy of Biology and Biomedical Sciences*, 35(4), 593-611.
<https://doi.org/10.1016/j.shpsc.2004.09.002>
- Ginnobili, S., González Galli, L. y Ariza, Y. (2021). Do What Darwin Did. *Science & Education*.
<https://doi.org/10.1007/s11191-020-00186-8>
- Glucksberg, S. (1999). Metaphor. En R. Wilson y F. Keil (Eds.), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences* (pp. 535-537). The MIT Press.
- González Galli, L. (2014). «Darwin teleólogo» y «el eclipse del darwinismo»: dos casos para repensar la historia del evolucionismo. En M. Quintanilla Gatica, S. Daza Rosales y H. Cabrera Castillo (Comps.), *Historia y filosofía de la ciencia. Aportes para una «nueva aula de ciencias», promotora de ciudadanía y valores* (pp. 266-284). Bellaterra / Sociedad Chilena de Didáctica, Historia y Filosofía de la Ciencia.
- González Galli, L. (2016). El problema de la teleología y la metáfora del diseño en Biología: cuestiones epistemológicas e implicancias didácticas. *TED (Tecné, Episteme y Didaxis)*, 40.
<https://doi.org/10.17227/01203916.6151>
- González Galli, L. (2019). Permitido decir «para»: el problema de la teleología en la enseñanza de la Biología. *Revista Científica*, 34(1).
<https://doi.org/10.14483/23448350.13710>
- Gonzalez Galli, L., Ginnobili, S. y Ariza, Y. (2022). Los estudiantes como teleólogos predarwinianos: una propuesta para abordar el problema de la teleología en la enseñanza de la Biología. *Revista de Investigación en Educación*, 20, 188-203.
<https://doi.org/10.35869/reined.v20i2.4225>
- González Galli, L. y Meinardi, E. (2011). The Role of Teleological Thinking in Learning the Darwinian Model of Evolution. *Evolution: Education and Outreach*, 4(1), 145-152.
<https://doi.org/10.1007/s12052-010-0272-7>
- González Galli, L. y Meinardi, E. (2015). Obstáculos para el aprendizaje del modelo de evolución por selección natural en estudiantes de escuela secundaria de Argentina. *Ciencia y Educação*, 21(1), 101-122.
<https://doi.org/10.1590/1516-731320150010007>
- González Galli, L., Pérez, G. y Gómez Galindo, A. (2020). The self-regulation of teleological thinking in natural selection learning. *Evolution Education & Outreach*, 13(6).
<https://doi.org/10.1186/s12052-020-00120-0>
- Glucksberg, S. (1999). Metaphor. En R. Wilson y F. Keil (Eds.), *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences* (pp. 535-537). The MIT Press.
- González Labra, M. (1997). *Aprendizaje por analogía. Análisis del proceso de Inferencia Analógica para la adquisición de nuevos conocimientos*. Editorial Trotta.

- Hoffman, R. (1980). Metaphor in Science. En R. Honeck y R. Hoffman (Eds.), *Cognition and Figurative Language* (pp. 393-423). Routledge.
- Hofstadter, D. y Sander, E. (2018). *La analogía. Motor del pensamiento*. Tusquets.
- Izquierdo Aymerich, M. y Adúriz-Bravo, A. (2021). Contribuciones de Giere a la reflexión sobre la educación científica. *ArtefaCToS. Revista de Estudios sobre la Ciencia y la tecnología*, 10(1), 75-87.
<https://doi.org/10.14201/art20211017587>
- Jacob, F. (1986). *La lógica de lo viviente*. Salvat.
- Jiménez Aleixandre, M. (2012). Determinism and Underdetermination in Genetics: Implications for Students' Engagement in Argumentation and Epistemic Practices. *Science & Education*, 23(2).
<https://doi.org/10.1007/s11191-012-9561-6>
- Kampourakis, K. (2014). *Understanding evolution*. Cambridge University Press.
- Kelemen, D. (2012). Teleological minds: How natural intuitions about agency and purpose influence learning about evolution. En K. Rosengren, S. Brem, E. Evans y G. Sinatra (Eds.), *Evolution challenges. Integrating research and practice in teaching and learning about evolution* (pp. 66-92). Oxford: Oxford University Press.
- Keller, E. (2000). *Lenguaje y vida. Metáforas de la Biología en el siglo XX*. Manantial.
- Keller, E. (2002). *El siglo del gen. Cien años de pensamiento genético*. Península.
- Lakoff, G. y Johnson, M. (2012). *Metáforas en la vida cotidiana*. Cátedra.
- Lennox, J. (1993). Darwin was a teleologist. *Biology and Philosophy*, 8, 409-421.
<https://doi.org/10.1007/BF00857687>
- Linares, R. e Izquierdo Aymerich, M. (2006). El rescate de la princesa encerrada en lo más alto de la más alta torre. Un episodio para aprender sobre analogías, símiles y metáforas. *El Hombre y la Máquina*, 27, 24-37.
- Mahner, M. y Bunge, M. (2000). *Fundamentos de Biofilosofía*. México D. F.: Siglo XXI.
- McLaughlin, P. (2003). *What Functions Explain. Functional Explanation and Self-Reproducing System*. Cambridge University Press.
- Nersessian, N. (1992). How Do Scientists Think? Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science. En R. Giere (Ed.), *Cognitive Models of Science* (pp. 3-44). University of Minneapolis Press.
- Noguera Solano, R. (2013). The metaphor of the architect in Darwin: Chance and free will. *Zygon*, 48(4), 859-874.
<https://doi.org/10.1111/zygo.12045>
- Oliva, J. (2004). El pensamiento analógico desde la investigación educativa y desde la perspectiva del profesor de ciencias. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 3(3), 363-384.
- Oliva, J., Aragón, M., Mateo, D. y Bonat, M. (2001). Una propuesta didáctica basada en la investigación para el uso de las analogías en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 19(3), 453-470.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3994>
- Oliva-Martínez, J. y Aragón-Méndez, M. (2009). Contribución del aprendizaje con analogías al pensamiento modelizador de los alumnos en ciencias: marco teórico. *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 27(2), 195-208.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3731>
- Ortony, A. (Ed.). (1993). *Metaphor and thought*. Cambridge University Press.
- Palma, H. (2007). *Metáforas en la evolución de las ciencias*. Jorge Baudino.
- Palma, H. (2015). *Ciencia y metáforas. Crítica de una razón incestuosa*. Prometeo Libros.
- Pinker, S. (2007). *El mundo de las palabras. Una introducción a la naturaleza humana*. Paidós.

- Pramling, N. (2008). The role of metaphor in Darwin and the implications for teaching evolution. *Science Education*, 93(3), 535-547.
<https://doi.org/10.1002/sce.20319>
- Puig, B. y Jiménez Aleixandre, M. (2015). El modelo de expresión de los genes y el determinismo en los libros de texto de ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 12(1), 55-65.
https://doi.org/10.25267/rev_eureka_ensen_divulg_cienc.2015.v12.i1.05
- Rosenberg, A. y McShea, D. (2008). *Philosophy of Biology. A Contemporary Introduction*. Routledge.
- Ruse, M. (1994). *Tomándose a Darwin en serio*. Salvat.
- Ruse, M. (2000). Teleology: Yesterday, today, and tomorrow? *Studies in History and Philosophy of Biological & Biomedical Sciences*, 31(1), 213-232.
[https://doi.org/10.1016/S1369-8486\(99\)00046-1](https://doi.org/10.1016/S1369-8486(99)00046-1)
- Ruse, M. (2003). *Darwin and design. Does evolution have a purpose?* Harvard University Press.
- Ruse, M. (2008). *Charles Darwin*. Katz.
- Sober, E. (1996). *Filosofía de la biología*. Alianza.
- Schuster, F. (2005). Metáfora y analogía en el descubrimiento científico. En Klimovsky, G. (Comp.). *Los enigmas del descubrimiento científico* (pp. 63-80). Alianza.
- Settlage, J. (1994). Conceptions of Natural Selection: A Snapshot of the Sense-Making Process. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(5), 449-457.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660310503>
- Shelley, C. (1999). Multiple analogies in evolutionary biology. *Studies in History and Philosophy of Biology and Biomedical Sciences*, 30(2), 143-180.
<https://doi.org/10.1075/hcp.11>
- Short, T. (2002). Darwin's concept of final cause: neither new nor trivial. *Biology and Philosophy*, 17(3), 322-340.
<https://doi.org/10.1023/A:1020173708395>
- Sterrett, S. (2002). Darwin's analogy between artificial and natural selection: How does it go? *Studies in History and Philosophy of Biology and Biomedical Sciences*, 33(1), 151-168.
[https://doi.org/10.1016/S1369-8486\(01\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S1369-8486(01)00039-5)
- Taylor, C. y Dewsbury, B. (2018). On the Problem and Promise of Metaphor Use in Science and Science Communication. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 19(1).
<https://doi.org/10.1128/jmbe.v19i1.1538>
- Thagard, P. (1995). *Mental leaps: Analogy in creative thought*. Cambridge: MIT Press.
- Theunissen, B. (2012). Darwin and his pigeons. The analogy between artificial and natural selection revisited. *Journal of the History of Biology*, 45(2), 179-212.
<https://doi.org/10.1007/s10739-011-9310-8>
- Venville, G. y Treagust, D. (1997). Analogies in Biology Education: A Contentious Issue. *The American Biology Teacher*, 59(5), 282-287.
<https://doi.org/10.2307/4450309>
- Walsh, D. (2000). Chasing Shadows: Natural Selection and Adaptation. *Studies in. History and Philosophy of Sciences*, 31(1), 135-153.
[https://doi.org/10.1016/S1369-8486\(99\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S1369-8486(99)00041-2)
- Zudaire, I. y Napal Fraile, M. (2021). Exploring the Conceptual Challenges of Integrating Epigenetics in Secondary-Level Science Teaching. *Research in Science Education*, 51, 957-974.
<https://doi.org/10.1007/s11165-019-09899-5>

Analogies and Teaching of Genetics and Evolutionary Biology

Leonardo González Galli

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina
Instituto de Investigaciones CeFIEC, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
leomgalli@gmail.com

The aim of this article is to review the ways of considering metaphors and analogies when teaching natural sciences and to illustrate the importance of this topic for the cases of genetics and evolutionary biology. Drawing on the analysis of the literature in epistemology and history of science, as well as on cognitive psychology and didactics of natural sciences, it is proposed to distinguish three ways of teaching natural sciences by means of metaphors and analogies. According to the first mode, metaphors and analogies are understood as a mere resource to facilitate the understanding and learning of a certain scientific model. The second mode, related to the nature of science, consists in analyzing the role of metaphors and analogies in the history of science. This second mode involves, for example, working in the classroom how scientists have used metaphors and analogies for different purposes, including as a way of creating new hypotheses. The third mode, also related to the nature of science, explicitly analyzes in the classroom the role which certain analogies –the so-called *epistemic metaphors*– play as an intrinsic and non-removable part of certain theories. While the first two teaching modes –especially the first one– have been addressed extensively in the didactic literature, the third mode has hardly been mentioned. These general analyses are then brought into play in a discussion of possible contributions to the teaching of genetics and evolutionary biology. In relation to the teaching of genetics, it is argued that classroom work based on informatic analogies, which consist in comparing the genotype with a recipe, an architectural plan or a computer program, can be useful for students to develop a critical view of genetic determinism. This is mainly because such analogies make it clear that the information necessary for the development of an organism is distributed between the genotype and the environment, as well as highlighting the inert nature of genes. With regards to teaching evolutionary biology, the usefulness of analogies and metaphors based on design, which contribute to the metacognitive regulation of teleological thinking, is analyzed. The tendency of people to produce teleological explanations is well documented both in research on cognitive psychology and in the didactics of biology. Against didactic proposals that assume teleology has no legitimate role in evolutionary biology and, therefore, teaching should seek to make students abandon this type of reasoning, this paper draws on certain analyses of the epistemology of biology to argue that, in fact, certain forms of teleology are part of biology and, more specifically, of the model of evolution by natural selection. One way to account for the latter is to understand that in order to produce explanations with the model of evolution by natural selection one must necessarily resort to the metaphor of design, which consists of looking at living beings and their parts as if they were objects of design. Assuming that the elimination of students' teleological thinking is neither possible nor desirable, it is argued that the main didactic objective is to encourage students' metacognitive regulation of this type of reasoning. In relation to the latter objective, it is suggested that explicit discussion in class of the role that the design metaphor plays in the model of evolution by natural selection could contribute to the development of such metacognitive capacity. In both cases, for genetics and for evolutionary biology, the chosen analogies constitute «epistemic metaphors», which allows us to illustrate the three different ways of teaching with metaphors and analogies in mind.



Emociones y adquisición de conocimiento sobre la luz y los colores mediante un aprendizaje basado en proyectos en educación primaria

Emotions and the Acquisition of Light and Colours through Project-based Learning in Primary Education

Ainhoa Arana-Cuenca, Carmen Romero-García

Departamento de Didáctica de las Matemáticas y Ciencias Experimentales. Facultad de Educación - Universidad Internacional de La Rioja
ainhoa.arana@unir.net, mariaadelcarmen.romero@unir.net

Sonia Pérez Andrés, Elena Marcilla García

CEIP Filósofo Séneca

sperezandres@educa.madrid.org, elena.marcillagarcia@educa.madrid.org

RESUMEN • El objetivo de este trabajo ha sido analizar el efecto de un aprendizaje basado en proyectos, utilizando el método científico, en la enseñanza de los contenidos sobre la luz y los colores y las emociones experimentadas por el alumnado. En la experiencia participaron 32 alumnos de 5.º y 6.º de educación primaria. Se utilizó una metodología cuantitativa, con un diseño preexperimental pretest y posttest. Los resultados muestran que hubo un efecto alto al aumentar los conocimientos adquiridos por los estudiantes tras la implementación de la propuesta. La actividad se ha valorado de forma muy positiva, especialmente en las dimensiones de interacción-colaboración y aprendizaje. Además, ha generado emociones positivas con un efecto alto sin modificación de las emociones negativas. Dichos resultados no se vieron influidos por el sexo o el curso al que pertenecían los estudiantes.

PALABRAS CLAVE: Aprendizaje basado en proyectos; Método científico; Luz y color; Emociones; Educación Primaria.

ABSTRACT • The aim of this work has been to analyze the effect of project-based learning, using the scientific method, on improving the learning process of light and colours and on the emotions experienced by the students. Thirty-two 5th and 6th grade primary school students participated in the experience. A quantitative methodology was used, with a pre-experimental pretest and post-test design. The results show that there was a high effect on increasing the knowledge acquired by the students after the implementation of the proposal. They rated the activity very positively, especially in the dimensions of interaction-collaboration and learning. It also generated positive emotions with a high effect without modifying negative emotions. These results were not influenced by gender or the grade to which the students belonged.

KEYWORDS: Project-based learning; Scientific method; Light and colours; Emotions; Primary education.

Recepción: junio 2022 • Aceptación: diciembre 2022 • Publicación: marzo 2023

Arana-Cuenca, A., Romero-García, C., Pérez Andrés, S. y Marcilla García, E (2023). Emociones y adquisición de conocimiento sobre la luz y los colores mediante un aprendizaje basado en proyectos en educación primaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 41(1), 79-100.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5723>

INTRODUCCIÓN

Las ciencias de la naturaleza vinculan al individuo con el entorno que le rodea, lo que le permite acercarse a la comprensión de los fenómenos objeto de estudio que se presentan en sus contextos de aprendizaje (Caravaca, 2010). Para que la enseñanza de las ciencias sea eficaz y se pueda conseguir del alumnado una alfabetización científica que le permita explorar la naturaleza y comprender los fenómenos naturales, se deben utilizar procedimientos similares a los de los científicos, siendo una estrategia útil el método científico (Astuti et al., 2018). Dicho método constituye una estrategia eficaz para trabajar los contenidos de ciencias, lo que permite que el alumnado aprenda un método de trabajo, aunque adaptado, similar al que utilizan los científicos (García-Carmona y Acevedo-Díaz, 2018).

Sin embargo, la enseñanza de las ciencias tiene como inconveniente la gran desmotivación que genera, debido al uso de un lenguaje científico complejo y a la abundancia de conceptos abstractos (Yllana-Prieto et al., 2021). Asimismo, los estudiantes cometen errores conceptuales que vienen respaldados por concepciones alternativas (Carrascosa, 2005). En física, y más específicamente en el estudio de la luz y los colores, se han identificado preconceptos que hacen referencia a que la luz puede desaparecer o multiplicarse o sobre la disociación luz-color (Torre-Marín et al., 2013). Asimismo, se ha descrito la dificultad que tiene el alumnado de educación primaria para diferenciar el color producido por la luz y el de la mezcla de pigmentos (Martini, 2019), por lo que se han propuesto estrategias didácticas para intentar modificar dicho comportamiento (Torre-Marín et al., 2015; Pujalte et al., 2010; Walz et al., 2016; Jelinek, 2022); entre ellas, la participación activa del estudiante constituye un nexo común para la mejora de la competencia científica.

Por lo tanto, el uso de metodologías activas motiva y promueve el aprendizaje significativo de las ciencias, favorece el pensamiento reflexivo (Klisch et al., 2012) y evita la generación de concepciones alternativas. Entre las diferentes metodologías activas, el aprendizaje basado en proyectos (ABP) se presenta como idónea para la enseñanza de las ciencias, pues fomenta habilidades como el pensamiento reflexivo y crítico, el trabajo en grupo, la comunicación, la creatividad y la innovación (Pedrinaci et al., 2012), necesarias para trabajar la alfabetización científica, por lo que existe un gran paralelismo entre las fases requeridas para desarrollar un proyecto y las fases del método científico. Se caracteriza por que el alumnado adopta un papel protagonista, al tener que buscar soluciones a situaciones de aprendizaje que implican estrategias de búsqueda de información, la toma de decisiones y la aplicación de los conocimientos adquiridos en contextos reales. El docente, por su parte, adopta un papel de mediador entre el alumnado y los conocimientos que se van a aprender (Moya-Mata y Peirats, 2019). Se puede aplicar en cualquier etapa del sistema educativo, pero es muy recomendable iniciar al alumnado en esta metodología en la etapa de educación primaria, dada la gran motivación que genera y la posibilidad que ofrece de conectar los aprendizajes del aula con la vida real (Julian et al., 2017).

Diferentes estudios han constatado su efectividad en educación primaria en diferentes áreas, y lo proponen como un método didáctico integrador del aprendizaje (Anasagasti y Berciano, 2022).

Finalmente, el ABP conecta la dimensión cognitiva con la emocional, aspecto importante, pues el aprendizaje depende en gran medida de las emociones que experimentamos. Las emociones han sido objeto de análisis en el ámbito educativo con el fin de estudiar la ansiedad provocada por la evaluación y el rendimiento, así como la relación que tiene la emoción con la motivación con respecto al éxito y el fracaso académico (Pekrun, 2005). Con el creciente interés en las habilidades interpersonales y las competencias emocionales, esta tendencia está cambiando, y se otorga a las emociones un papel clave en el proceso de enseñanza-aprendizaje (Li et al., 2020). Las metodologías activas y participativas potencian en el alumnado el nivel de emociones positivas, mientras que las metodologías tradicionales basadas en el modelo de transmisión-recepción favorecen emociones negativas. Este aspecto es

importante, pues los estados emocionales positivos favorecen el aprendizaje activo en el aula, mientras que los negativos lo limitan (González-Gómez, et al., 2018; Del Rosal et al., 2019).

Sin embargo, el efecto de las metodologías activas sobre las emociones positivas depende de los contenidos trabajados, pues determinados contenidos asociados al área de la física, como la luz y los colores, se han asociado a emociones negativas a pesar del uso de metodologías activas (Del Rosal y Bermejo, 2018). Por lo expuesto anteriormente, en este artículo se seleccionan los contenidos de la luz y los colores para diseñar un proyecto basado en el método científico para el alumnado de 5.º y 6.º de Educación Primaria. Se pretende evaluar su efecto sobre el aprendizaje de estos contenidos, así como analizar el cambio en las emociones experimentadas por el alumnado participante en una experiencia de ABP.

MARCO TEÓRICO

Aprendizaje basado en proyectos

El actual paradigma educativo implica la utilización de metodologías activas, como el aprendizaje basado en proyectos, que se caracteriza por que el alumnado se enfrenta a una situación compleja planteada por el docente, que implica un proceso de investigación. Kilpatrick (1918) propone el ABP como una forma de motivar al alumnado utilizando su potencial innato para formarles como ciudadanos responsables. Según García-Varcácel y Basilotta (2017), el ABP puede definirse como una modalidad de enseñanza centrada en el aprendizaje de conocimientos y habilidades. Parte de una pregunta guía o cuestión inicial, que debe generar interés y curiosidad en el alumnado, sobre el que se diseñan distintas actividades reflexivas, que tienen como objetivo principal la obtención de un producto final, que da respuesta a la cuestión inicial y mediante el cual el estudiantado genera conocimiento (Juanengsih et al., 2018). Durante el proyecto, el alumnado desarrolla estrategias de indagación, pues debe buscar fuentes o métodos para obtener respuestas, y logra resultados propios (Soria et al., 2019). Este componente de investigación hace que el proceso sea creativo y requiere un papel activo y crítico por parte del profesorado y del estudiantado (Ezagirre et al., 2020).

Las investigaciones señalan que con el ABP se consiguen mejores resultados en cuanto a la adquisición de conocimientos (Rosales et al., 2018), lo que genera un aprendizaje significativo mediante la investigación; posiblemente, debido a que el ABP permite al alumnado explorar y descubrir sus intereses, buscar información en diferentes fuentes, exponer sus ideas a los compañeros, enriquecerlas y transformarlas, generar productos y comunicar sus resultados al final del proceso (De Valle-Ramón et al., 2020). Además, se fomenta el trabajo en grupo y se desarrollan habilidades sociales (Culclasure et al., 2019). Se crea un ambiente de colaboración que da lugar a un trabajo grupal eficaz que hace posible la reflexión y potencia el pensamiento crítico, la creatividad y la autonomía del estudiante (González-Fernández y Becerra, 2021; Santyasa et al., 2020).

El ABP ha producido resultados positivos en todas las áreas del currículum, y concretamente en el área de las ciencias naturales. Afriana et al. (2016) mostraron que estudiantes indonesios de secundaria mejoraron significativamente su competencia científica con respecto al grupo de control, después de participar en un programa de proyectos. De manera similar, Acar et al. (2018) detectaron calificaciones significativamente más altas en el área de ciencias en un grupo de estudiantes turcos que utilizaron ABP. Sarican y Akgunduz (2018) sugieren también la relación entre ABP y competencia científica. Los estudios de Causil y Rodríguez (2021) sobre ABP en el área de ciencias naturales evidencian de nuevo que esta metodología contribuye a una mejora del aprendizaje y al desarrollo de habilidades científicas que, además, se trabajan utilizando el método científico.

En este sentido, Medina (2017) propone la existencia de un gran parecido entre la forma de proceder del ABP y el método científico, por lo que esta combinación podría resultar idónea para trabajar los contenidos de ciencias de la naturaleza, en general, y la luz y los colores, en particular, con una perspectiva indagatoria.

Aprendizaje basado en proyectos y método científico

La metodología científica se puede considerar una guía durante un proceso de investigación que muestra el procedimiento utilizado para plantear y dar solución a problemas científicos (Medina, 2017). Dentro de la didáctica de las ciencias naturales se pueden resumir algunas formas en las que el estudiante interviene en la indagación durante el proceso de enseñanza-aprendizaje (Caballero y Recio, 2007) y con ello plantear unas fases de la metodología científica que pueden ser aplicadas en el aula. Se comienza con un problema o cuestión de interés, que genera una observación y crea la necesidad de saber más. A continuación, se describe el problema tras una investigación bibliográfica sobre el conocimiento actual del área. Con ello, se generan hipótesis o posibles explicaciones que serán analizadas en la fase de experimentación. En esta, se planifican las observaciones, experimentos o investigaciones sencillas y se recopila la información. Luego, en la fase de análisis de resultados, se comparan las evidencias obtenidas por el alumnado y la comunidad científica para elaborar unas conclusiones que deberán aceptar o rechazar la hipótesis previamente planteada, para finalizar con una comunicación de dichos resultados. Esta propuesta de metodología científica no se debe entender como una serie de pasos cerrados y ordenados, sino que requiere retroalimentaciones continuas que impiden la unidireccionalidad. De esta manera, se evita transmitir una visión deformada y empobrecida de la actividad científica (Gil Pérez et al., 1999).

En la figura 1 se presenta el paralelismo que existe entre las fases del ABP propuestas por Kilpatrick (1918) y las fases de la metodología científica. En ambos casos se potencia un proceso de indagación que moviliza habilidades cognitivas complejas, como el pensamiento crítico, la capacidad para trabajar en equipo y las habilidades para investigar (problematizar, planificar, buscar información, organizar e interpretar la información, sintetizar y aplicar y comunicar) y autodirigir el aprendizaje (organización y responsabilidad para el trabajo académico). Dichas habilidades son necesarias para convertir a los estudiantes en aprendices con autonomía para el aprendizaje (Agástegui-Bazán, 2021).

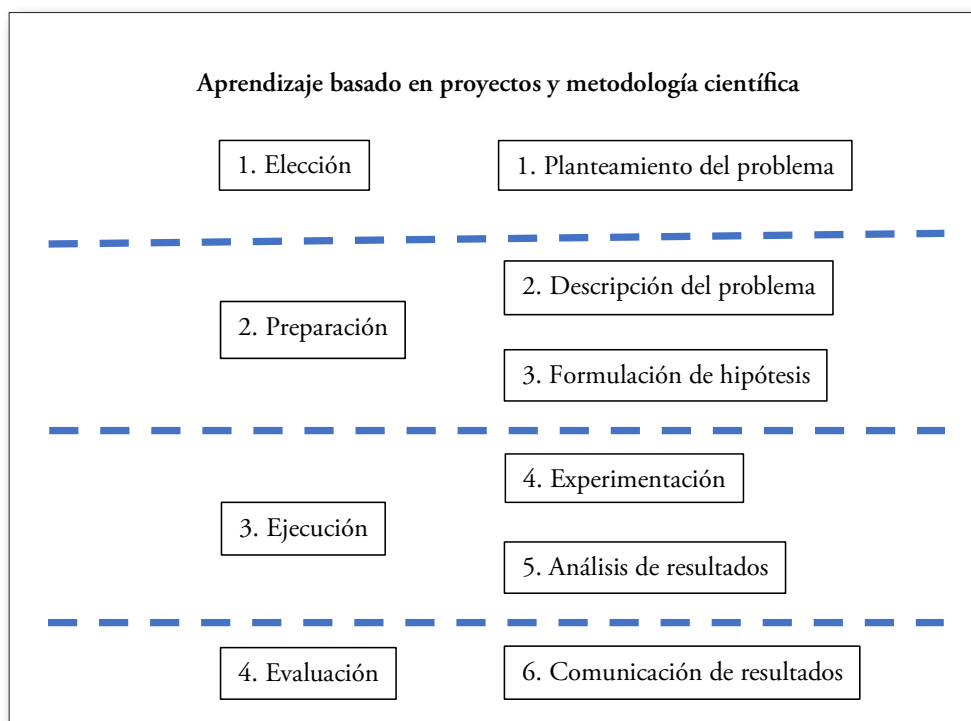


Fig. 1. Relación entre las fases del ABP y la metodología científica. *Fuente:* Elaboración propia.

Con esta metodología se crea un ambiente positivo en el aula que facilita la comunicación entre compañeros y con el profesorado (Toledo y Sánchez, 2018) y estimula el crecimiento intelectual y emocional, puesto que se potencia el intercambio de experiencias entre estudiantes que aprenden a trabajar en un contexto diverso.

Las emociones en el aprendizaje basado en proyectos

El desarrollo de emociones positivas incide directamente sobre la motivación, y viceversa, lo que depende en gran medida del tipo de metodología utilizada en el proceso de enseñanza-aprendizaje (Moreno et al, 2019). De hecho, las metodologías que permiten ser sujeto activo al alumnado generan emociones más positivas que un enfoque de transmisión-recepción (Sánchez-Martín, 2018). Las emociones influyen, además, en otros factores tan importantes para el aprendizaje como la atención, la memoria, la toma de decisiones, las relaciones sociales o la creatividad (Guillen, 2017).

Según el estudio de Del Rosal et al. (2019), el alumnado de primaria relaciona las emociones positivas, como la diversión, la confianza, el entusiasmo y la tranquilidad, hacia las ciencias con metodologías centradas en el estudiante que implican el trabajo en grupo y actividades prácticas; y las negativas, como el miedo, la preocupación, el nerviosismo y el aburrimiento, con las metodologías centradas en el docente, como las explicaciones orales, la utilización del libro de texto o de la pizarra. Los estados emocionales positivos (la alegría, el orgullo, el entusiasmo, etc.) favorecen el aprendizaje y el compromiso del estudiante, mientras que los negativos (el miedo, la ira, la frustración, etc.) limitan la capacidad de aprender (Solís-Pinilla, 2021; Perkrum et al., 2014). Uno de los factores asociados a la mejora del aprendizaje durante el ABP son las emociones que experimentan los estudiantes cuando se enfrentan a las tareas para desarrollar el proyecto (Kim y Pekrum, 2014). Por ello, es muy importante que durante la implementación del ABP se tengan en cuenta las emociones de los estudiantes y que el

docente ofrezca orientación atendiendo al nivel conceptual y procedimental necesario para que los discentes se enfrenten con éxito al proyecto (Belland et al., 2013). Además de la metodología, las emociones están conectadas a la enseñanza y aprendizaje de conocimientos concretos (Garritz y Ortega-Villar, 2013). A este respecto, Del Rosal et al. (2018; 2019) indican que los estudiantes de 5.º y 6.º de Educación Primaria experimentan un mayor porcentaje de emociones positivas (diversión y alegría) para contenidos de tecnología y seres vivos y de emociones negativas, para contenidos de física y química. Si bien las emociones de los estudiantes hacia las ciencias de la naturaleza en educación primaria son positivas, estas van desapareciendo a medida que el alumnado progresa en el sistema educativo (Bravo et al., 2022), por lo que se observa un desinterés decreciente por la ciencia y, en concreto, la expresión de emociones negativas como el rechazo y el aburrimiento (Yllana-Prieto et al., 2021).

OBJETIVOS

El objetivo general es analizar una propuesta de intervención basada en el aprendizaje basado en proyectos aplicado al alumnado de 5.º y 6.º de Educación Primaria para la mejora de la comprensión de los contenidos de la luz y los colores mediante el método científico.

Para su desarrollo, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Implementar un ABP centrado en el método científico para el estudio de la luz y los colores.
- Evaluar el efecto del ABP implementado en el aprendizaje de los contenidos trabajados.
- Valorar la percepción del alumnado sobre las emociones experimentadas en el momento en el que se presenta el ABP y una vez finalizado este.
- Analizar la satisfacción del alumnado hacia la metodología empleada.

DESARROLLO METODOLÓGICO

Muestra

La propuesta educativa se implementó en un colegio público de un barrio de Madrid durante el curso escolar 2020-2021, con un nivel socioeconómico bajo-medio. En la experiencia participaron un total de 32 alumnos: 16 de 5.º y 16 de 6.º de Educación Primaria, en total 15 niñas y 17 niños. La experiencia se desarrolló en dos cursos multigrados. La situación de pandemia derivó en una bajada de ratios, lo que hizo que el colegio tuviera que adecuar los espacios y reunir en una misma aula a los alumnos de los dos cursos académicos.

Procedimiento

En esta investigación se utilizó una metodología cuantitativa con un diseño preexperimental. La intervención se realizó en grupos previamente formados utilizando una medida de pretest y postest para evaluar el cambio en los conocimientos y en las emociones experimentadas, sin utilizar un grupo control.

En cuanto a la intervención realizada, cabe destacar que el modelo pedagógico del centro pretende proporcionar a sus alumnos una educación integral y potenciar el desarrollo de sus capacidades en todos los aspectos de la persona. Por ello, se utilizan metodologías activas e innovadoras y, entre ellas, tienen implementado el aprendizaje cooperativo.

La propuesta didáctica denominada «¿De dónde vienen los colores?» se diseñó de acuerdo con el Real Decreto 126/2014, de 28 de febrero, por el que se establece el currículo básico de la Educación

Primaria para trabajar contenidos establecidos en la asignatura Ciencias de la Naturaleza, específicamente en el Bloque 1 (Iniciación a la investigación) y el Bloque 4 (Materia y Energía). Todos los detalles de la secuencia didáctica, incluyendo objetivos, contenido, competencias, actividades y evaluación, se pueden encontrar en el siguiente enlace: [de_dónde_vienen_los_colores](#).

Las actividades se desarrollaron en 6 sesiones, de 45 minutos cada una, formando grupos cooperativos heterogéneos en cuanto a grado y capacidades cognitivas de 4 participantes cada uno.

En la sesión inicial, el docente presentó la pregunta guía: «¿De dónde vienen los colores?». Se explicó al alumnado que debían diseñar y realizar un experimento utilizando las fases del método científico y entregar, como producto final, un informe técnico que responda a dicha cuestión. Posteriormente, se dividió al alumnado en grupos cooperativos integrados por discentes de 5.º y 6.º de Educación Primaria y realizaron la tabla QQQ mediante la técnica de lápices al centro (un ejemplo del resultado se muestra en la figura 2). La mayoría de los grupos indicaron conocer que los colores se forman a partir de los colores primarios, quisieron saber cuántos colores existen, de dónde vienen los colores primarios y propusieron averiguarlo buscando en internet e investigando.

¿DE DÓNDE VIENEN LOS COLORES?		
¿Qué sabemos?	¿Qué queremos saber?	¿Cómo podríamos solucionarlo?
- El arco iris tiene 6 colores - Que la luz blanca se forma a partir de los colores primarios	- ¿Cuántos colores hay en el mundo? - ¿Es verdad que los colores se forman a partir de la luz? - ¿De dónde vienen los colores primarios? - ¿Cómo descubrieron los primarios? - ¿Se pueden descubrir más colores?	- Buscando por Internet, en libros, revistas... - Juntando varios colores.

Fig. 2. Ejemplo de tabla QQQ realizada por los alumnos. Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes sesiones, atendiendo al método científico y una vez realizada la MiniWebQuest para ayudar al estudiante en la búsqueda de información, cada grupo diseñó su investigación. Para ello, formularon su hipótesis, diseñaron y llevaron a cabo su experimento para finalizar con la conclusión correspondiente. Los equipos plantearon diferentes hipótesis y diferentes formas de comprobarlas, y destacaron la realización del disco de Newton (figura 3A) y el uso de un vaso de vidrio, con agua y una linterna para simular el prisma que utilizó este científico en sus experimentos (figura 3B). La experiencia didáctica finalizó con la exposición de cada uno de los grupos frente a toda la clase.

Nuestro proyecto de los colores		
Integrantes del equipo: Ricardo, Santiago, Gisel, Yanika, y yo XD (Kamilo)		
Pregunta ¿De donde viene los colores?		
Hipótesis • Vienen del rayo del sol que al deformarse se crean • Vienen de las cosas • No • No • No		
Materiales • Vaso con agua • Luz • Papel aluminio • Cartón • Papel colores	Procedimiento La luz pasa al papel aluminio y la luz rebota y va al vaso y salen colores.	
Observaciones El experimento funciona	Observaciones A la primera nos valió.	Observaciones Y nos costo encontrar una idea.
Conclusiones El agua y el sal deforma el rayo y sale color.		

Fig. 3A. Diseño de proyectos, atendiendo al método científico, realizados por los alumnos de 5.º y 6.º de Educación Primaria. Propuesta del uso de un vaso con agua para simular el prisma utilizado por Isaac Newton

Nuestro proyecto de los colores

Integrantes del equipo:

Pregunta

¿De donde vienen los colores?

Hipótesis

La luz rebota en algún objeto que hace que nuestro cerebro capte esa información.

Materiales	Procedimiento
Folio, compás, regla, tijeras 1º verde 2º azul 3º violeta 4º 5º rayo 6º naranja 7º amarillo cartón palo hilo	1º círculo con compás dividir 6 partes iguales 2º cortar 3º pinta cada parte de color 4º círculo idéntico cartón (cortar) 5º pegarlo disco color 6º haz 2º agujeros centro 7º pasa hilo agarralo a extre- mos si lo agarras gira sobre

Observaciones	Observaciones	Observaciones
1	Hemos aprendido cosas nuevas.	No sabemos que salga <u>Blanco</u>.

Conclusiones

Ha sido difícil

Si juntamos todos los colores no sale negro, sale
blanco.

Fig. 3B. Diseño de proyectos, atendiendo al método científico, realizados por los alumnos de 5.º y 6.º de Educación Primaria. Propuesta de la realización del disco de Newton. Fuente: Elaboración propia.

Instrumentos

Con la finalidad de evaluar la adquisición de conocimiento por parte de los estudiantes, se diseñó un cuestionario compuesto por un total de 9 preguntas abiertas, 5 de ellas orientadas al método científico con conceptos como en qué consiste, sus fases o la generación de hipótesis. Las 4 preguntas restantes

versaron sobre conceptos de la luz (refracción y reflexión), la energía y el papel de los colores en la formación del arcoíris. Dicha prueba fue validada mediante la opinión de expertos, que valoraron la adecuación de cada una de las preguntas a los objetivos de aprendizaje planteados. Este cuestionario se aplicó antes y después de la propuesta de intervención. Para evaluarlo de manera objetiva, se establecieron criterios de calificación previos.

La satisfacción del alumnado se analizó utilizando el instrumento validado previamente por García-Varcácel y Basilotta (2017), que evalúa 4 dimensiones: motivación, organización, interacción-colaboración y aprendizaje, formadas por un número variable de ítems, que se valoran según una escala de Likert de 1 a 7, siendo esta última la calificación más alta. El instrumento se aplicó una vez finalizada la secuencia didáctica. La fiabilidad del instrumento se determinó mediante Alfa de Cronbach y fue de 0,98, por lo que se consideró adecuado (Nunnally, 1978).

Las emociones generadas por la implementación de la propuesta didáctica se valoraron antes y después de realizar la intervención. A partir del instrumento sugerido por Rebollo et al. (2008), se seleccionaron 10 emociones positivas y 10 negativas valoradas según una escala de Likert (1: Totalmente en desacuerdo, 2: En desacuerdo, 3: De acuerdo o 4: Totalmente de acuerdo). Tras el análisis de fiabilidad del instrumento, se obtuvo un Alfa de Cronbach de 0,826, por lo que se consideró adecuado (Nunnally, 1978).

Análisis de datos

Las pruebas estadísticas utilizadas se seleccionaron a partir de la comprobación previa del supuesto de normalidad aplicando la prueba de Shapiro-Wilk ($N < 50$, $p < 0,05$), y resultan, en todos los casos, pruebas no paramétricas. Por ello, se compararon los resultados pretest y posttest de cada alumno, tanto de la evaluación de conocimiento como del análisis de emociones, mediante la prueba de rangos con signo de Wilcoxon. A partir de dicha prueba se determinó si existían diferencias entre el rango medio de dos muestras pretest y posttest apareables.

Por otro lado, se utilizó la prueba de U de Mann-Whitney para analizar las diferencias en el grado de satisfacción y en las emociones generadas en función del sexo o del curso.

Cuando se observaron diferencias significativas, se evaluó el tamaño del efecto a través de la d de Cohen, donde los valores de r de 0,1 a 0,3 se consideraron efectos pequeños, hasta 0,5 medios, y por encima de dicho valor, efectos grandes (Fritz et al., 2012).

Todos los análisis se realizaron a un nivel de significación $\alpha = 0,05$. Los datos fueron organizados, codificados y analizados utilizando el paquete estadístico SPSS 25.0.

RESULTADOS

Adquisición de conocimientos

La adquisición de conocimientos se evaluó a través de un cuestionario que se aplicó antes (pretest) y después (posttest) de realizar la propuesta de intervención ($N = 26$). Los resultados de ambos cuestionarios se compararon aplicando la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, cuyos resultados se muestran en la tabla 1. Con la finalidad de facilitar la interpretación y comparación entre la evaluación global y cada una de las partes —método científico y la luz—, se presenta el porcentaje de rangos promedios. De manera global, se observa que un 84,5 % de los alumnos presenta un rango positivo, lo que indica que su calificación aumentó después de la implementación del ABP, siendo una diferencia significativa ($Z = -3,769$ y $\text{Sig} = 0,000$) con un efecto alto ($r = 0,669$). Para conocer si la adquisición de conocimiento estaba relacionada con el método científico o con el contenido relacionado con la luz y los colores,

se analizaron las calificaciones obtenidas en cada área. Los resultados muestran (tabla 1) que, en relación con el método científico, el 54 % de los estudiantes aumenta significativamente su calificación ($Z = -2,940$ y $\text{Sig} = 0,003$) con un efecto medio ($r = 0,412$). Este efecto es menor si lo comparamos con los conocimientos adquiridos por los estudiantes con relación a la luz y los colores, donde el 65,5 % de los estudiantes aumentaron significativamente su calificación ($Z = -2,861$ y $\text{Sig} = 0,004$) con efecto alto ($r = 0,769$).

Tabla 1.
Rangos promedios para el pretest-postest en adquisición de conocimiento.
Prueba de rango con signo de Wilcoxon y efecto a través de la D de Cohen

		<i>N</i>	<i>Rangos promedio</i>	<i>Suma de rangos</i>	<i>Z</i>	<i>Sig</i>	<i>r</i>
Global	Rangos negativos	3	7,50	22,50	-3,769	0,000	0,669
	Rangos positivos	22	13,75	302,50			
	Empates	1					
Método científico	Rangos negativos	3	5,00	15,00	-2,940	0,003	0,412
	Rangos positivos	14	9,86	232,00			
	Empates	9					
Luz	Rangos negativos	6	7,33	44,00	-2,861	0,004	0,769
	Rangos positivos	17	13,65	232,00			
	Empates	3					

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la satisfacción del alumnado

Al finalizar la intervención didáctica, se aplicó un cuestionario que permite analizar la valoración de los alumnos ($N = 32$) ante esta nueva metodología a través de 4 dimensiones: motivación, organización, interacción-colaboración y aprendizaje (escala 1 a 7). El análisis estadístico descriptivo de los resultados, presentados en la tabla 2, muestra un alto grado de satisfacción tanto global ($6,09 \pm 1,16$) como en cada una de las dimensiones analizadas. En la dimensión Motivación ($5,93 \pm 1,03$), los ítems mejor valorados han sido *Ha sido interesante* ($6,30 \pm 1,09$) y *Me ha encantado esta forma de trabajar* ($6,01 \pm 1,39$). En cuanto a la dimensión Organización ($6,04 \pm 0,56$), destacan los ítems *El profesor nos ha explicado claramente lo que tenemos que hacer* ($6,58 \pm 0,62$) y *El tamaño del grupo ha sido adecuado* ($6,42 \pm 0,81$), siendo el ítem menos valorado *He estado a gusto con mis compañeros* ($5,65 \pm 1,56$). Respecto a la dimensión Interacción-colaboración ($6,17 \pm 0,61$), los ítems con medias más elevadas son *Trabajando en grupo hemos conseguido hacer bien la tarea* ($6,32 \pm 1,08$) y *Hemos compartido materiales entre los compañeros* ($6,32 \pm 0,75$). Finalmente, en cuanto a la dimensión de Aprendizaje ($6,16 \pm 0,66$), se valoran a un nivel superior *Ha sido útil* ($6,5 \pm 0,90$) y *He aprendido más que otras veces* ($6,35 \pm 0,95$).

Tabla 2.
Análisis descriptivo de los resultados obtenidos de la encuesta de satisfacción

<i>Dimensiones</i>	<i>Media</i>	<i>DT</i>
Motivación	5,93	1,03
Ha sido divertido	5,71	1,07
Ha sido interesante	6,30	1,09
Quiero aprender más sobre el tema	5,65	1,56
Me ha encantado esta forma de trabajar	6,01	1,39
Organización	6,04	0,56
He aprovechado el tiempo	6,26	0,77
He leído mucho	5,23	1,26
El profesor nos ha explicado claramente lo que tenemos que hacer	6,58	0,62
El tamaño del grupo ha sido adecuado	6,42	0,81
He estado a gusto con mis compañeros	5,71	1,46
Interacción-colaboración	6,17	0,61
El profesor me ha ayudado	6,03	1,28
Hemos compartido materiales entre los compañeros	6,32	1,08
Ahora me resulta más fácil relacionarme con mis compañeros	5,94	1,41
Trabajando en grupo hemos conseguido hacer bien la tarea	6,32	0,75
El profesor nos ha indicado si hacíamos bien las tareas	6,16	1,04
El profesor nos ha dicho lo que estaba bien o mal del trabajo	6,26	0,93
Aprendizaje	6,16	0,66
He aprendido más cosas que otras veces	6,35	0,95
He comprendido la actividad	6,10	1,33
Me he concentrado	6,03	1,17
He creado y compartido información	5,90	1,22
Ha sido útil	6,5	0,90
Puntuación global	6,09	0,59

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se realizó la prueba U de Mann-Whitney para el contraste de medidas por pares y así determinar si existe alguna influencia en función del sexo o del curso. Respecto al sexo, se observaron valores de Z entre $-0,160$ y $-0,719$ y Sig entre $0,495$ y $0,892$ (datos no mostrados); mientras que respecto al curso (5.º o 6.º), se obtuvieron valores de Z entre $-1,597$ y $-0,339$ y Sig entre $0,119$ y $0,740$ (datos no mostrados), lo que indica que, en ningún caso, existen diferencias significativas.

Emociones generadas

Para finalizar, se evaluaron las emociones generadas en los alumnos ($N = 28$) una vez presentada la propuesta (pretest) y una vez terminada esta (postest). Para ello, se utilizó un instrumento de escala de Likert (de 1 a 4) que evalúa 10 emociones positivas y 10 negativas. Los resultados (tabla 3) muestran que tanto al inicio como al finalizar la actividad se generaron más emociones positivas que negativas.

Entre las emociones positivas generadas destacan la confianza, la seguridad y la alegría; mientras que las emociones negativas menos presentes fueron la rabia, la tristeza y la frustración.

Tabla 3.
Análisis descriptivo de los resultados obtenidos en la valoración de las emociones

<i>Emociones POSITIVAS</i>					<i>Emociones NEGATIVAS</i>				
	Pretest		Postest			Pretest		Postest	
	Media	DT	Media	DT		Media	DT	Media	DT
Entusiasmo	2,69	0,884	3,11	0,698	Aburrimiento	2,36	1,129	1,92	0,935
Orgullo	2,41	1,083	2,81	0,681	Frustración	1,67	0,920	1,68	0,852
Optimismo	2,77	0,908	2,96	0,871	Enfado	1,93	0,997	1,62	0,852
Alegría	3,14	0,932	3,25	0,799	Tristeza	1,75	0,967	1,36	0,569
Alivio	2,54	1,104	2,64	0,951	Inseguridad	1,74	0,813	1,80	0,816
Seguridad	2,82	0,863	3,25	0,799	Estrés	2,38	1,299	2,04	0,978
Tranquilidad	3,08	0,977	2,96	0,759	Desgana	2,15	0,989	1,92	0,997
Confianza	2,70	0,993	3,19	0,849	Desconfianza	1,77	0,992	1,63	0,711
Orientación	2,30	0,993	2,81	1,075	Rabia-ira	1,56	0,934	1,56	0,768
Atracción	2,22	1,013	2,70	1,031	Preocupación	1,96	1,126	2,04	0,841

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la prueba de rangos con signo de Wilcoxon presentados en la tabla 4 indican una mejora significativa en las emociones positivas ($Z = -2,632$ y $\text{Sig} = 0,008$), siendo el tamaño del efecto alto ($r = 0,590$). En cambio, no influyó en la valoración de las emociones negativas ($Z = -1,170$ y $\text{Sig} = 0,242$).

Tabla 4.
Rangos promedios para el pretest-postest en la valoración de las emociones generadas. Prueba de rango con signo de Wilcoxon y efecto a través de la D de Cohen

		<i>N</i>	<i>Rangos promedio</i>	<i>Suma de rangos</i>	<i>Z</i>	<i>Sig</i>	<i>r</i>
Emociones positivas	Rangos negativos	8	9,00	72,00	-2,632	0,008	0,590
	Rangos positivos	18	15,50	279,00			
	Empates	2					
Emociones negativas	Rangos negativos	15	14,77	221,50	-1,170	0,242	
	Rangos positivos	11	11,77	129,50			
	Empates	2					

Fuente: Elaboración propia.

En vista de los resultados obtenidos, se decide analizar con más detalle cada una de las emociones generadas. En cuanto a las emociones positivas (tabla 5), se observa un aumento significativo del entusiasmo con un efecto alto ($Z = -2,235$, $\text{Sig} = 0,025$ y $r = 0,571$); del mismo modo, aunque con un efecto menor, existe un aumento significativo en Seguridad ($Z = -2,035$, $\text{Sig} = 0,042$ y $r = 0,250$), Confianza ($Z = 0,037$, $\text{Sig} = 0,037$ y $r = 0,256$), Orientación ($-2,304$, $\text{Sig} = 0,021$ y $r = 0,239$) y

Atracción ($Z = 2,039$, $\text{Sig} = 0,041$ y $r = 0,228$). Por otro lado, la realización del ABP no supuso ningún cambio en las emociones negativas generadas en los alumnos ya que, en todos los casos, las diferencias entre su valoración pretest-posttest no se tradujeron en diferencias significativas ($\text{Sig} > 0,05$).

Tabla 5.

Rangos promedios para el pretest-posttest en la valoración de las emociones positivas. Prueba de rango con signo de Wilcoxon y efecto a través de la D de Cohen

<i>Emociones POSITIVAS</i>				<i>Emociones NEGATIVAS</i>		
	Z	Sig	r		Z	Sig
Entusiasmo	-2,235	0,025	0,571	Aburrimiento	-1,713	0,087
Orgullo	-1,932	0,053		Frustración	-0,066	0,948
Optimismo	-1,137	0,256		Enfado	-1,812	0,070
Alegría	-0,479	0,632		Tristeza	-2,066	0,039
Alivio	-0,437	0,662		Inseguridad	0,000	1,000
Seguridad	-2,035	0,042	0,250	Estrés-cansancio	-1,610	0,107
Tranquilidad	-0,536	0,592		Apatía-desgana	-1,450	0,147
Confianza	-2,083	0,037	0,256	Desconfianza	-1,294	0,196
Orientación	-2,304	0,021	0,239	Rabia-ira	0,000	1,000
Atracción	-2,039	0,041	0,228	Tensión-preocupación	-1,117	0,907

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se analizó la influencia del sexo y del curso en las emociones generadas por los alumnos, aplicando la prueba de U de Mann-Whitney. Los resultados (datos no mostrados) indicaron que no hubo diferencias significativas ni en el sexo (valores de Z entre -0,667 y 0; y Sig entre 0,327 y 1) ni en el curso (valores de Z entre -0,974 y -0,207 y Sig entre 0,332 y 0,836).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este trabajo permiten afirmar que la metodología ABP aplicada en las clases de ciencias influye positivamente en la adquisición de conocimientos, ya que los alumnos han mejorado sus nociones sobre el método científico y la luz y los colores. Nuestros resultados están en consonancia con los aportados por Causil y Rodríguez (2021), que proponen que esta metodología mejora el aprendizaje de las ciencias. La metodología propuesta se ha adaptado a los intereses y las necesidades del alumnado, como se evidencia en la mejora en el aprendizaje de conocimientos (León et al., 2018), y destaca la importancia de aprender el método científico, que se propone como una de las estrategias más útiles para la alfabetización científica, ya que guía el proceso de investigación que se realiza con la metodología de ABP (Medina, 2017). En este sentido, este trabajo supone una nueva evidencia de la necesidad de promover más propuestas basadas en la metodología de ABP en Educación Primaria (García-Valcárcel y Basilotta, 2017; Ramón et al., 2020). Asimismo, en cuanto al contenido sobre la luz y los colores, experiencias previas han probado la utilidad de realizar actividades de descomposición de la luz blanca (Walz et al., 2016) o la utilización del disco de Newton (Zacarias et al., 2019), así como la importancia de la generación de hipótesis y el trabajo con el método científico (Pujalte et al., 2010) para evidenciar las concepciones alternativas que pueden tener los alumnos respecto a aspectos relacionados con la ciencia. De esta manera, los alumnos podrán reconocer con

mayor facilidad las propiedades básicas de la luz y no confundir el efecto de la mezcla de colores de la luz con el efecto de la mezcla de pigmentos (Jelinek, 2022).

La metodología de ABP ha sido valorada de manera muy positiva por el alumnado, sobre todo, lo referente a la interacción-colaboración y el aprendizaje. El trabajo de grupo es un elemento fundamental de la metodología de ABP, pues es necesario para la consecución del producto final que debe ser elaborado entre todos los estudiantes (Toledo y Sánchez, 2018; Culclasure et al., 2019). Además, en el ambiente de colaboración que se genera se fomenta el desarrollo de habilidades como el pensamiento crítico, la creatividad y la autonomía del estudiante (González-Fernández y Becerra, 2021; Santyasa et al., 2020). De hecho, los resultados evidencian que el alumnado que trabaja en grupo realiza bien la tarea propuesta. Quizás porque, como destacan en la dimensión referida a la organización de la actividad, se han sentido a gusto con sus compañeros y han aprovechado el tiempo. En este sentido, nuestros resultados también resaltan que el trabajo en grupo es un medio idóneo para desarrollar esta metodología, lo que ha permitido que los estudiantes interaccionen con compañeros con ideas, antecedentes y experiencias diversas, lo que incide en un aprendizaje más rico y significativo (Del Valle-Ramón et al., 2020; Hunter y Botchwey, 2017). De hecho, el alumnado percibe que ha aprendido más que en otras ocasiones y que la experiencia de aprendizaje ha sido útil. La experiencia realizada también ha incidido de manera muy positiva sobre la motivación del alumnado, que manifiesta que les ha encantado esta forma de trabajar, y se considera la experiencia interesante y divertida. A este respecto, indicar que autores como Cattaneo (2017) destacan que el aumento de motivación se relaciona con el aprendizaje basado en la investigación que se utiliza en la metodología ABP y con la forma de presentar los conocimientos, contextualizados y aplicados a situaciones cercanas a la realidad del alumnado. Finalmente, hay que destacar que no se han determinado diferencias en ninguna de las dimensiones referidas a la satisfacción del alumnado participante en cuanto al sexo o al curso. En el estudio realizado por García-Varcácel y Basilotta (2017) sobre ABP para aprendizaje de ciencias en Educación Primaria con el mismo instrumento, también se determinan medias ligeramente más altas en niñas que en niños, pero estas diferencias no son significativas, lo que supone una nueva evidencia de que el programa se adapta a la diversidad del alumnado participante. A este respecto, cabe destacar que los resultados reiteran la importancia de la motivación de los estudiantes de cara a una mejora del aprendizaje, y también la necesidad de una buena planificación y organización de las tareas del proyecto, así como de su seguimiento y evaluación.

Con relación a las emociones, los resultados obtenidos evidencian que se han potenciado emociones positivas frente a las negativas, que no han variado durante la experiencia de aprendizaje. Del Rosal et al. (2018) indican que los estudiantes de 5.º y 6.º de primaria experimentan emociones positivas hacia el aprendizaje de las ciencias en general, pero comienzan a experimentar emociones negativas como el aburrimiento en la asignatura de Ciencias cuando trabajan contenidos del bloque de Materia y energía, entre los que se encuentra la luz. Por otro lado, De Orta et al. (2016) determinan que los estudiantes de 5.º de primaria experimentan fundamentalmente emociones positivas como la alegría, la seguridad, la confianza y la diversión, frente a emociones negativas como el miedo, la ansiedad, la tristeza y el aburrimiento cuando se enfrentan a actividades basadas en la investigación. Posiblemente, la presencia de emociones positivas en nuestra experiencia, como el entusiasmo, la seguridad, la confianza, la orientación y la atracción se debe al uso de la metodología de ABP, pues, como evidencia el estudio de Del Rosal et al. (2019), realizado con 327 alumnos de 5.º y 6.º curso de Educación Primaria, estos experimentan emociones positivas cuando se utilizan metodologías que requieren la participación del alumnado y el trabajo en equipo en la asignatura de Ciencias de la Naturaleza. Estos resultados son importantes si tenemos en cuenta que las emociones afectan el proceso de aprendizaje (Hanin y Van Nieuwenhoven, 2016); concretamente, las emociones positivas han sido consideradas como uno de los factores responsables de la mejora que se consigue en el aprendizaje con la metodología de ABP (Kim

y Pekrum, 2014). En el estudio de Quintero Macías y Ramírez Flores (2020), se destaca que el ABP permite que el alumnado aprenda habilidades cognitivas y emocionales, que se forma de forma integral para estar más capacitado para afrontar los retos de la sociedad actual. Asimismo, según Borrachero (2015), los estudiantes que obtuvieron mejores calificaciones en la asignatura de Ciencias también manifestaron sentir más emociones positivas. Los resultados de nuestro trabajo están alineados con los presentados por los autores mencionados anteriormente, puesto que el alumnado que ha trabajado los contenidos mediante el ABP ha mejorado su conocimiento y las emociones positivas experimentadas.

El programa implementado no ha generado diferencias en cuanto a las emociones en función del género o del curso. Estos resultados son contrarios a los presentados por Dávila et al. (2015), que indican que sí hay diferencias en las emociones con respecto al género. Concretamente, los alumnos de Educación Secundaria Obligatoria experimentan con mayor frecuencia emociones positivas como la alegría, la diversión, la felicidad, la tranquilidad y el entusiasmo, mientras que las alumnas experimentan en mayor medida emociones negativas como la preocupación, el miedo, el aburrimiento y el nerviosismo, frente al aprendizaje de contenidos de física. Del Rosal et al. (2018), por el contrario, encuentran un mayor porcentaje de emociones positivas en las niñas cuando trabajan el bloque de contenidos de los seres vivos, pero no de la luz y los colores, de la asignatura de Ciencias de la Naturaleza en Educación Primaria. Por tanto, quizá es importante comenzar a trabajar contenidos de física, mediante el ABP, en educación primaria como vía para evitar estas diferencias en las emociones con respecto al género en niveles educativos posteriores y para así minimizar las emociones negativas y motivar al alumnado al estudio de las ciencias en cursos posteriores (Del Rosal y Bermejo, 2017). El interés por los estudios de ciencias desciende a lo largo de la vida escolar del alumnado, concretamente de la etapa de primaria a la de secundaria (Pérez y De Pro, 2018). Un contexto emocionalmente adverso con relación al aprendizaje científico quizás pueda ser la causa de la disminución del número de estudiantes de Ciencias en Bachillerato y Educación Superior.

Se concluye que la metodología del ABP es eficaz para la adquisición de conocimientos de ciencias y genera un clima en el aula de satisfacción que favorece el aprendizaje independientemente del género o del curso en el que se encuentran los estudiantes. Esta mejora en el aprendizaje puede estar influenciada por las emociones, preferentemente positivas, experimentadas por el alumnado que ha participado en esta experiencia de aprendizaje basada en la metodología de ABP.

Consideramos adecuado señalar como limitación del estudio realizado el tamaño de la muestra, que se puede considerar pequeña. Por ello, los resultados y las conclusiones obtenidos no permiten hacer generalizaciones, si bien consideramos que son de interés para docentes de otros centros educativos, que podrán replicar el estudio en otros contextos para consolidar las conclusiones obtenidas. Por otro lado, cabe destacar que la propuesta diseñada es muy estructurada y guiada dadas las dificultades de plantearla de una manera más abierta y cercana a una investigación científica real en la etapa educativa de Educación Primaria. Quizás este hecho esté incidiendo en que los resultados sobre el aprendizaje del método científico sean inferiores a los obtenidos en la temática de la luz y los colores.

Finalmente, cabe señalar que es importante dotar a los estudiantes de Educación Primaria de las habilidades científicas necesarias para comprender el mundo que los rodea y promover el interés científico en los niños desde edades tempranas utilizando metodologías como el ABP que fomentan habilidades necesarias en la sociedad actual y promueven emociones positivas facilitadoras de un aprendizaje más significativo.

REFERENCIAS

- Acar, D., Tertemiz, N. y Tademir, A. (2018). The effects of STEM training on the academic achievement of 4th graders in science and mathematics and their views on STEM training. *International Electronic Journal of Elementary Education*, 10(4), 505-513.
<https://doi.org/10.26822/iejee.2018438141>
- Afriana, J., Permanasari, A. y Fitriani, A. (2016). Project based learning integrated to STEM to enhance elementary school's students scientific literacy. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 5(2), 261-267.
<https://doi.org/10.21831/jipi.v2i2.8561>
- Agástegui-Bazán, L. G. (2022). La metodología indagación y el aprendizaje de las Ciencias Naturales. *Polo del Conocimiento*, 6(12), 804-822. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/3406>
- Anasagasti, J., Berciano, A. y Murillo, J. (2022). Estadística por proyectos en el grado de Educación Primaria: un estudio de casos. *Enseñanza de las Ciencias*, 40(1), 125-142.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3235>
- Astuti, I. A. D., Putra, I. Y. y Bhakti, Y. B. (2018). Developing Practicum Module of Particle Dynamics Based on Scientific Methods to Improve Students' Science Process Skills. *Scientiae Educatia: Jurnal Pendidikan Sains*, 7(2), 183-196.
<https://doi.org/10.24235/sc.educatia.v7i2.2513>
- Belland, B., Kim, C. y Hannafin, M. (2013). A Framework for Designing Scaffolds That Improve Motivation and Cognition. *Educational Psychologist*, 48(4), 243-270. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3827669/>
- Borrachero, B. (2015). *Las emociones en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias en educación secundaria* [Tesis de doctorado]. Universidad de Extremadura. <http://hdl.handle.net/10662/3066>
- Bravo Lucas, E., Mero, M., del Barco, M. A. y Jiménez, V. (2022). Las emociones en ciencias en la formación inicial del profesorado de infantil y primaria. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado. Continuación de la Antigua Revista de Escuelas Normales*, 97(36.1).
<https://doi.org/10.47553/rifop.v97i36.1.92426>
- Caballero, C. y Recio, P. (2007). Las tendencias de la Didáctica de las Ciencias Naturales en el Siglo XXI. *Varona*, (44), 34-41.
- Caravaca, I. (2010). Conocimiento del entorno: Acercamiento infantil al saber científico. *Revista Digital Innovación y Experiencias Educativas*, 36. https://archivos.csif.es/archivos/andalucia/ensenanza/revistas/csicsif/revista/pdf/Numero_36/INMACULADA_CARAVACA_1.pdf
- Carrascosa, J. (2005). El problema de las concepciones alternativas en la actualidad (parte I). Análisis sobre las causas que las originan y/o mantienen. *Revista Eureka sobre Enseñanza y divulgación de las Ciencias*, 183-208.
http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2005.v2.i2.06
- Cattaneo, K. (2017). Telling Active Learning Pedagogies Apart: From Theory to Practice. *Journal of New Approaches in Educational Research (NAER Journal)*, 6(2), 144-152.
<https://doi.org/10.7821/naer.2017.7.237>
- Causil Vargas, L. A. y Rodríguez de la Barrera, A. E. (2021). Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP): experimentación en laboratorio, una metodología de enseñanza de las Ciencias Naturales. *Plumilla Educativa*, 27(1), 105-128.
<https://doi.org/10.30554/pe.1.4204.2021>

- Culclasure, B., Longest, K. y Terry, T. (2019). Project-Based Learning (Pjbl) in Three Southeastern Public Schools: Academic, Behavioral, and Social-Emotional Outcomes. *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning*, 13(2).
<https://doi.org/10.7771/1541-5015.1842>
- Dávila, M. A., Borrachero, A. B., Mellado, V. y Bermejo, M. L. (2015). Las emociones en alumnos de ESO en el aprendizaje de contenidos en física y química, según el género. *International Journal of Developmental and Educational Psychology*, 1(1), 173-180.
- De Orta, A., Reyes, R. y De las Heras, M. A. (2016). Impact of the way of teaching: Emotions which different types of activities evoke. *Campo Abierto. Revista de Educación*, 35(1), 189-204. <https://mascvuex.unex.es/revistas/index.php/campoabierto/article/view/2843>
- Del Rosal, I. y Bermejo, M. L. (2017). Autoeficacia en estudiantes universitarios: diferencias entre el grado de maestro en educación primaria y los grados en ciencias. *International Journal of Developmental and Educational Psychology*, 1(1), 115-123. <https://www.redalyc.org/pdf/3498/349852544012.pdf>
- Del Rosal, I. y Bermejo, M. L. (2018). ¿Qué emociones experimentan los alumnos de educación primaria en la asignatura de ciencias de la naturaleza? Análisis del bloque «Materia y Energía». *International Journal of Developmental and Educational Psychology*, 2(1), 377-386.
- Del Rosal, I., Bermejo, M. L. y Cañada, F. (2019). Estudio de las emociones y sus causas en la enseñanza-aprendizaje de los seres vivos en educación primaria. *Bio-grafía. Escritos sobre biología y su enseñanza*, 12(22), 75-86. https://www.researchgate.net/publication/344327324_Estudio_de_las_emociones_y_sus_causas_en_la_ensenanza-aprendizaje_de_los_seres_vivos_en_educacion_primaria
- Del Rosal, I., Moreno-Manso, J. M. y Bermejo, M. L. (2018). Inteligencia emocional y rendimiento académico en futuros maestros de la Universidad de Extremadura. *Profesorado. Revista de Currículum y Formación del Profesorado*, 22(1), 257-275.
<https://doi.org/10.30827/profesorado.v22i1.9928>
- Del Valle-Ramón, D., Muñoz-Repiso, A. y Gómez-Pablos, V. B. (2020). Project-Based Learning Through the YouTube Platform for Teaching Mathematics in Primary Education. *Educ. Knowl. Soc*, 21(9).
<https://doi.org/10.14201/eks.20272>
- Ezaguirre, A., Caño, L. y Arguiñano, A. (2020). La competencia matemática en Educación Primaria mediante el aprendizaje basado en proyectos. *Educación Matemática*, 32(3), 241-262.
<https://doi.org/10.24844/EM3203.09>
- Fritz, C. O., Morris, P. E y Richler, J. J. (2012). Effect Size Estimates: Current Use, Calculations and Interpretation. *Journal of Experimental Psychology: General*, 141(1), 2-18.
- García-Carmona, A. y Acevedo-Díaz, J. A. (2018). The nature of scientific practice and science education. *Science & Education*, 27(5), 435-455.
<https://doi.org/10.1007/s11191-018-9984-9>
- García-Varcácel, A. y Basilotta, V. (2017). Aprendizaje basado en proyectos (ABP): evaluación desde la perspectiva de alumnos de Educación Primaria. *Revista de Investigación Educativa*, 35(1), 113-131.
<https://doi.org/10.6018/rie.35.1.246811>
- Garritz, A. y Ortega-Villar, N. A. (2013). El aspecto afectivo en la enseñanza universitaria. Cómo cinco profesores enseñan el enlace químico en la materia condensada. En V. Mellado, L. J. Blanco, A. B. Borrachero y J. A. Cárdenas (Eds.). *Las emociones en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias y las matemáticas* (vol. II, pp. 277-304). Badajoz: UEX-DEPROFE.

- Gil Pérez, D., Furió Más, C. J., Valdés, P., Salinas, J., Martínez Torregrosa, J., Guisálola, J., ... y González, E. M. (1999). ¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio? *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 17(2), 311-320. <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/21581>
- González-Fernández, M. O. y Becerra Vázquez, L. (2021). Estudio de caso del aprendizaje basado en proyectos desde los actores de nivel primaria. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 11(22). <https://doi.org/10.23913/ride.v11i22.859>
- González-Gómez, D., Jeong, J. S. y Gallego Picó, A. (2018). Influencia de la metodología *flipped* en las emociones sentidas por estudiantes del Grado de Educación Primaria en clases de ciencias dependiendo del bachillerato cursado. *Educación química*, 29(1), 77-88. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2018.1.63698>
- Guillén, J. C. (2017). *Neuroeducación en el aula: de la teoría a la práctica*. Reino Unido: CreateSpace.
- Hanin, V. y Van Nieuwenhoven, C. (2016). The influence of motivational and emotional factors in mathematical learning in secondary education. *Revue européenne de psychologie appliquée*, 66, 127-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.erap.2016.04.006>
- Hunter, P. E. y Borchwey, N. D. (2017). Partnerships in Learning: A Collaborative Project between Higher Education Students and Elementary School Students. *Innovative Higher Education*, 42(1), 77-90. <https://doi.org/10.1007/s10755-016-9363-x>
- Jelinek, J. A. (2022). Exploring the Phenomenon of the Additive Colour Process While Using a Computer Programme by 7-8-Year-Old Students. *Education Sciences*, 12(11), 740. <https://doi.org/10.3390/educsci12110740>
- Juanengsih, N., Mahmudah, L. y Ruri, R. (2018). Enhancing of Students' Learning Outcomes in the Environment Pollution Concept Through Project Based Learning (PjBL). *Jurnal Penelitian dan Pembelajaran IPA*, 4(2), 127-134. <https://doi.org/10.30870/jppi.v4i2.3385>
- Julián, J. A., Ibor, E., Aibar, A. y Agüeroles, I. (2017). Educación física, motor de proyectos. *Tándem: Didáctica de la Educación Física*, 56, 7-15. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5971357>
- Kilpatrick, W. H. (1918). The project method. *Teachers College Record*, 19, 319-335.
- Kim, C. y Pekrun, R. (2014). Emotions and motivation in learning and performance. En J. Michael Spector, M. D. Merrill, J. Elen, y M. J. Bishop (Eds.), *Handbook of research on educational communications and technology* (pp. 65-75). Nueva York, NY: Springer.
- Klisch, Y., Miller, L. M., Wang, S. y Epstein, J. (2012). The impact of a science education game on students' learning and perception of inhalants as body pollutants. *Journal of Science Education and Technology*, 21(2), 295-303. <https://doi.org/10.1007/s10956-011-9319-y>
- Li, L., Gow, A. D. I. y Zhou, J. (2020). The role of positive emotions in education: a neuroscience perspective. *Mind, Brain, and Education*, 14(3), 220-234. <https://doi.org/10.1111/mbe.12244>
- León, O., Martínez, L. F. y Santos, M. L. (2018). Análisis de la investigación sobre Aprendizaje basado en Proyectos en Educación Física. *Revista Electrónica Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, 21(2), 27-42. <https://doi.org/10.6018/reifop.21.2.323241>

- Martini, B., Tombolato, M. y D'Ugo, R. (2019). Primary Colors as a Source of Possible Misconceptions: An Insight into Teaching and Learning about Color. *Colour Cult. Sci. J.*, 11, 25-33.
<https://doi.org/10.23738/CCSJ.110203>
- Medina, V. (2017). Combinando el método científico y el trabajo por proyectos para alcanzar la alfabetización científica en educación infantil. *Tabanque. Revista Pedagógica*, 30, 53-74.
<https://doi.org/10.24197/trp.30.2017.53-74>
- Moreno Fuentes, E., Perales Molada, R. y Hidalgo Navarrete, J. (2019). Estudio cualitativo sobre el uso de la gamificación en la Educación Superior para promover la motivación del alumnado. *Aula de Encuentro*, 21(2), 5-26.
- Moya-Mata, I. y Peirats, J. (2019). Aprendizaje basado en Proyectos en Educación Física en Primaria, un estudio de revisión. *REIDOCREA*, 8(2), 115-130.
<https://doi.org/10.30827/Digibug.58496>
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric Theory*, 2.^a ed. Nueva York: McGraw-Hill.
- Pedrinaci, E., Caamaño, A., Cañal, P. y de Pro, A. (2012). *11 ideas clave: El desarrollo de la competencia científica*. Grao.
- Pekrun, R. (2005). Progress and open problems in educational emotion research. *Learning and Instruction*, 15, 497-506.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.learninstruc.2005.07.014>
- Pekrun, R., Hall, N., Goetz, T. y Perry, R. (2014). Boredom and academic achievement: Testing a model of reciprocal causation. *Journal of Educational Psychology*, 106(3), 696-710.
<https://doi.org/10.1037/a0036006>
- Pérez, A. y De Pro Bueno, A. (2018). Algunos datos sobre la visión de los niños y de las niñas sobre las ciencias y del trabajo científico. *Revista de género e igualdad*, 1, 18-31.
<https://doi.org/10.6018/iQual.306091>
- Pujalte, A., Santamaria, P., Adúriz-Bravo, A. y Meinardi, E. (2010). Una unidad didáctica centrada en la comprensión de la percepción de la luz y la visión. *Bio-grafía*, 3(5), 192-206.
- Quintero Macías, C. A. y Ramírez Flores, A. G. R. (2020). Emociones, habilidades cognitivas y disciplinas a través del Aprendizaje Basado en Problemas (ABP). *Emociones y aprendizaje*, 113-124.
- Real Decreto 126/2014, de 28 de febrero, por el que se establece el currículo básico de la Educación Primaria. <https://www.boe.es/buscar/pdf/2014/BOE-A-2014-2222-consolidado.pdf>
- Rebollo Catalán, M. Á., García Pérez, R., Barragán Sánchez, R., Buzón García, O. y Vega Caro, L. (2008). Las emociones en el aprendizaje online. *RELIEVE-Revista Electrónica de Investigación y Evaluación Educativa*, 14(1).
- Rosales, B., Flores, E. y Escudero, D. I. (2018). Aprendizaje Basado en Proyectos: Explorando la caracterización personal del profesor de matemáticas. *Zetetiké, Campinas*, 26(3), 506-525.
<https://doi.org/10.20396/zet.v26i3.8650908>
- Sanchez-Martín, J., Cañada-Cañada, F. y Dávila-Acedo, M. A. (2018). Emotional responses to innovative Science teaching methods: Acquiring emotional data in a General Science teacher education class. *Journal of Technology and Science Education*, 8(4), 346-359.
<http://dx.doi.org/10.3926/jotse.408>
- Santayasa, I., Rapi, N. y Sara, I. (2020). Project Based Learning and Academic Procrastination of Students in Learning Physics. *International Journal of Instruction*, 13(1), 489-508.
<https://doi.org/10.29333/iji.2020.13132a>
- Sarican, G. y Akgunduz, D. (2018). The impact of integrated STEM education on academic achievement, reflective thinking skills towards problem solving and permanence in learning in science education. *Cypriot Journal of Educational Sciences*, 13(1), 94-107.

- Solís-Pinilla, J. (2021). Aprendizaje basado en proyectos: una propuesta didáctica para el desarrollo socioemocional. *Revista Saberes Educativos*, 6, 76-94. <http://education.esp.macam.ac.il/article/2298>
- Soria, I., Gómez, C., Monsalve, B. y Fontanillo, A. (2019). Aprendizaje cooperativo basado en proyectos y entornos virtuales para la formación de futuros maestros. *Educación*, 55(2), 519-541. <https://doi.org/10.5565/rev/educar.935>
- Toledo Morales, P. y Sánchez García, J.M. (2018). Aprendizaje basado en proyectos: una experiencia universitaria. *Profesorado: Revista de curriculum y formación del profesorado*, 22(2), 429-449.
- Torre-Marín, V. G., Martí, J. y Amat, A. (2013). Una experiencia acerca de la enseñanza de la óptica para el profesorado de primaria. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, (Extra), 1651-1656. <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/307415>
- Walz, M. V., Albarenque, R. L. y Triano, J. M. (2016). Experiencias de física en las aulas escolares: Resultados producidos. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, (52), 381-401.
- Yllana-Prieto, F., Jeong, J. y González-Gómez D. (2021). Analysis of Pre-Service Teachers' emotions during a STEM online Escape Room. *Proceedings of SOCIOINT 2021 8th International Conference on Education and Education of Social Sciences 14-15 June*, pp. 334-341. ISBN: 978-605-06286-2-3 <https://doi.org/10.46529/socioint.202155>
- Zacarias, R., Ferreira, M. E., Rodrigues, F. L. A. y de Carvalho Júnior, G. D. (2020). Enseñanza-aprendizaje del concepto del color con alumnos de la escuela primaria. *Revista de Educación de Puerto Rico (REduca)*, 3(1), 1-22.

Emotions and the Acquisition of Light and Colours through Project-based Learning in Primary Education

Ainhoa Arana-Cuenca, Carmen Romero-García

Departamento de Didáctica de las Matemáticas y Ciencias Experimentales. Facultad de Educación - Universidad Internacional de la Rioja

ainhoa.arana@unir.net, mariadelcarmen.romero@unir.net

Sonia Pérez Andrés, Elena Marcilla García

CEIP Filósofo Séneca

sperezandres@educa.madrid.org, elena.marcillagarcia@educa.madrid.org

The teaching of science requires the application of procedures similar to those used by scientists in order to achieve an adequate scientific literacy that allows students to understand natural phenomena. A very useful strategy is the scientific method, as it allows students to learn science through a method, albeit adapted, like that of scientists. Primary school pupils have difficulties when facing science learning due to the use of complex and abstract scientific language, with erroneous preconceptions of certain concepts, as detected for the topic of light and colors. One way of tackling these difficulties is through methodologies that involve active student participation, one of these methodologies being project-based learning (PBL), which can solve these problems and fosters the necessary skills to work on scientific literacy, such as reflective and critical thinking, teamwork, communication, creativity and innovation, there being a great parallelism between the phases required to develop a project and those of the scientific method. Moreover, PBL connects the cognitive dimension with the emotional dimension, an important aspect since learning depends on the emotions we experience. PBL has been attributed an effect on positive emotions. However, this effect depends on the contents learned, and certain topics in physics, such as light and colors, have been related to the development of negative emotions. Based on the above, the aim of this study was to analyze the effect of PBL, using the scientific method and teaching light and colors, on the emotions experienced by the students and on their satisfaction with the methodology used. Thirty-two 5th and 6th year primary school students took part in the experiment. A quantitative methodology was used, with a pre-experimental pretest and post-test design. The proposal was developed in 6 sessions of 45 minutes each, through cooperative groups of 4 participants, heterogeneous in terms of cognitive abilities. In order to evaluate the acquisition of knowledge by students, a questionnaire composed of a total of 9 open questions was designed and applied before and after the proposal. Satisfaction was analyzed using a previously validated instrument that assesses four dimensions: motivation, organization, interaction-collaboration, and learning. To assess the possible change in emotions, 10 positive and 10 negative emotions were selected and assessed using a validated instrument. This was applied at the beginning and at the end of the intervention. The results show a significant increase in the knowledge acquired by the students after the implementation of the proposal, the effect being medium with regards to the contents of the scientific method and high for the contents of light and colors. The students expressed a high degree of satisfaction overall, as well as in each of the dimensions analyzed, with the dimensions of interaction-collaboration and learning being particularly valued. The analysis of emotions shows that significant changes have been generated in positive emotions, such as enthusiasm, confidence, security, orientation and attraction, and no changes have been detected in negative emotions. These results were not influenced by gender or the course the students were doing. It is concluded that the PBL methodology is effective for the acquisition of scientific knowledge and that it generates a good classroom atmosphere that favors learning regardless of the gender or grade level of the students. This improvement in learning may be influenced by the emotions, preferably positive, experienced by the students who have participated in this learning experience based on PBL methodology.



El diseño de preguntas investigables en el ciclo superior de primaria

Designing Research Questions with 10-12-Year-Old Students

Èlia Tena, Digna Couso

Departament de Didàctica de la Matemàtica i les Ciències Experimentals. Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, España
elia.tena@uab.cat, digna.couso@uab.cat

RESUMEN • El diseño de preguntas investigables es una destreza clave en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias que debe fomentarse desde edades tempranas. Sin embargo, su desarrollo en las aulas de primaria no es común, y se plantea generalmente en el contexto de investigaciones totalmente abiertas y para alumnado de edades avanzadas. En este artículo se analiza la evolución del desempeño de esta destreza en alumnado de 10-12 años en tres momentos clave de una secuencia de enseñanza y aprendizaje de indagación basada en la modelización. El análisis de las preguntas del alumnado evidencia que es capaz de diseñar preguntas investigables e ir las sofisticando cuando cuenta con las ayudas necesarias. Además, los resultados nos han permitido trazar una progresión de aprendizaje empírica para alumnado de primaria donde se identifican hitos clave en el camino de desarrollo de esta destreza.

PALABRAS CLAVE: Preguntas investigables; Educación primaria; Indagación; Práctica científica; Contaminación atmosférica.

ABSTRACT • Designing research question has been identified as a main skill in teaching and learning science that should be promoted from early age. However, designing research questions is not a common activity in schools and is often considered as an advanced skill for upper-secondary/university students that must be developed in the context of open inquiries. In this paper the evolution of 10-12-year-old students' skill to design research questions has been analysed in three key moments of a model-based inquiry teaching and learning sequence. The analysis of students' designed questions show that they can design and improve iteratively research questions if they have appropriate scaffoldings to do it. Additionally, results allowed us to design an empirical learning progression for primary school students where some stepping stones have been identified.

KEYWORDS: Investigable questions; Primary school; Inquiry; Scientific practices; Air pollution.

Recepción: noviembre 2021 • Aceptación: mayo 2022 • Publicación: marzo 2023

Tena, E. y Couso, D. (2023). El diseño de preguntas investigables en el ciclo superior de primaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 41(1), 101-123.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5573>

INTRODUCCIÓN

Las preguntas tienen un papel destacado en la construcción de conocimiento, tanto en ciencia como en el aula de ciencias (Chin y Osborne, 2008; Roca Tort et al., 2013). Por ello, existen numerosas investigaciones sobre esta temática (Ferrés-Gurt, 2017; García González y Furman, 2014; Herranen y Aksela, 2019; Lombard y Schneider, 2013).

En el aula de ciencias indagadora las preguntas que se plantean son muy diversas tanto respecto a su formato (orales o escritas) como a los momentos en que se formulan y los objetivos que persiguen (Rojas y Joglar, 2017). Algunos ejemplos son: las preguntas de los docentes para iniciar una indagación (Jiménez-Liso, 2020), las preguntas para guiar al alumnado en las distintas fases de un proceso indagador (Lombard y Schneider, 2013), las preguntas del alumnado para seguir la acción, etc.

La importancia que el marco socioconstructivista ha otorgado a la interacción dialógica en el aula y al papel activo del alumnado en la construcción de conocimientos ha aumentado el interés hacia las preguntas del alumnado y su relación con la construcción de significados. Estas preguntas se consideran un componente clave de la competencia científica del alumnado (NRC, 2012), y se han relacionado con el pensamiento crítico y la autorregulación, entre otros (Harlen, 2004; Joglar, 2014). Entre las diferentes tipologías, numerosos autores han identificado las preguntas investigables del alumnado como aquellas que deben recibir una mayor atención en el aula de ciencias indagadora (Ferrés-Gurt, 2017; Harlen, 2004).

Sin embargo, las investigaciones sobre las preguntas del alumnado en condiciones de aula habituales subrayan que los niños y las niñas plantean muy pocas preguntas espontáneamente y que a menudo estas preguntas son de bajo nivel cognitivo, cerradas, fácticas o procedimentales y poco orientadas científicamente (Chin y Osborne, 2008). Además, la investigación sobre la destreza de diseñar preguntas investigables se ha centrado principalmente en las etapas de bachillerato y universidad (Ferrés-Gurt, 2017; Lombard y Schneider, 2013). En las aulas de primaria, incluso en aquellas aulas centradas en la indagación, estas no parecen recibir suficiente atención.

Desafortunadamente, se da la paradoja de que en el caso de las preguntas investigables, como para el resto de prácticas científicas escolares, el alumnado pueda superar las dificultades e ir iterativamente sofisticando sus destrezas, lo que requiere involucrarse en su diseño desde las primeras etapas y con los apoyos necesarios (NRC, 2012).

Por todo ello, en esta investigación nos centramos en analizar la destreza de diseñar preguntas investigables del alumnado de 5.º y 6.º curso de primaria (10-12 años) al involucrarse en una investigación genuina semiabierta en un contexto sociocientífico (la contaminación del aire) y su evolución tras el uso de dos estrategias didácticas escogidas para favorecer su desarrollo (andamiaje y *feedforward*). Además, realizamos una propuesta de progresión de aprendizaje empírica respecto a la destreza de diseñar preguntas investigables que puede orientar los esfuerzos del profesorado en este ámbito.

MARCO TEÓRICO

La indagación como práctica científica

El enfoque de las prácticas científicas para la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias cuenta actualmente con un gran reconocimiento (Crujeiras y Jiménez Aleixandre, 2018; NRC, 2012; Osborne, 2014). Este marco enfatiza la participación del alumnado desde los primeros años de la escolaridad en actividades discursivas, cognitivas y sociales análogas a las de la ciencia real (Couso et al., 2020). Ello implica involucrar al alumnado en actividades como la construcción de teorías y modelos (modelización); la recogida y el análisis de datos de observaciones y/o experimentos (indagación), y la cons-

trucción de argumentos y su evaluación sobre la base de pruebas (argumentación) (Duschl y Grandy, 2012).

A raíz del informe Rocard (2007), y gracias al impulso de propuestas bien fundamentadas como la del NRC (2012), la enseñanza y aprendizaje de las ciencias basada en la indagación ha ido ganando protagonismo en las aulas, documentos e informes curriculares de distintos países (Romero-Ariza, 2017).

Uno de los retos principales de este marco es su definición, ya que el término *indagación* se ha utilizado para propuestas muy variadas que difieren entre ellas en la tipología de actividades, la autonomía otorgada al alumnado y el papel docente (Furtak et al., 2012; Romero-Ariza, 2017). En consecuencia, a menudo, pero especialmente en la etapa de primaria, se han planteado actividades de indagación pobres y simplificadas ligadas a la idea de un «método científico» estereotipado y universal, que reflejan una imagen desvirtuada y poco adecuada de cómo la ciencia construye significados (Couso, 2014; Windschitl et al., 2008).

De acuerdo con el marco de la indagación basada en la modelización (Windschitl et al., 2008; Jiménez-Liso et al., 2021; Romero-Ariza, 2017), las indagaciones de calidad son aquellas que involucran al alumnado tanto en el desarrollo de destrezas científicas (por ejemplo, el diseño de preguntas investigables, la recogida de datos, etc.) como en la construcción de modelos conceptuales clave (por ejemplo, la idea de materia), de manera epistemológicamente coherente con las maneras de hacer, pensar, hablar y sentir de la ciencia (Izquierdo, 2005; Adúriz-Bravo, 2021).

Las preguntas investigables en el aula de ciencias

Las preguntas investigables son preguntas de orientación empírica que relacionan cambios y variables en un fenómeno y que para responderlas el alumnado se debe involucrar en un proceso de recogida y/o análisis de datos y extracción de conclusiones (Ferrés-Gurt, 2017; García González y Furman, 2014; Harlen, 2004). Estamos de acuerdo con Cerda (2007) en que además de las características anteriores, las preguntas investigables en las aulas también deben ser sencillas y plausibles, es decir, factibles de ser abordadas en un periodo de tiempo prudente y en el contexto escolar en el que se llevan a cabo. Finalmente, y siguiendo la idea de indagación modelizadora (Adúriz-Bravo, 2021), estas preguntas han de servir para profundizar en el proceso de modelización del fenómeno estudiado.

Las investigaciones sobre preguntas investigables en el aula apuntan que su formulación por parte del alumnado (y profesorado) es una actividad compleja que implica, por un lado, movilizar habilidades de alto nivel cognitivo (por ejemplo, relacionar informaciones, identificar problemas, etc.) (Zoller y Tsapalis, 1997) y, por otro, la actividad metacognitiva de identificar, poner en juego y cuestionar los propios modelos e ideas (Sanmartí y Márquez, 2012; Schwarz y White, 2005).

Los resultados sobre el diseño de preguntas investigables en el aula subrayan que su formulación supone un gran reto para el alumnado, incluyendo el alumnado de bachillerato y universidad que ha optado por estudios científico-tecnológicos (Ferrés-Gurt, 2017; Lombard y Schneider, 2013) y también para los docentes (Joglar y Rojas, 2019). Una de las dificultades más comunes apuntadas por la literatura es que las preguntas planteadas por el alumnado son habitualmente preguntas informativas, es decir, cuestiones que se centran en la búsqueda de información factual y/o procedimental (Chin y Osborne, 2008; Harlen, 2004). En muchas ocasiones estas preguntas son inabordables experimentalmente, sobre todo en el tiempo y con los recursos disponibles, además de estar poco relacionadas con ideas relevantes científicamente (Sanmartí y Márquez, 2012; Ferrés-Gurt, 2017), a menudo debido a que son preguntas muy mediatizadas (Garriga et al., 2012).

Las investigaciones apuntan que la superación de las dificultades y el diseño de preguntas investigables no se dan de manera espontánea, sin un trabajo enfocado a ello (Ferrés-Gurt, 2017; Sanmartí y Márquez, 2012). No obstante, incluso en las aulas indagadoras de ciencias el desarrollo de esta des-

treza no es una actividad tan habitual, como pueden serlo la identificación de variables (Kuhn y Dean, 2005) o el diseño de investigaciones dirigidas (Tamir y García, 1992).

En las aulas en las que sí se ha realizado un trabajo en el desarrollo de la competencia de elaboración de preguntas investigables, su diseño se ha vinculado directamente con indagaciones abiertas en las que el alumnado debe plantear y llevar a cabo todas las fases de una investigación de manera autónoma (Herranen y Aksela, 2019). Este tipo de indagaciones, a pesar de tener un gran potencial para el desarrollo de las diferentes destrezas, especialmente si son genuinas (Ogborn, 2012), a menudo han recibido críticas por su falta de profundidad, por otorgar al alumnado un papel demasiado autónomo y por contar con un docente poco activador y que queda en segundo plano (Romero-Ariza, 2017).

Estrategias docentes para el desarrollo de preguntas investigables en el aula

En los últimos años, numerosas investigaciones han identificado el papel del docente activador como clave para la obtención de buenos resultados en las propuestas de indagación (Chin y Osborne, 2008; Couso, 2014; Furtak et al., 2012). Concretamente, los resultados sobre el diseño de preguntas investigables del alumnado con apoyo docente apuntan que, con una instrucción adecuada y los andamiajes necesarios, el alumnado es capaz de plantear, revisar y mejorar sus preguntas y convertirlas en preguntas cada vez más investigables, complejas y adecuadas, superando las dificultades apuntadas anteriormente (Ferrés-Gurt, 2017; Grunwald y Hartman, 2010). Por ello, diversas investigaciones buscan analizar qué estrategias docentes son clave para inducir y estimular el desarrollo de destrezas como el diseño de preguntas por parte del alumnado (Crujeiras y Jiménez-Aleixandre, 2018; Joglar, 2014). Desde una perspectiva socioconstructivista del aprendizaje, tanto el uso de andamiajes como la proalimentación o *feedforward* docente son dos estrategias privilegiadas para ello.

Comúnmente, el andamiaje es entendido como un conjunto de apoyos planificados por el docente y adaptados al nivel del alumnado que tienen como objetivo ayudarlo puntualmente en el desarrollo de un conocimiento o destreza que se encuentra en su zona de desarrollo próximo, yendo más allá de lo que el alumnado por sí solo sería capaz de plantear (van de Pol et al., 2010). De acuerdo con este autor, un andamiaje debe adaptarse al nivel del alumnado, transferirle gradualmente la responsabilidad de la tarea y retirarse de forma paulatina. Una forma interesante de andamiaje es el uso de diseños didácticos que proporcionan pistas o sugerencias de acción al alumnado, ya que les permiten mejorar tanto las preguntas investigables concretas que realizan como la destreza de diseñarlas en general (Chen et al., 2015; Puntambekar y Kolodner, 2005).

Desde una perspectiva de evaluación formativa-formadora que compartimos con Sanmartí (2020), una estrategia docente clave es el uso de la proalimentación o *feedforward* docente, es decir, el comentario evaluativo que hace el profesorado con el objetivo de ayudar al alumnado a avanzar en la construcción de conocimiento y destrezas, incluyendo sugerencias o preguntas sobre cómo mejorar (Conaghan y Lockey, 2009).

Las preguntas del profesorado, tanto en el uso de andamiajes como en el *feedforward*, resultan de gran interés (Joglar y Rojas, 2019). Sin embargo, en esta investigación no analizamos cómo son, sino qué efecto tienen en las producciones del alumnado.

Progresiones de aprendizaje empíricas

De acuerdo con Scott et al. (2019), las progresiones de aprendizaje empíricas en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias son un conjunto de hipótesis comprobables empíricamente que dibujan la manera como se espera que evolucionen las ideas y/o las formas de pensar de los estudiantes sobre un tema

concreto a medida que avanzan en sus estudios. Así, las progresiones de aprendizaje identifican un «camino de aprendizaje» probable que parte de ideas o habilidades iniciales del alumnado, pasa por un conjunto de hitos o estadios intermedios cada vez más sofisticados y llega hasta las ideas o habilidades objeto de aprendizaje (Corcoran et al., 2009). En este camino de sofisticación de las ideas o destrezas del alumnado se cruzan fronteras clave que señalan las principales dificultades del alumnado (Vergara et al., 2020; Zabel y Gropengiesser, 2011).

Desde esta perspectiva, las ideas o habilidades intermedias no son consideradas errores, sino ideas que actúan como hitos o lugares seguros del camino (*stepping stones* en inglés) necesarios y útiles para la construcción de ideas y/o el desarrollo de habilidades cada vez más complejas y parecidas a las de la ciencia erudita.

A pesar de que la mayoría de investigaciones y progresiones de aprendizaje empíricas existentes se centran en el análisis de las grandes ideas de la ciencia, estamos de acuerdo con Schwarz et al. (2009) en que también es importante analizar las progresiones de aprendizaje del alumnado en las diferentes prácticas y/o habilidades científicas.

Conocer las ideas/habilidades iniciales, finales y los hitos o estadios intermedios en el desarrollo de las ideas y destrezas científicas del alumnado puede ser útil a los docentes tanto para el diseño de andamiajes concretos como para guiar a su alumnado a superar las principales dificultades (Scott et al., 2019).

OBJETIVOS

Esta investigación busca estudiar las preguntas investigables que plantea el alumnado en el contexto de una problemática sociocientífica actual como la contaminación atmosférica. Concretamente, los objetivos son:

- O1. Analizar el grado de investigabilidad de las preguntas diseñadas por el alumnado de 5.º y 6.º de primaria y su evolución con el uso de diferentes estrategias didácticas (andamiaje y *feedforward*) en el contexto de una secuencia didáctica orientada a investigar y mejorar la calidad del aire en su escuela.
- O2. Diseñar una progresión de aprendizaje empírica que describa el grado de sofisticación de las preguntas investigables del alumnado, identificando los hitos alcanzados, así como las fronteras clave.

METODOLOGÍA

Contexto e instrumentos de recogida de datos

Los datos de esta investigación se enmarcan en una secuencia didáctica (SEA) de 8 horas de duración diseñada e implementada iterativamente durante dos cursos (2018-19 y 2019-20) en dos escuelas (E1 y E2) con alumnado de 5.º y 6.º de primaria (Tena, 2021). La SEA se fundamenta en dos ideas clave en didáctica de las ciencias: la enseñanza y aprendizaje de la ciencia como práctica científica (Osborne, 2014) y la contextualización en problemáticas sociocientíficas cotidianas (Jiménez-Liso et al., 2021). Concretamente, tiene como objetivo mejorar la idea de corpuscularidad de la materia y las destrezas de indagación del alumnado al involucrarlo en una indagación modelizadora semiabierta en el contexto de la contaminación atmosférica. Esta SEA busca construir una idea de contaminación atmosférica ligada a la presencia de partículas sólidas en suspensión en el aire (PM en la literatura científica), por su elevada presencia en las ciudades y sus efectos perjudiciales en la salud de los humanos (Gignac et

al., 2021). Así, intenta confrontar las ideas alternativas más comunes del tema (por ejemplo, relacionar contaminación con CO₂ o microorganismos). El diseño final se encuentra disponible en abierto¹.

Este artículo se centra en la destreza de diseñar preguntas investigables en un contexto empírico semiabierto. Para ello se seleccionaron 40 alumnos de 10-12 años del curso 2019-20 siguiendo un criterio de conveniencia (Miles et al., 2014). Para garantizar cierta variedad se han recogido datos en dos aulas (una de 5.º y otra de 6.º curso) de escuelas diferentes respecto al perfil socioeconómico de las familias y a la manera habitual como el docente trabaja las ciencias en el aula. Como parte de la SEA, el alumnado se ha involucrado en un proceso didáctico similar al propuesto por Sanmartí y Márquez (2012), donde se plantea a niños y niñas una pregunta guía general (¿cómo es la calidad del aire de la escuela?) a partir de la cual deben diseñar una pregunta investigable sobre la temática que puedan responder investigando. Se han recogido un total de 58 producciones del alumnado en tres momentos: 32 preguntas iniciales individuales (M1), 13 preguntas intermedias grupales (M2) y 13 preguntas finales grupales (M3).

Se ha optado en M1 por un diseño individual y sin ninguna guía o ayuda para conocer qué preguntas plantea el alumnado antes de la influencia del trabajo en grupo (Chin y Osborne, 2010). Tras este diseño, se han implementado dos estrategias didácticas para fomentar su revisión: el uso de una plantilla de andamiaje y la guía del alumnado mediante proalimentación o *feedforward* docente.

Así, tras M1, el alumnado se ha unido en sus grupos cooperativos habituales de clase de 3-5 personas (13 grupos en total) y se les ha facilitado la plantilla de andamiaje PaPER (Tena y Couso, 2020). Esta herramienta estructura las diferentes fases de diseño de una investigación (por ejemplo, diferenciando la pregunta investigable del procedimiento de la investigación) y apunta criterios específicos para cada una de las fases en forma de preguntas de autoevaluación (por ejemplo, ¿La pregunta es concreta?: *nos podemos imaginar qué instrumentos se utilizarán, cuáles serán los resultados...*). Tras esta autorrevisión se han vuelto a recoger las producciones del alumnado (M2).

A continuación, para fomentar nuevamente la revisión de las preguntas, las docentes (docente habitual e investigador principal del artículo) han observado las producciones y ofrecido una proalimentación concreta y ajustada a las propuestas de cada grupo. Algunos ejemplos de *feedforward* usado por las docentes para que el alumnado mejorara la investigabilidad de sus preguntas respecto a la identificación de variables han sido: ¿cuando tengáis los resultados de los sitios que proponéis, cómo vais a saber si es mucho o es poco? o ¿cómo os vais a asegurar de que los resultados sean comparables entre ellos? Tras este *feedforward* se han recogido las producciones finales del alumnado (M3).

Para la triangulación de los datos, además de las producciones, se han usado grabaciones de las puestas en común y las notas de la investigadora principal con rol docente en la escuela (E1) y como observadora no participante en E2.

Análisis de datos

Las producciones del alumnado se han transcrito y analizado siguiendo el método de comparación constante hasta la saturación de los datos (Miles et al., 2014) con la ayuda del *software* ATLAS.ti 9.

En un primer ciclo de codificación se han identificado las dimensiones clave para caracterizar las preguntas investigables y su evolución (O1), lo que hemos llamado investigabilidad de las preguntas. Para ello se ha partido de la distinción entre presupuesto (modelo implícito en la pregunta) y demanda (tipología de pregunta) de Roca Tort et al. (2013), concretándolo en dos dimensiones: la relación de la pregunta con el problema guía planteado (la calidad del aire en la escuela) (dimensión 1 en la figura 1) y la tipología de preguntas (dimensión 2 en la figura 1). Además, se ha añadido una tercera dimen-

1. La SEA completa se puede consultar en: <https://ddd.uab.cat/record/225073?ln=ca> y su versión final mejorada en: <https://ddd.uab.cat/record/259686?ln=ca>.

sión llamada grado de experimentalidad de la pregunta (dimensión 3 en la figura 1). Esta última se relaciona con dos aspectos clave de las preguntas investigables: *a*) la naturaleza empírica y, por tanto, la necesidad de que las cuestiones establezcan relaciones entre variables que solo pueden contestarse recogiendo datos (categoría 3.A. naturaleza empírica); y *b*) la plausibilidad de la pregunta, es decir, preguntas que orienten investigaciones plausibles de ser realizadas en el contexto real del aula y en las condiciones en las que se puedan llevar a cabo (categoría 3.B. plausibilidad).

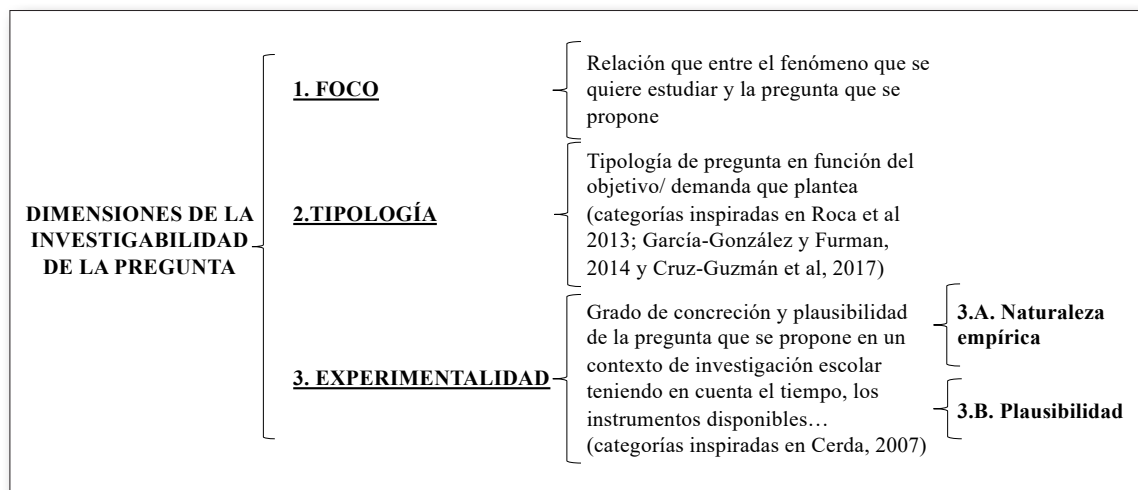


Fig 1. Red sistémica de dimensiones de investigabilidad de la pregunta.

En un segundo ciclo de codificación, se han identificado de manera deductiva e inductiva categorías y subcategorías para las dimensiones anteriores. En las dimensiones 1 y 3 se han elaborado categorías esencialmente emergentes. En cambio, en el caso de la dimensión 2 (tipología de la pregunta) las categorías se han inspirado en propuestas anteriores (Roca Tort et al., 2013; Cruz-Guzmán et al., 2017; García González y Furman, 2014; Rojas y Joglar, 2017), adaptándolas a las necesidades del contexto de indagación empírica genuina. Así, en algunos casos se han adoptado categorías directamente de estas investigaciones (por ejemplo, 2.2. Explicación causal de Roca Tort et al., 2013), y en otros se han reformulado el nombre y la definición de algunas de las categorías propuestas (por ejemplo, las preguntas 2.8. Experimentación están inspiradas en las preguntas de relaciones de Cruz-Guzmán et al., 2017).

Estas categorías se han ordenado de menor a mayor en función del grado de proximidad a las características que la literatura asocia a las preguntas investigables. En las dimensiones 1 y 3, este orden se deriva de la propia definición (por ejemplo, las preguntas con foco 1.3. Total son más investigables que las de foco 1.1. Tangencial).

Para el caso de las tipologías de pregunta (dimensión 2), en los que la ordenación no es evidente, nos hemos inspirado en Hofstein et al. (2005), que dividen las preguntas en bajo y alto orden atendiendo al contexto didáctico en el que se realizan. En el contexto de indagación empírica genuina planteado, se ha establecido un continuo que va desde las preguntas consideradas de alta investigabilidad (aquellas que para ser respondidas se debe realizar una indagación empírica), como las preguntas 2.8. Experimentación (preguntas donde se indagan datos específicos en diferentes situaciones y/o condiciones para poder sacar conclusiones) o 2.7. Descripción (preguntas donde se observa y/o mide un dato en una situación o condición para poder describir), hasta las preguntas de baja investigabilidad (aquellas cuya respuesta es un hecho y/o explicación que a menudo se encuentra literalmente en fuentes como libros de texto o internet), como 2.3. Generalización (preguntas que piden información o datos sobre un hecho general para conocerlo mejor). Esta clasificación sigue un orden similar a la planteada

por Cruz-Guzmán et al. (2017). No obstante, a diferencia de la propuesta anterior, las preguntas de descripción derivadas de una observación, diferenciación y/o comparación de variables para su descripción (preguntas 2.7. Descripción en este artículo) han sido consideradas de alto orden. Esta decisión se fundamenta en el hecho de que las preguntas descriptivas que dan pie a investigaciones sencillas para la construcción de modelos descriptivos tienen un papel relevante en las aulas indagadoras de primaria (Jiménez-Liso et al., 2020).

El sistema final de dimensiones y categorías se recoge en la siguiente red sistémica (tabla 1).

Tabla 1.

Tabla de dimensiones y categorías para el análisis de las preguntas investigables. En cursiva y con código las preguntas del alumnado; y sin cursiva, fondo gris claro y sin código las preguntas adhoc ejemplares construidas para facilitar la comprensión de la categoría. Con el fondo azul señalamos las categorías deseables para las preguntas investigables en el aula de primaria. Los códigos de los ejemplos hacen referencia al momento de recogida (M1, M2 y M3), la escuela (E1 y E2) y el grupo de alumnado (GX)

DIMENSIÓN		CATEGORÍAS	EJEMPLOS
INVESTIGABILIDAD DE LAS PREGUNTAS	1. FOCO	1.1 Tangencial: La pregunta diseñada no se relacionan con el fenómeno que se quiere trabajar.	“¿Cuánto CO2 absorbe un árbol en un día?” (M1_E2_G7)
		1.2 Superficial: La pregunta diseñada se relacionan con algún aspecto anecdótico del fenómeno que se quiere trabajar	“¿Estamos contaminados?” (M1_E2_G5)
		1.3 Total: La pregunta diseñada se relaciona con aspectos concretos del fenómeno que se quiere trabajar.	“¿Dónde hay más contaminación en la clase o en el huerto” (M3_E2_G5)
	2. TIPOLOGÍA	2.1 Generalización: Son preguntas que piden información o datos específicos sobre una entidad, fenómeno o proceso en general para poder conocerlo mejor a través de la búsqueda de información o datos de otros. Son preguntas del tipo: ¿Qué hay en...?, ¿De dónde sale...?, ¿Cómo se trata...?	“De qué está formada la contaminación?” (M1_E2_G7) “De qué está formada la contaminación?” (M1_E2_G7) “¿Cuánto CO2 absorbe un árbol en un día?” (M1_E2_G7)
		2.2 Explicación causal: Son preguntas que piden las características, diferencias, procesos cambios... sobre una entidad, fenómeno o proceso para conocer su causa o motivo. Son preguntas del tipo: ¿Por qué...?, ¿Cuál es la causa de...?, ¿Cómo se explica que...?	“Por qué es malo el CO2 para los humanos?” (M1_E2_G6) “En la clase de informática hay el mismo nivel de contaminación? ¿Por qué?” (M1_E2_G1)
		2.3 Opinión/ valoración: Son preguntas que piden opiniones y/o valoraciones personales sobre una entidad, fenómeno o proceso para conocer sus ideas, sensaciones, percepciones... Son preguntas del tipo: ¿Qué piensas/ opinas de...?, ¿Qué es para ti más...?, ¿Qué harías si...?	¿Crees que en nuestra ciudad hay mucha o poca contaminación? ¿Qué es para ti más importante disminuir la contaminación del aire o del agua
		2.4 Acción: Son preguntas que piden qué se puede hacer para propiciar un cambio, resolver o evitar una entidad, fenómeno o proceso problemático o no deseable. Son preguntas del tipo: ¿Qué se puede hacer...?, ¿Cómo se puede...?	“Como podemos ayudar a reducir la contaminación de la escuela?” (M1_E2_G4) “¿Cuantos elementos de la escuela pueden ayudar a reducir la contaminación?” (M1_E1_G4)
		2.5 Comprobación: Son preguntas que piden cómo se sabe o cómo se ha llegado a conocer una entidad, fenómeno o proceso. Son preguntas del tipo: ¿A través de qué método?, ¿Qué evidencias hay?, ¿De qué manera podríamos saber...?	¿Cómo se puede conocer la contaminación que hay un sitio? ¿Qué evidencias tenemos que este sitio está contaminado?

DIMENSIÓN		CATEGORÍAS	EJEMPLOS	
INVESTIGABILIDAD DE LAS PREGUNTAS	2. TIPOLOGÍA	2.6 Predicción: Son preguntas que piden datos sobre una entidad, fenómeno o proceso futuro para que se conjeture sobre su posible comportamiento. Son preguntas del tipo: ¿Qué puede pasar si...?, ¿Podría ser...?, ¿Qué consecuencias podría tener...?	¿Qué pasaría si en vez de capturar las partículas de contaminación con un filtro y vaselina lo hiciéramos con un filtro y otro material pegajoso como la miel? ¿Podría ser que si lloviera hubiéramos obtenido resultados del número de partículas contaminantes diferentes?	
		2.7 Descripción: Son preguntas que piden datos específicos sobre una entidad, fenómeno o proceso en un momento, localización y/o condiciones concretas para poder conocerlo mejor a través de la observación y/o medición propia o de otros. Son preguntas del tipo: ¿De dónde sale...?, ¿Cuánta...?	“¿Qué contaminación del aire tiene nuestra escuela?” (M1_E1_G1) “¿Qué grado de contaminación hay en la escuela?” (M1_E1_G3)	
		2.8 Experimentación: Son preguntas que piden datos específicos sobre una entidad, fenómeno o proceso en diversos momentos, localizaciones y/o condiciones concretas para poder sacar conclusiones a través de su investigación y/o testeo empírico. Son preguntas del tipo ¿Cuál de los dos...?, ¿Es igual ... que...?, ¿Como influye... en...?, ¿Durante cuánto tiempo...?	“¿Qué aire es mejor el de una clase con las ventanas cerradas o el del huerto?” (M1_E2_G3) “¿Cuánta contaminación hay en una semana en un aula?” (M1_E2_G1)	
	3. EXPERIMENTALIDAD	3.A Naturaleza empírica	3.A.1 Sin variables: La pregunta planteada no incluye variables	“¿Que hay en nuestro aire? (M1_E2_G7)
			3.A.2 Con variable dependiente: La pregunta planteada hace referencia a la variable dependiente –VD- (aquello que se quiere medir) pero no a la variable independiente (VI) y/o de control (VC)	“¿Cuánta contaminación hay en la escuela?” (M2_E1_G5)
			3.A.3 Con variable dependiente e independiente: La pregunta planteada hace referencia a la variable dependiente –VD- (aquello que se quiere medir) y a la variable independiente –VI- (aquello que se quiere a cambiar) pero no a las variables de control (VC)	“¿Qué sitio está más contaminado: el polideportivo, la sala de maestros, el patio de las gradas o el pasillo de infantil?” (M3_E2_G2)
			3.A.4 Con variable dependiente, independiente y de control: La pregunta planteada hace referencia a la variable dependiente –VD- (aquello que se quiere medir), a la variable independiente –VI- (aquello que se quiere a cambiar) e incluye variables de control –VC- (aquello que se debe mantener igual)	“¿Qué grado de contaminación hay en la puerta principal y en la puerta de detrás en 24h y a un metro y medio de distancia del suelo?” (M3_E1_G6)
		3.B Plausibilidad	3.B.1 No plausible: La pregunta planteada no se puede llevar a cabo en el contexto en el que se plantea. Es decir, o bien no se pueden obtener datos con los instrumentos disponibles y/o las estrategias de recogida y análisis no son suficientemente concretas o/ni se ajustan a las condiciones en las que se llevará a cabo.	“¿Qué contaminación hay en el aire del colegio y el aire de Barcelona?” (M1_E1_G5)
	3.B.2 Plausible: La pregunta planteada se puede llevar a cabo en el contexto en el que se plantea. Es decir, se pueden obtener datos con los instrumentos disponibles y las estrategias de recogida y análisis son suficientemente concretas y se ajustan a las condiciones en las que se llevará a cabo.		“¿Qué aire es mejor, el de una clase con las ventanas cerradas o el del huerto?” (M2_E1_G3)	

Para el diseño de la progresión de aprendizaje empírica (O2), se ha realizado un análisis de las relaciones de coocurrencia entre las dimensiones de investigabilidad de las preguntas del alumnado. El resultado de estas matrices de coocurrencia ha permitido identificar qué características de investigabilidad coinciden frecuentemente en las preguntas del alumnado (por ejemplo, 3.A.3 con variable dependiente e independiente y 2.8. Experimentación).

Las relaciones de coocurrencia encontradas se han ordenado de menor a mayor grado de sofisticación siguiendo la lógica usada para ordenar las categorías y teniendo en cuenta el contexto en el que se dan. A las coocurrencias entre categorías de bajo orden y, por tanto, relacionadas con características de preguntas con poca investigabilidad (por ejemplo, preguntas con foco tangencial –1.1– y con variable dependiente –3.A.2–) se les ha asignado un nivel más bajo (N2) que a aquellas coocurrencias entre categorías de alto orden y, por tanto, con características cercanas a las de las preguntas investigables ejemplares (por ejemplo, N5 es resultado de la coocurrencia de preguntas con foco Total –1.3–; de Experimentación –2.8–; con variable dependiente e independiente –3.A.4–; y Plausibles –3.B.2–).

Para garantizar la validez interpersonal y temporal del análisis se ha repetido el proceso de codificación un mes más tarde sin encontrar diferencias significativas.

RESULTADOS

Resultados respecto a la investigabilidad de las preguntas

A continuación, se muestran el porcentaje de preguntas propuestas por el alumnado para cada una de las categorías y las dimensiones de investigabilidad y su evolución a lo largo del tiempo (figuras 3, 4, 5 y 6). Los resultados del alumnado se muestran conjuntamente, ya que no se han observado diferencias significativas ni entre los diferentes cursos ni respecto a la tipología de centros y docentes. Concretamente, en el eje Y de los gráficos se encuentran los momentos clave en que se han recogido los datos y en el eje X se grafican las diferentes categorías para cada dimensión de la investigabilidad de las preguntas. Los colores más oscuros y la posición en la parte superior representan una mayor cercanía a las características de las preguntas investigables ejemplares.

Foco de la pregunta

Los resultados obtenidos en la dimensión 1 «foco de la pregunta» nos han permitido observar una rápida evolución de la calidad de las preguntas diseñadas por el alumnado entre M1 y M2 que se mantiene en M3 (figura 2).

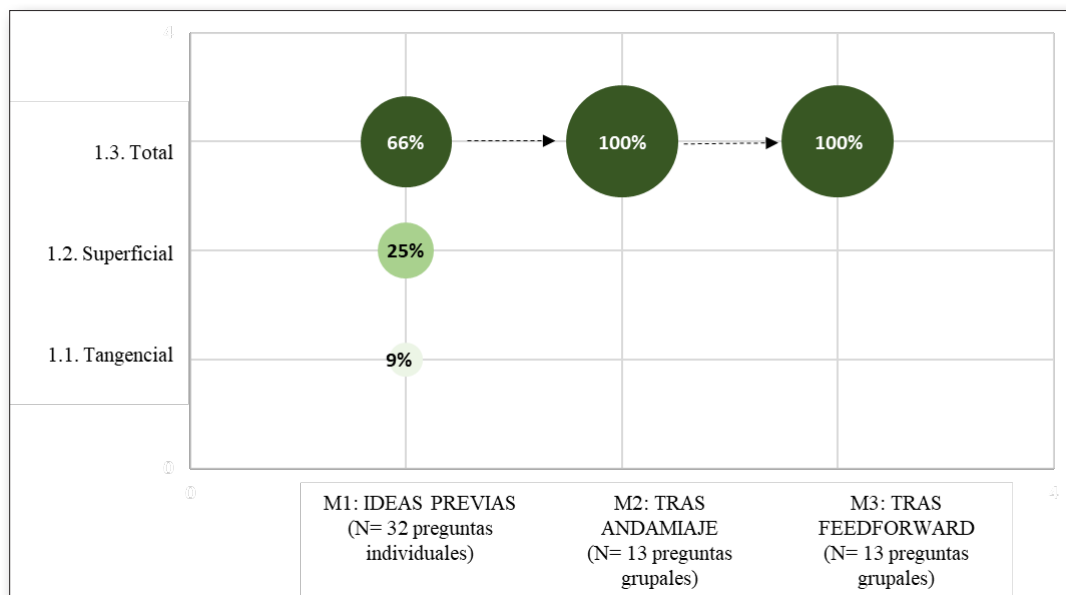


Fig 2. Evolución del foco de la pregunta (eje Y) en las preguntas diseñadas por el alumnado a lo largo de tres momentos de la SEA (eje X). Las flechas discontinuas marcan la tendencia general.

En M1, una parte importante de las preguntas diseñadas por el alumnado (34 %) únicamente se relaciona con el problema guía de manera tangencial (1.1 Tangencial 9 %) o de manera muy general y sin hacer referencia al caso concreto planteado (1.2 Superficial: 25 %). Por ejemplo:

«¿Cuánto CO₂ sacamos por la boca con la respiración?» (M1_1.1 Tangencial _E2_G6)

«¿De qué está formada la contaminación?» (M1_1.2 Superficial_E2_G7)

Sin embargo, desde M1 el 66 % de las preguntas hacen referencia explícita a aspectos de la calidad del aire en su escuela. Este porcentaje se eleva hasta el 100 % en el M2 tras el trabajo en grupo y el uso de la plantilla PaPER, y se mantiene con este porcentaje en M3.

«¿Qué clase de primaria es la más contaminada?» (M2_1.3 Total_E2_G4)

Los resultados positivos obtenidos desde M1 nos hacen pensar que la relación con el problema guía no es un aspecto que suponga una gran dificultad para el alumnado. Estos resultados son coherentes con los de Roca Tort (2007), donde, en la mayoría de los contextos observados, el alumnado incluye en sus preguntas aspectos del modelo de referencia que se quería trabajar. A diferencia del estudio anterior, el porcentaje de preguntas que en M1 hacen referencia a la temática es mucho más elevado. La comparación entre las dos situaciones educativas nos ha hecho identificar dos aspectos que pueden haber influido en este resultado. Por un lado, que se ha explicitado desde M1 la pregunta guía (*¿cómo es la calidad del aire de la escuela?*), acotando el fenómeno (contaminación) y el espacio de actuación (escuela). Y, por otro lado, que uno de los criterios explícitos de PaPER para la autoevaluación es que la pregunta debe aportar al problema guía (por ejemplo, *¿La pregunta responde a la problemática inicial sobre cómo es la calidad del aire de la escuela?*).

Tipología de pregunta

Los resultados sobre la tipología de preguntas diseñadas nos han permitido observar que el alumnado no hace referencia en ningún momento de la SEA a ciertas tipologías: preguntas de opinión/valoración, de predicción y de comprobación (figura 4). La ausencia de preguntas de opinión/valoración se puede deber a que el tipo de demanda/ pregunta guía planteada orienta hacia el diseño de preguntas que requieren comprobación empírica. En el caso de las preguntas de predicción y comprobación, en cambio, su ausencia se puede deber a la naturaleza del fenómeno estudiado, en el que las variables no se pueden manipular deliberadamente pero sí identificar condiciones diferentes para su exploración (Ioannidou y Erduran, 2021).

En relación con las tipologías que sí aparecen (preguntas de generalización, explicación causal, acción, descripción, y experimentación), se observa una evolución progresiva que va desde la diversidad de tipologías en M1, incluyendo las preguntas de bajo potencial de investigabilidad (por ejemplo, de generalización o explicación causal), hasta tipologías de preguntas con cada vez más potencial de investigabilidad (por ejemplo, preguntas de descripción y experimentación) (figura 3).

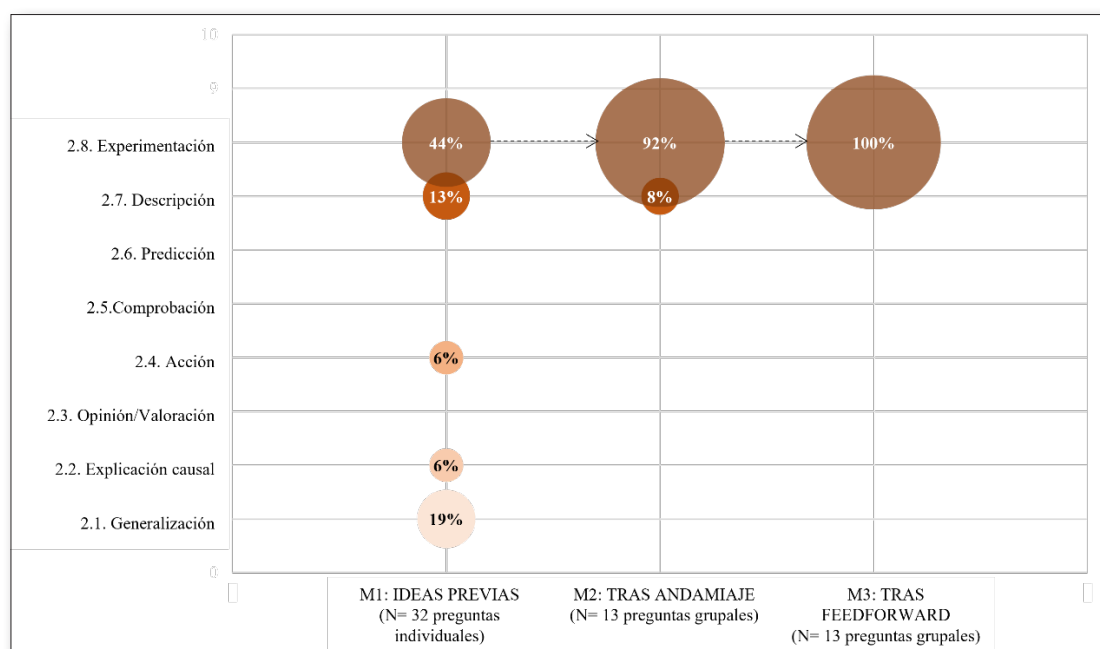


Fig. 3. Evolución de la tipología de preguntas diseñadas por el alumnado (eje Y) a lo largo de tres momentos de la SEA (eje X). Las flechas discontinuas marcan la tendencia general.

Así, en M1 encontramos sobre todo preguntas de experimentación (44 %) y en menor medida preguntas de generalización (19 %), descripción (13 %), explicación causal (6 %) y acción (6 %).

«¿Qué diferencia hay entre un sitio contaminado y uno que no?» (M1_2.1 Generalización G2_G5)

«¿Por qué es malo el CO₂ para los humanos?» (M1_2.2 Explicación causal_E2_G6)

«¿Cómo podemos ayudar a reducir la contaminación de la escuela?» (M1_2.4 Acción_E2_G4)

«¿Qué grado de contaminación hay en el patio?» (M1_2.7 Descripción_E2_G7)

A medida que avanza la SEA (en M2 y M3) aumentan las preguntas de experimentación que invitan a la recogida de datos para sacar conclusiones.

«¿Dónde hay más contaminación en el patio del olivo, en el comedor o en la clase de música?» (M2_2.8 Experimentación _E2_G5)

«¿Qué aire es mejor, el de una clase con las ventanas cerradas o el del huerto?» (M2_2.8 Experimentación _E1_G3)

Es importante destacar la presencia en M1 (13 %) y M2 (8 %) de preguntas de descripción cuyo objetivo es obtener información de hechos o datos concretos. Estas preguntas, aunque de naturaleza investigable, promueven investigaciones muy limitadas que se podrían responder observando un solo aspecto o realizando una única medición.

«¿Cuánto CO₂ sacamos por la boca con la respiración?» (M1_2.7 Descripción _E2_G7)

«¿Cuánta contaminación hay en la calle Sant Jaume?» (M1_2.7 Descripción _E2_G6)

Estos resultados son concordantes con investigaciones anteriores (García González y Furman, 2014; Lombard y Schneider, 2013; Rojas y Joglar, 2017) que apuntan que el alumnado al que se le demanda diseñar preguntas investigables plantea inicialmente preguntas de tipo descriptivo, que de hecho tienen un papel importante en la construcción de modelos descriptivos (Jiménez-Liso et al., 2021). Como subrayan investigaciones con alumnado más mayor, con una instrucción planificada y los apoyos necesarios el alumnado es capaz de, progresivamente, formular preguntas cada vez más investigables.

Contrariamente a estas investigaciones, en nuestro contexto desde M1, el porcentaje de preguntas de experimentación diseñadas por el alumnado es elevado (44 %). Una posible explicación de la diferencia tiene que ver con la relación directa que García González y Furman (2014) establecen entre preguntas de experimentación e investigables. Tal como discutimos más adelante, pese a que la mayoría de las preguntas de experimentación tienen potencial para ser preguntas investigables, no todas ellas lo son. De hecho, a muchas (especialmente en M1 y M2) les siguen faltando elementos clave (por ejemplo, referencia a variables concretas) para poder ser consideradas buenas preguntas investigables.

«¿Qué clase de primaria es la más contaminada?» (M1_2.8 Experimentación poco concreto _E2_G4)

«¿Qué sitio de la escuela está más contaminado?» (M1_2. Experimentación poco concreto _E2_G4)

Grado de experimentalidad de la pregunta

El análisis del grado de experimentalidad de las preguntas se ha hecho atendiendo a dos aspectos: la presencia de variables (relacionada con la presencia explícita de las variables relevantes, generalmente dependiente –VD–, independiente –VI– y de control –VC–) (figura 4) y la plausibilidad (relacionada con la posibilidad de obtener datos y responder a la pregunta en el contexto en el que se plantea y con los instrumentos disponibles) (figura 5).

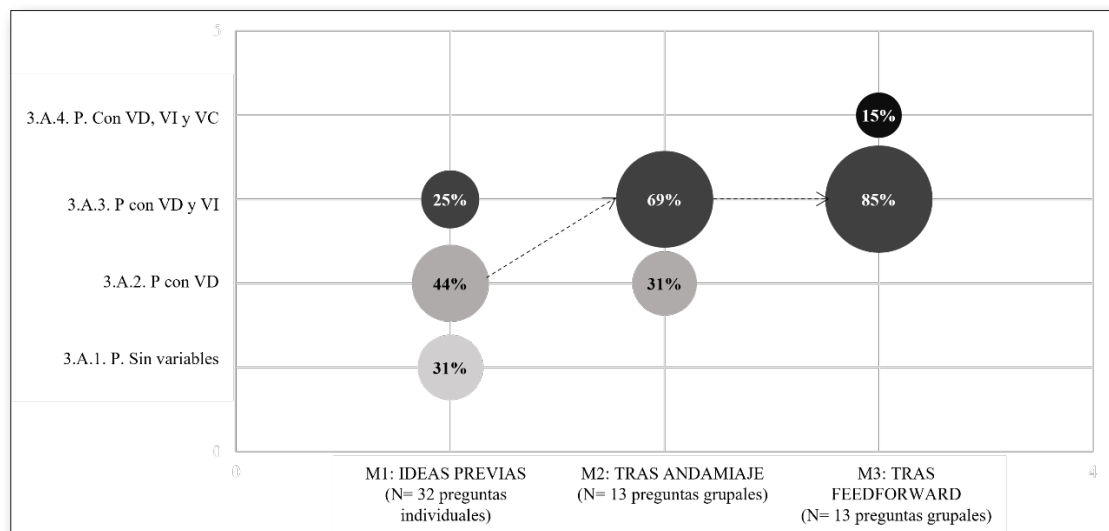


Fig. 4. Evolución de la presencia de variables en las preguntas diseñadas por el alumnado (eje X) a lo largo de tres momentos de la SEA (eje Y). Las flechas discontinuas marcan la tendencia general.

Se ha observado que la presencia de variables (figura 4) es la categoría donde el alumnado presenta mayores dificultades a lo largo de toda la SEA. En M1, una parte importante del alumnado o bien no incluye ninguna variable en su pregunta (3.A.1 Sin variables 31 %), o bien únicamente hace referencia a la variable dependiente, generalmente de una manera poco concreta (3.A.2 con VD 44 %). Por ejemplo:

«¿De qué está formada la contaminación?» (M1_3.A.1 Sin variables_E2_G7)

«¿Qué grado de contaminación [en forma de PM] hay en la escuela?» (M1_3.A.2 con VD_E1_G3)

Tras el trabajo en grupo usando la plantilla PaPER (M2) desaparecen las preguntas 3.A.1 sin variables y disminuyen hasta un 31 % las preguntas 3.A.2 con VD, mientras que aumentan hasta más de la mitad aquellas que incluyen la variable dependiente e independiente (3.A.3 con VD y VI 69 %). Esta tendencia se ha consolidado tras el *feedforward* docente (M3), cuando todas las preguntas incluyen ambas variables.

«¿Qué sitio está más contaminado [por PM]: el polideportivo, la sala de maestros, el patio de las gradas o el pasillo de infantil?» (M1_3.A.3 con VD y VI_E1_G6)

Cabe destacar que no es hasta M3, con el intercambio directo con la docente, que una parte de las preguntas (15 %) incluyen explícitamente alguna variable de control relevante para la experimentación (3.A.4 con VD, VI y VC).

«¿Cuánta contaminación [en forma de PM] hay en el aula de informática y fuera en la secretaría comparándolo con un disco sin usar en 3 días?» (M3_3.A.4 con VD, VI y VC_E1_G6)

Las dificultades observadas en relación con la variable independiente y, especialmente, con las variables de control han sido subrayadas por numerosas investigaciones previas en niveles educativos superiores que además apuntan que la evolución de las preguntas en este sentido es más paulatina que con respecto a las otras variables, sugiriendo que la inclusión de variables de control hace referencia a preguntas con niveles de investigabilidad más elevados (Ferrés Gurt, 2017; Grunwald y Hartman, 2010).

En relación con la plausibilidad (figura 5), los resultados obtenidos en M1 muestran que únicamente el 13 % de las preguntas son suficientemente concretas y usan instrumentos y estrategias adecuados para el contexto escolar en el que se llevarán a cabo.

«¿Qué contamina más, las [clases] de la ESO o las [clases] de primaria?» (M1_3.B.1 No plausible_E2_G1)

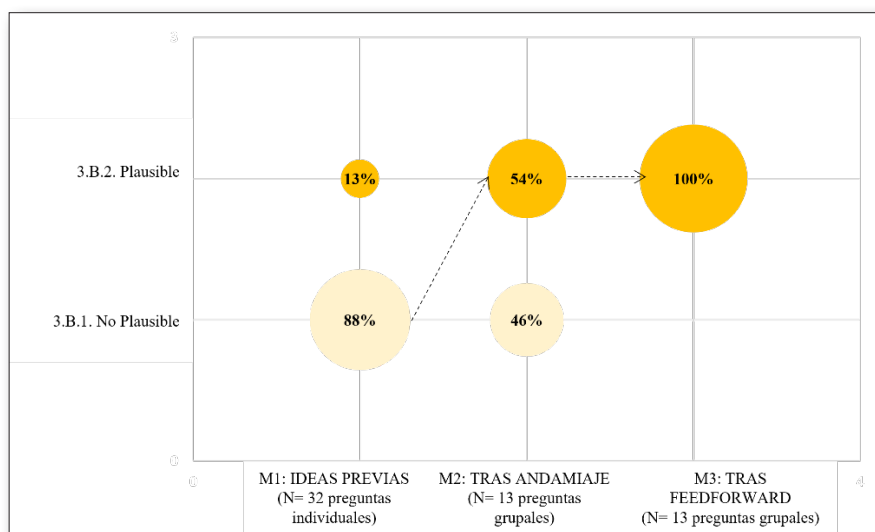


Fig.5. Evolución de la plausibilidad de las preguntas diseñadas por el alumnado (eje X) a lo largo de tres momentos de la SEA (eje Y). Las flechas discontinuas marcan la tendencia general.

En M2 el porcentaje de preguntas que presentan esta dificultad disminuye hasta el 46 % y desaparece en M3.

«Dónde hay más contaminación [de PM] en la calle Topete [con mucho tráfico] o Sant Jaume [con menos tráfico]? (M3_3.B.2 Plausible_E2_G6)

Esta dificultad para diseñar preguntas plausibles está en línea con otras investigaciones realizadas (Ferrés Gurt, 2017; Lombard y Schneider, 2013). La rápida evolución de las preguntas en esta categoría nos hace pensar que es una dificultad fácil de superar cuando el fenómeno estudiado permite una recogida de datos con instrumentos y metodologías sencillos y que están al alcance del alumnado. Sería interesante analizar esta evolución en casos en los que para la investigación se utilizan instrumentos o estrategias de recogida de datos de mayor complejidad.

Diseño de la progresión de aprendizaje empírica

A continuación, se presentan los resultados relativos a los niveles de sofisticación de las preguntas obtenidos tras el análisis de la coocurrencia entre las dimensiones de investigabilidad anteriores. Para su representación se ha utilizado un «paisaje o mapa de destrezas» análogo con respecto a la forma/estructura a los paisajes conceptuales (*conceptual landscapes*) propuestos por Zabel y Gropengiesser (2011) y Vergara et al. (2020), para el contenido conceptual de selección natural y transferencia de energía.

Como en estas propuestas, en el mapa de destrezas (figura 6) se ha delimitado un área coloreada para cada uno de los niveles de sofisticación identificados (N0-N5), ordenados de izquierda a derecha

y de abajo arriba en función del nivel de sofisticación, siendo el área coloreada con un azul claro abajo a la izquierda la de nivel más sencillo (N0) y el área azul oscuro arriba y a la derecha el nivel más sofisticado (N5). Dentro de cada una de las áreas se incluyen ejemplos de preguntas diseñadas por el alumnado en ese nivel. Además, en las fronteras que delimitan cada nivel (líneas continuas en la figura 6) se concretan las limitaciones que se superan al pasar de nivel, es decir, qué aspectos incluyen las preguntas del nivel superior que no incluían las del anterior. Por último, los tres círculos en cada una de las áreas dan información sobre el porcentaje de preguntas del alumnado que se encuentran en cada nivel de sofisticación para cada uno de los momentos de recogida de datos: verde para M1, azul para M2 y amarillo para M3.

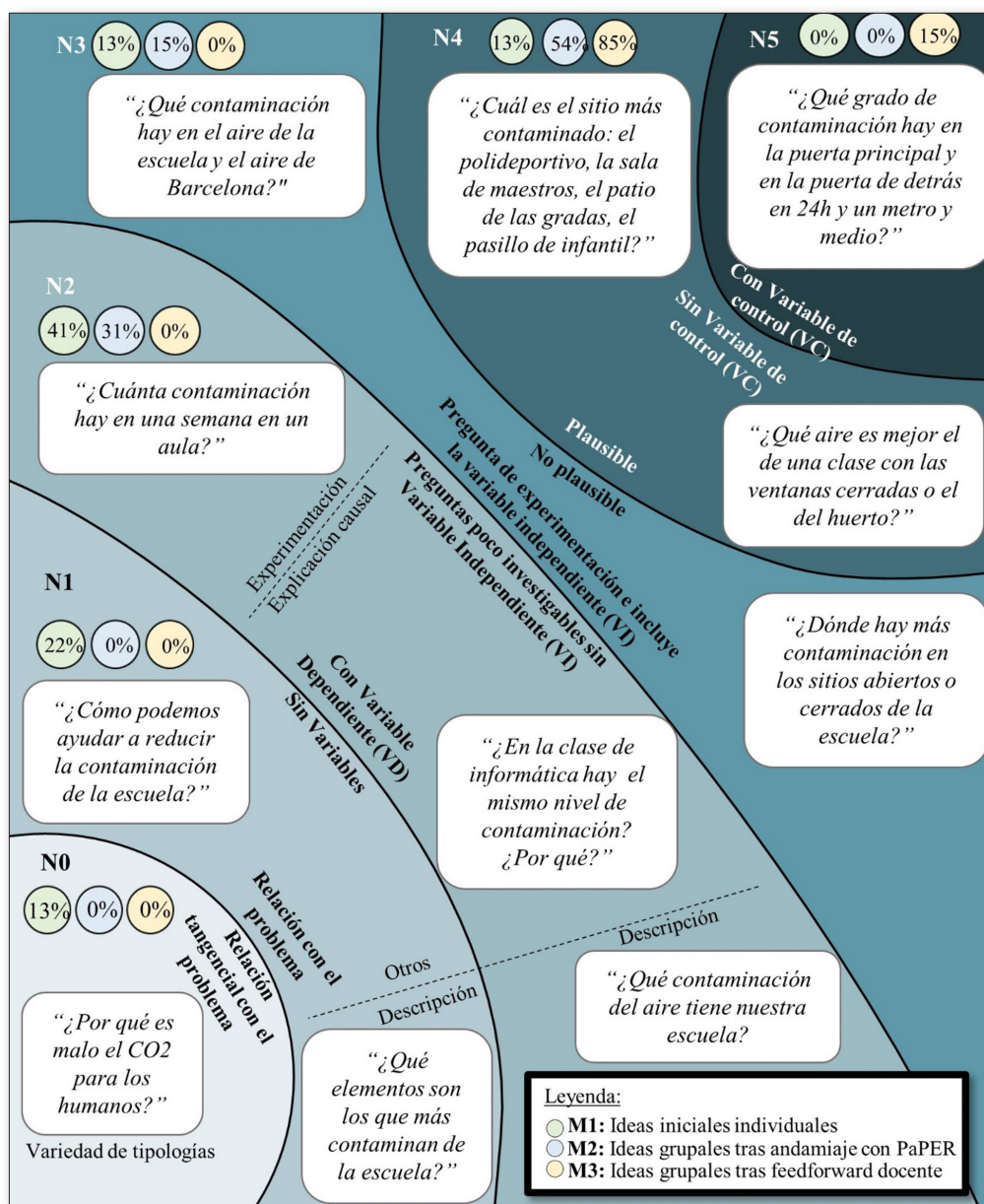


Fig. 6. Mapa de destrezas con los cinco niveles de sofisticación de las preguntas investigables diseñadas por alumnado de primaria.

Los resultados obtenidos de este análisis y su organización en el mapa de progresión de destrezas nos han permitido delimitar un N0 de preguntas relacionadas de manera tangencial con el problema guía, y que no hacen referencia explícita a ninguna variable por medir. En el siguiente nivel (N1) se encuentran preguntas que se relacionan superficialmente con la problemática guía y que siguen sin hacer referencia explícita a ninguna variable. En N2 las preguntas se relacionan totalmente con el problema guía e incluyen explícitamente la variable dependiente (VD), pero siguen sin hacer referencia al resto de las variables. Las preguntas en N3 se relacionan totalmente con el tema e incluyen explícitamente las variables: dependiente (VD) e independiente (VI). Además, todas las preguntas en este nivel son de experimentación. En N4 las preguntas reúnen las características de las preguntas en N3 y además son suficientemente concretas para poderse responder con los instrumentos y en el contexto escolar en el que se proponen. Las preguntas planteadas en el último nivel (N5) cumplen todas las características propias de una pregunta investigable ejemplar para el nivel de primaria: son preguntas de experimentación, se relacionan directamente con el fenómeno planteado, hacen referencia a variables relevantes (en este caso dependiente, independiente y también de control: VC) y son suficientemente concretas y adecuadas para llevarse a cabo con los instrumentos y en el contexto en el que se plantean.

El análisis de los niveles de sofisticación en los tres momentos nos ha permitido observar una evolución del grado de sofisticación de las preguntas respecto a su investigabilidad a lo largo de la SEA (figura 7).

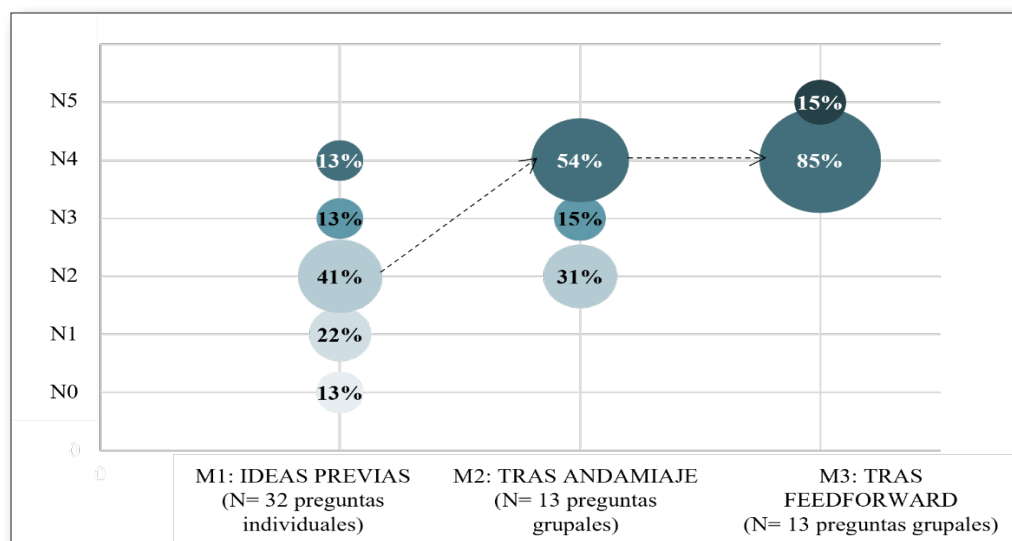


Fig. 7. Evolución del porcentaje de preguntas diseñadas por el alumnado en cada uno de los niveles de sofisticación (eje y) y en cada uno de los momentos de la SEA (eje X). Las flechas discontinuas marcan la tendencia general.

Los resultados en este sentido nos permiten afirmar que el trabajo en grupo y las estrategias docentes utilizadas: un andamiaje con una herramienta específica (entre M1 y M2) y el *feedforward* docente (entre M2 y M3) son estrategias que permiten a buena parte del alumnado de primaria mejorar progresivamente la sofisticación del diseño de sus preguntas investigables hasta llegar a un nivel de sofisticación elevado (N4).

El análisis refuerza la literatura que identifica las variables de control como la que más dificultades presenta al alumnado (Kuhn y Dean, 2005). Además, los resultados son coherentes con investigaciones que destacan la importancia de los docentes en el proceso de construcción y consolidación de las

habilidades y destrezas de investigación de orden superior (Couso, 2014; Furtak et al., 2012; Romero-Ariza, 2017).

Pese a la mejora observada entre M1 y M3, la mayoría de las preguntas finales diseñadas no llegan al nivel más alto (N5), y en aquellos casos en que sí que lo hacen, las preguntas presentan imprecisiones y/u omiten aspectos importantes que solo se pueden saber si se conoce el contexto en el que se va a llevar a cabo el experimento (por ejemplo, qué tipo de contaminación concreta se quiere medir, qué características diferenciales hacen importante medir la contaminación en los dos sitios planteados).

«¿Qué grado de contaminación [de PM] hay en la puerta principal [con poco tráfico] y en la puerta de detrás [con mucho tráfico] en 24 h y [colocando el papel con vaselina que captura las PM] a un metro y medio de distancia del suelo?» (M3_N5_E1_G6)

Por todo ello, creemos que el diseño preguntas investigables es una destreza en la que se debe seguir profundizando a lo largo de la escolaridad.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos analizado el grado de investigabilidad de las preguntas diseñadas por el alumnado de ciclo superior de primaria en tres momentos de una SEA. Conocer la calidad de las preguntas en términos de su investigabilidad nos ha permitido evaluar la competencia del alumnado en la práctica científica clave de diseño de preguntas investigables (NRC, 2012).

La primera aportación del presente estudio es el diseño de un instrumento de análisis que permite caracterizar la investigabilidad de las preguntas del alumnado en contextos experimentales semiabiertos. Este instrumento está formado por tres dimensiones clave: 1) la relación de la pregunta con el problema guía que se quiere investigar, 2) la tipología de la pregunta y 3) la experimentalidad de la pregunta. Dichas dimensiones parten de la redefinición de propuestas anteriores (García González y Furman, 2014; Roca Tort et al., 2013; Cruz-Guzmán et al., 2017) y enfatizan aspectos clave para el diseño de preguntas investigables en el contexto de experimentos científicos escolares no suficientemente resaltados en la literatura, como la identificación explícita de variables (Chen et al., 2015; Hofstein et al., 2005) y la plausibilidad de la pregunta (Cerdeira, 2007).

La aplicación de las dimensiones al análisis de las preguntas del alumnado nos ha permitido caracterizar las preguntas del alumnado e identificar su evolución a lo largo de tres momentos de la SEA. El análisis permite observar que mientras la relación con el problema guía o la inclusión de la variable dependiente son aspectos que buena parte del alumnado incluye ya en su diseño de pregunta inicial, otros aspectos clave en el diseño de preguntas investigables como la formulación de preguntas de experimentación o de las variables por medir (en nuestro caso variables dependiente e independiente) no se incorporan de manera mayoritaria hasta que el alumnado trabaja en grupo y recibe un andamiaje específico para ello. Además, se ha remarcado que ciertos aspectos clave para la calidad en términos de fiabilidad de las investigaciones, como, por ejemplo, la incorporación de estrategias o variables de control, únicamente se dan tras una interacción con la docente de tipo activador que oriente el avance del alumnado, por ejemplo, preguntando: *¿qué otras características de los sitios donde queréis medir la contaminación creéis que pueden afectar al resultado?, ¿qué podemos hacer para que no afecten o afecten siempre lo mismo?*

Los resultados obtenidos en esta investigación nos llevan a pensar que el alumnado de 10-12 años es capaz de diseñar preguntas investigables sofisticadas. Sin embargo, el desarrollo de esta destreza supone un reto para ellos, como apuntan las investigaciones sobre este tema hechas con alumnado de etapas educativas superiores (Ferrés-Gurt, 2017; Lombard y Schneider, 2013; Sanmartí y Márquez, 2012).

La evolución observada en todas las dimensiones a lo largo de la SEA apoyan el valor de la auto y correvisión/regulación por parte del propio alumnado y del alumnado con sus iguales (Chin y Osborne, 2008, 2010) y refuerzan la importancia de andamiajes bien diseñados y probados para la mejora de la autonomía en el desarrollo de las propias destrezas (Chen et al., 2015; Puntambekar y Kolodner, 2005). Además, que la incorporación de las variables por medir y el planteamiento de preguntas de experimentación se afiancen tras el *feedforward* docente y que solo tras esta intervención una pequeña parte del alumnado incluya aspectos relacionados con el control de variables refuerzan la importancia del docente activador del que tanto se habla en la literatura (Chin y Osborne, 2008; Couso, 2014; Furtak et al., 2012; Lombard y Schneider, 2013; Romero-Ariza, 2017). Este diálogo y retroalimentación se muestra especialmente importante para la incorporación y/o consolidación de aquellos aspectos que suponen un mayor reto para el alumnado. Estos resultados son coherentes con los de investigaciones previas en las que se manifiesta que el diseño de preguntas investigables y su mejora no es un proceso que se dé espontáneamente en el alumnado con su madurez o al saber más sobre un tema, sino que debe plantearse en el aula como un proceso iterativo en el que las preguntas se vayan complejizando y adecuando al contexto (García González y Furman, 2014; Lombard y Schneider, 2013; Sanmartí y Márquez, 2012). Los resultados nos hacen pensar en la necesidad de profundizar en la caracterización y el análisis de las estrategias de andamiaje y del *feedforward* docente y su relación con la mejora de las preguntas del alumnado en futuras investigaciones.

El análisis de la coocurrencia entre las dimensiones de investigabilidad de las preguntas y su gradación en cinco niveles de sofisticación han permitido trazar una propuesta de progresión de aprendizaje empírica para el alumnado de últimos cursos de primaria centrada en la destreza de diseñar preguntas investigables. En ella se han podido identificar tanto el punto de partida del alumnado como un conjunto de hitos o destrezas intermedias que pueden actuar como «trampolines» para el desarrollo progresivo de esta destreza (Corcoran et al., 2009).

Estamos de acuerdo con Schwarz et al. (2009) y Scott et al. (2019) cuando afirman que conocer las ideas y destrezas del alumnado y su progresión como se ha hecho en este trabajo es esencial para poder ayudar al alumnado a superar sus limitaciones y dificultades. Por ello, consideramos que sería interesante, en futuras investigaciones, comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los de investigaciones para niveles superiores similares (Ferrés-Gurt, 2017). Además, somos conscientes de que el estudio presentado se centra en un contexto determinado y de que el número de participantes es limitado. Por ello planteamos en un futuro ampliar el número de alumnos/as participantes y variar los contextos en los que se lleva a cabo un proceso de diseño de preguntas investigables.

AGRADECIMIENTOS

La investigación se ha llevado a cabo en el marco del doctorado en Educación de la UAB y ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (PGC2018-096581-B-C21) dentro del grupo de investigación ACELEC (2017SGR1399) y la ayuda predoctoral FI-DGR-2018.

REFERENCIAS

- Adúriz-Bravo, A. (2021, 8 noviembre). Multirreferencia en la indagación científica escolar [conferencia]. *I Seminario Internacional: Integrated Teaching in Specific Didactics*. Burgos, España.
- Cerda, H. (2007). *La investigación formativa en el aula, la pedagogía como investigación*. Bogotá: Magisterio.

- Chen, S., Tseng, C. y Chang, W.-H. (2015). Generatubg Testable Questions in the Science Classroom: The BDC Model. *American Biology Teacher*, 77(3), 166-169.
<https://doi.org/10.1525/abt.2015.77.3.3>
- Chin, C. y Osborne, J. (2008). Students' questions: A potential resource for teaching and learning science. *Studies in Science Education*, 44(1), 1-39. <https://doi.org/10.1080/03057260701828101>
- Chin, C. y Osborne, J. (2010). Students' Questions and Discursive Interaction: Their Impact on Argumentation During Collaborative Group Discussions in Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(7), 883-908.
<https://doi.org/10.1002/tea.20385>
- Corcoran, T., Mosher, F. y Rogat, A. (2009). Learning Progressions in Science: An Evidence-based Approach to Reform. In *CPRE Research Reports*.
- Couso, D. (2014). De la moda de «aprender indagando» a la indagación para modelizar: una reflexión crítica. 26 EDCE, Huelva, España. <http://uhu.es/26edce/actas/>
- Couso, D., Jiménez-Liso, R., Refojo, C. y Sacristán, J. A. (2020). *Enseñando ciencia con ciencia*. <https://www.fecyt.es/es/publicacion/ensenando-ciencia-con-ciencia>
- Crujeiras Pérez, B. y Jiménez Aleixandre, M. P. (2018). Influencia de distintas estrategias de andamiaje para promover la participación del alumnado de secundaria en las prácticas científicas. *Enseñanza de Las Ciencias*, 36(2), 23.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2241>
- Cruz-Guzmán, M., García-Carmona, A. y Criado, A. (2017). Preguntas de Indagación y contenidos de ciencia escola en el diseño de actividades experimentales: predilecciones de los estudiantes de profesorado de infantil. *Enseñanza de las ciencias*, Extra, 3963-8. <https://ddd.uab.cat/record/185160>
- Duschl, R. A. y Grandy, R. (2012). Two Views About Explicitly Teaching Nature of Science. *Science and Education*, 22(9), 2109-2139.
<https://doi.org/10.1007/s11191-012-9539-4>
- Ferrés, C. (2017). El reto de plantear preguntas científicas investigables. *Revista Eureka*, 14(2), 410-426.
http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2017.v14.i2.09
- Furtak, E. M., Seidel, T., Iverson, H. y Briggs, D. C. (2012). Experimental and Quasi-Experimental Studies of Inquiry-Based Science Teaching: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 82(3), 300-329.
<https://doi.org/10.3102/0034654312457206>
- García González, S. M. y Furman, M. G. (2014). Categorización de preguntas formuladas antes y después de la enseñanza por indagación. *Praxis & Saber*, 5(10), 75.
<https://doi.org/10.19053/22160159.3023>
- Garriga, N., Pigrau, T. y Sanmartí, N. (2012). Cap a una pràctica de projectes orientats a la modelització. *Revista Ciències*, 21(21), 18.
<https://doi.org/10.5565/rev/ciencies.125>
- Gignac, F., Barrera-Gómez, J., Persavento, C., Solé, C., Tena, È., López-Vicente, M., Foraster, M., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X., Llavador, H., Apesteguia, J., Júlvez, J., Couso, D., Sunyer, J. y Basagaña, X. (2021). Short-term effect of air pollution on attention function in adolescents' A randomized controlled trial in high schools in adolescents (ATENC!Ó): *Environment International*, 156.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106614>
- Grunwald, S. y Hartman, A. (2010). A Case-Based Approach Improves Science Students' Experimental Variable Identification Skills. *Journal of College Science Teaching*, 28-33.
- Harlen. (2004). *Teaching, learning & assessing science 5-12* (vol. 148). SAGE.

- Herranen, J. y Aksela, M. (2019). Student-question-based inquiry in science education. *Studies in Science Education*, 55(1), 1-36.
<https://doi.org/10.1080/03057267.2019.1658059>
- Hofstein, A., Navon, O., Kipnis, M. y Mamlok-naaman, R. (2005). *Developing Students' Ability to Ask More and Better Questions Resulting from Inquiry-Type Chemistry Laboratories*, 42(7), 791-806.
<https://doi.org/10.1002/tea.20072>
- Ioannidou, O. y Erduran, S. (2021). Beyond Hypothesis Testing. Investigating the diversity of scientific Methods in Science Teachers' understanding. *Science & Education*, 30, 345-364.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11207-020-01760-7>
- Izquierdo, M. (2005). Hacia una teoría de los contenidos escolares. *Enseñanza de Las Ciencias*, 23(1), 111.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3861>
- Jiménez-Liso, R. (2020). Aprender ciencia escolar implica aprender a buscar pruebas para construir conocimiento. En D. Couso et al. (Eds.), *Enseñando ciencia con ciencia* (pp. 53-62).
- Jiménez-Liso, R., Delgado, L., Castillo-Hernández, F. J. y Baños, I. (2021). Contexto, indagación y modelización para movilizar explicaciones del alumnado de secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 39(1), 5.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3032>
- Joglar, C. (2014). *Elaboración de preguntas científicas escolares en clase de biología* [Tesis doctoral]. PUC.
- Joglar, C. y Rojas, S. P. (2019). Overcoming Obstacles to the Formulation and Use of Questions in the Science Classroom: Analysis from a Teacher Reflection Workshop. *Research in Science Education*, 49, 1125-1139.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11165-019-9857-5>
- Kuhn, D. y Dean, D. (2005). Is developing scientific thinking all about learning to control variables? *Psychological Science*, 16(11), 866-870.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2005.01628.x>
- Lombard, F. E. y Schneider, D. K. (2013). Good student questions in inquiry learning. *Journal of Biological Education*, 47(3), 166-174.
<https://doi.org/10.1080/00219266.2013.821749>
- Miles, M. B., Huberman, A. M. y Saldaña, J. (2014). *Qualitative Data Analysis* (3.ª ed.). Arizona State University.
- NRC (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*. The National Academies Press.
- Ogborn, J. (2012). Curriculum development in Physics: not quite so fast! *Scientia in Educatione*, 3(2), 3-15.
<https://doi.org/10.14712/18047106.34>
- Osborne, J. (2014). Teaching Scientific Practices: Meeting the Challenge of Change. *Journal of Science Teacher Education*, 25(2), 177-196.
<https://doi.org/10.1007/s10972-014-9384-1>
- Puntambekar, S. y Kolodner, J. L. (2005). Toward implementing distributed scaffolding: Helping students learn science from design. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(2), 185-217.
<https://doi.org/10.1002/tea.20048>
- Roca Tort, M., Márquez, C. y Sanmartí, N. (2013). Las preguntas de los alumnos: una propuesta de análisis. *Enseñanza de Las Ciencias*, 31(1), 95-114.
<https://doi.org/10.5565/rev/ec/v31n1.603>
- Rocard, M. (2007). Science education now: a renewed pedagogy for the future of Europe. En *Economy and Society*.

- Rojas, A. y Joglar, C. (2017). Buenas preguntas del estudiantado en clases de biología, a partir de cuestiones socio-científicas. *Enseñanza de Las Ciencias, Extra*, 4665-4670.
- Romero-Ariza, M. (2017). El aprendizaje por indagación ¿existen suficientes evidencias sobre sus beneficios en la enseñanza de las ciencias. *Revista Eureka*, 14(2), 286-299.
<https://doi.org/10.2526/1169>
- Sanmartí, N. (2020). Qué sabemos de la importancia del valor del error y de su gestión para el aprendizaje. En D. Couso et al. (Eds.), *Enseñando ciencia con ciencia* (pp. 24-38).
- Sanmartí, N. y Márquez, C. (2012). Enseñar a plantear preguntas investigables. *Alambique*, 70, 27-36.
- Schwarz, C. V. y White, B. (2005). Metamodeling knowledge: Developing students' understanding of scientific Modeling. *Cognition and Instruction*, 23(2), 165-205.
<https://doi.org/10.1145/159420.155834>
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B. y Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654.
<https://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Scott, E., Wenderoth, M. P. y Doherty, J. H. (2019). Learning progressions: An empirically grounded, learner-centered framework to guide biology instruction. *CBE Life Sciences Education*, 18(4), 1-11.
<https://doi.org/10.1187/cbe.19-03-0059>
- Tamir, P. y García, M. P. (1992). Características de los ejercicios de prácticas de laboratorio incluidos en los libros de textos de Ciencias utilizados en Cataluña. *Enseñanza de Las Ciencias*, 10(1), 3-12.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.4644>
- Tena, È. (2021). ¿Está contaminado el aire de la escuela? Una propuesta de indagación basada en la modelización para el aula de primaria. *Ápice*, 5(2), 87-97.
<https://doi.org/10.17979/arec.2021.5.2.7613>
- Tena, È. y Couso, D. (2020). ¿Cómo ayudar al alumnado a investigar en ciencias? *Aula de Innovación Educativa*, 298, 15-20.
- van de Pol, J., Volman, M. y Beishuizen, J. (2010). Scaffolding in teacher-student interaction: A decade of research. *Educational Psychology Review*, 22(3), 271-296.
<https://doi.org/10.1007/s10648-010-9127-6>
- Vergara, C., López, V. y Couso, D. (2020). Revisiting the landscape roaming metaphor to understand students' ideas on mammals' and birds' thermal regulation. *Journal of Biological Education*, 1-14.
<https://doi.org/10.1080/00219266.2020.1748894>
- Windschitl, M., Thompson, J. y Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941-967.
<https://doi.org/10.1002/sce.20259>
- Zabel, J. y Gropengiesser, H. (2011). *Learning progress in evolution theory: climbing a ladder or roaming a landscape?* 9266.
<https://doi.org/10.1080/00219266.2011.586714>
- Zoller, U. y Tsaparlis, G. (1997). Higher and lower-order cognitive skills: The case of chemistry. *Research*

Designing Research Questions with 10-12-Year-Old Students

Èlia Tena, Digna Couso

Departament de Didàctica de la Matemàtica i les Ciències Experimentals. Universitat Autònoma de Barcelona,
Barcelona, España

elia.tena@uab.cat, digna.couso@uab.cat

Designing research questions has been identified as one of the main scientific practices that students should develop in school, starting in early education (Chin & Osborne, 2008; NRC, 2012). However, this practice is often thought as an advanced one, only suitable for upper-secondary or university students in the context of open inquiries (Ferrés-Gurt, 2017; Lombard & Schneider, 2013).

Research on this topic showed us that to design adequate research questions is a challenge even for upper-secondary and university students interested in science (Ferrés-Gurt, 2017; Lombard & Schneider, 2013). Furthermore, this skill is not spontaneously developed: students need to follow an iterative process aided with specific scaffolding to progressively sophisticate and design more adequate research questions (Lombard & Schneider, 2013; Sanmartí & Márquez, 2012).

Our research is focused on the evolution of 10-12-year-old students' skills when designing research questions in three different moments of a teaching and learning sequence (TLS) on the topic of air pollution. Data gathering was done in three moments of the TLS, including individual questions to know the level of pollution in their school, designed without any support at the beginning of the TLS (M1) ($n=32$), discussing questions in an intermediate moment after using a specific scaffolding tool, PaPER, in teams (M2) ($n=13$) and final questions in groups after a teacher's feedforward (M3) ($n=13$).

A combination of a top-down bottom-up strategy (Miles et al., 2014) has been used for data analysis. Based on previous research (Cruz-Guzmán, et al., 2017; García González & Furman, 2014; Roca Tort et al., 2013; Cerda, 2007), three different dimensions have been identified to characterize students' designed research question: (1) Focus, centred in the relation between the phenomena and the designed question; (2) Type, related with the claim of the question; and (3) Experimentality, related with variables presence and plausibility of the question in a school context. Categories and subcategories have been identified and an instrument for the analysis of students' designed question has been developed.

The analysis has pointed out that from the beginning (M1) most students' designed questions focus completely on the phenomenon and include dependent variables. However, not until working in groups with a specific scaffolding tool (M2) did they design testable questions with independent and dependent variables. It also showed us that some aspects, such as the incorporation of control strategies and variables, are not part of students' questions until they received targeted feedforward from their teachers (M3).

In line with previous research (Ferrés-Gurt, 2017; Lombard & Schneider, 2013;), our results highlighted, first, that 10-12-year-old students can design sophisticated research questions although it supposes a challenge for them.

Secondly, the evolution of designed questions in M1, M2 and M3 emphasizes the importance of self- and co-evaluation or regulation both by the students themselves and with their peers (Chin & Osborne, 2008, 2010) and the importance of appropriate scaffoldings (Chen et al., 2015; Puntambekar & Kolodner, 2005). According to previous research (Chin & Osborne, 2008; Couso, 2014; Furtak et al., 2012; Romero-Ariza, 2017), results showed the importance of teachers' feedforward to consolidate and incorporate some challenging aspects (e. g. control variables). More research about scaffolding and feedforward characteristics are needed in future investigations.

Finally, using a co-occurrence analysis between the identified dimensions, we have identified 5 levels of sophistication in the research questions designed by students, which we have used to define an empirical learning progression. Identification of the starting point and stepping stones for the progressive development of the skill in designing research questions in upper-primary students (Corcoran et al., 2009) could be useful for teachers to help students overcome their difficulties in this area (Schwarz et al., 2009; Scott et al., 2019).



Uso de realidad virtual en Geometría para el desarrollo de habilidades espaciales

Using Virtual Reality in Geometry for the development of spatial skills

Silvia Natividad Moral-Sánchez

Departamento de Didáctica de la Matemática, de las CC. SS. y de las CC. EE. Universidad de Málaga (Málaga), España.
silviamoral@uma.es • <https://orcid.org/0000-0002-0200-3569>

María Teresa Sánchez-Compañía

Departamento de Didáctica de la Matemática, de las CC. SS. y de las CC. EE. Universidad de Málaga (Málaga), España.
teresasanchez@uma.es • <https://orcid.org/0000-0001-7474-5038>

Isabel Romero Albaladejo

Departamento de Educación. Universidad de Almería (Almería), España.
imromero@ual.es • <https://orcid.org/0000-0002-4557-5284>

RESUMEN • En el siglo XXI, surge la necesidad de un cambio en el paradigma educativo, siendo las TIC un medio vehicular que puede hacer posible esta consecución. En este artículo se exponen un conjunto de actividades sobre poliedros en 3.º de la ESO (estudiantes entre 14 y 16 años) para fomentar la adquisición y mejora de habilidades espaciales. Partiendo de los errores geométricos detectados en una evaluación inicial, se diseñan actividades sustentadas en las ventajas que ofrecen los entornos inmersivos de realidad virtual para el desarrollo de dichas habilidades, además de actividades realizadas con materiales manipulativos. Se analizan las resoluciones de los estudiantes mostrando y comparando las estrategias utilizadas en ambos casos. El análisis de dichos resultados muestra evidencias en el desarrollo de habilidades espaciales y mejora en cuanto a la subsanación de errores cometidos.

PALABRAS CLAVE: Habilidades espaciales; Geometría; Realidad virtual; Innovación educativa; TIC.

ABSTRACT • In the 21st century, there is a need for a change in the educational paradigm, and ICT can serve as a means to make it possible. This article presents a set of activities on polyhedra in 3rd of ESO (students aged between 14 and 16) to promote the acquisition and improvement of spatial skills. Based on the geometric errors detected in an initial assessment, activities are designed based on the advantages offered by immersive virtual reality environments for the development of these skills, in addition to activities carried out with manipulative materials. The students' resolutions are analysed, showing and comparing the strategies used in both cases. The analysis of these results proves the development of spatial skills and an improvement in overcoming errors.

KEYWORDS: Spatial skills; Geometry; Virtual reality; Educational innovation; ICT.

Recepción: mayo 2021 • Aceptación: octubre 2022 • Publicación: marzo 2023

Moral-Sánchez, S. N., Sánchez-Compañía, M. T. y Romero Albaladejo, I. (2023). Uso de realidad virtual en Geometría para el desarrollo de habilidades espaciales. *Enseñanza de las Ciencias*, 41(1), 125-147.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5442>

INTRODUCCIÓN: JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Varias investigaciones argumentan que se debería dar un mayor énfasis a la geometría en los planes de estudio y, dentro de dicho bloque, trabajar las habilidades espaciales (Ramírez-Uclés, 2012; Sinclair y Bruce, 2015; González-Parra, 2018).

En didáctica de la matemática, cuando el objeto de estudio es la geometría tridimensional, se emplean los términos *visualización* o *visualización espacial* para indicar los procesos y habilidades de los individuos para realizar tareas que requieren «ver» o «imaginar» mentalmente los objetos geométricos espaciales, así como relacionar estos objetos y realizar operaciones o transformaciones geométricas sobre ellos (Gutiérrez, 1991, 1998b; Cajaraville et al., 2007; Escrivá et al., 2018).

Presmeg (2006) afirmaba que quizás el asunto más apremiante de investigación en este siglo ha sido y es encontrar una enseñanza o herramienta eficaz para aumentar el uso y poder de la visualización espacial en la educación matemática. Dado que este tema ha despertado un gran interés desde hace más de cien años, numerosos trabajos han destacado la visualización como la causa de gran parte de la dificultad de aprendizaje y como la fuente principal de error en geometría (Guillén, 2010; Ramírez-Uclés et al., 2018).

Por otra parte, la incorporación de las TIC se vuelve necesaria ante una sociedad adolescente nativa digital. Este cambio metodológico en las aulas supone una verdadera transformación en el paradigma educativo, ya que mejora los modelos tradicionales y considera la tecnología como un apoyo para la enseñanza de las matemáticas (Geefrath y Siller, 2018). En el plano cognitivo de la visualización espacial, De Freitas y Sinclair (2012) afirman que son necesarios tanto el gesto como el dibujo, pues constituyen la base material del experimento del pensamiento matemático. Dentro de las herramientas digitales, Ayala et al. (2020) confirman el potencial de la realidad virtual (RV) como lugar inmersivo que permite representar objetos de manera gráfica en tres dimensiones y en un ambiente ubicuo, desarrollando habilidades de dibujo que subsanen los errores de visualización. En varias investigaciones se muestra cómo los *softwares* tridimensionales e inmersivos reducen la carga cognitiva de la memoria al fomentar la llamada memoria virtual (Santos et al., 2014; Escrivá et al., 2018). Experiencias como la de Carrillo y Cortés (2016) con herramientas de RV demuestran el logro alcanzado en una inmersión completa dentro del ambiente virtual, y logran secuencias didácticas válidas en el área de geometría, así como demuestran un gran interés por parte del alumnado.

La finalidad de este artículo es compartir y analizar una experiencia didáctica de geometría con actividades de RV que podrían ayudar a desarrollar las habilidades espaciales en el alumnado. Como objetivos secundarios derivados del propio diseño didáctico y del contexto de la experiencia concreta que aquí se expone, se realiza una comparativa, en dos de las actividades llevadas a cabo, entre la herramienta de RV y los materiales manipulativos convencionales utilizados. Además, se analizan estas y otras dos actividades finales, una con material manipulativo y otra con RV, para observar las habilidades espaciales finales desarrolladas y los errores respecto a la evaluación inicial.

Las habilidades de visualización espacial y los errores en geometría conformarán el marco teórico de este artículo para, a continuación, exponer el marco metodológico de la experiencia, atendiendo a los contenidos curriculares, a los materiales y a las herramientas utilizados en las actividades, así como a los instrumentos de análisis. Tras la exposición del diseño de la secuencia didáctica, se mostrarán y analizarán las resoluciones del alumnado, para así finalizar con las conclusiones.

MARCO TEÓRICO

La geometría puede ser considerada como el origen de la visualización en matemáticas y un ámbito idóneo para el pretendido enriquecimiento de contenidos y habilidades espaciales (Gutiérrez, 1998a;

Ramírez-Uclés et al., 2013). Gutiérrez (2006) entiende la visualización como el conjunto de tipos de imágenes, procesos y habilidades necesarios para que los estudiantes puedan producir, analizar, transformar y comunicar información visual relativa a objetos reales, modelos y conceptos. Las habilidades espaciales de visualización no son solo una capacidad innata que se debe dejar que evolucione de manera espontánea, sino que se pueden entrenar. Para ello, se hace necesario incorporar este tipo de actividades de visualización en la educación matemática (Cunningham, 1991; Gutiérrez y Jaime, 2015). Del Grande (1990) define las habilidades espaciales tal y como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1.
Habilidades espaciales

<i>Habilidad</i>	<i>Descripción</i>
H1. Coordinación motriz de los ojos	Habilidad para coordinar la visión con el movimiento del cuerpo.
H2. Identificación visual	Habilidad de reconocer una figura determinada aislándola de su contexto.
H3. Conservación de la percepción	Habilidad de reconocer que un objeto mantiene su forma, aunque deje de verse parcialmente.
H4. Percepción de la posición en el espacio	Habilidad de relacionar la posición de un objeto con un punto de referencia.
H5. Percepción de las relaciones espaciales	Habilidad que permite identificar las características de las relaciones entre diversos objetos situados en el espacio.
H6. Discriminación visual	Habilidad de distinguir similitudes y diferencias entre objetos, dibujos o imágenes mentales entre sí.
H7. Memoria visual	Habilidad de recordar características visuales de un objeto que no está a la vista.

Investigaciones como la de Sinclair et al. (2016) y Gutiérrez et al. (2018) concluyen que, en los últimos años, en el proceso de enseñanza-aprendizaje en geometría, se ha prestado mayor atención a las destrezas del razonamiento visioespacial, haciendo énfasis en el uso de gestos y diagramas y en las herramientas digitales que pueden permitir el aprendizaje y evaluación de este. Numerosas investigaciones avalan que el uso de nuevas tecnologías y la búsqueda de entornos de aprendizaje innovadores que conecten con los intereses actuales del alumnado conlleva el empleo de programas de geometría dinámica, dirigidos al desarrollo de habilidades espaciogeométricas como componentes necesarias en las tareas de matematización y en la subsanación de errores (Guillén, 2010; Ibili, 2019; Poonpaiboonpipat, 2021).

Socas (1997) puso de manifiesto que la presencia del error en geometría está evidenciando, en la mayoría de las ocasiones, la existencia de un esquema cognitivo inadecuado en el alumnado, no solamente una falta de conocimiento o un despiste. De igual modo, la investigación didáctico-matemática sobre el proceso de aprendizaje de cuerpos geométricos debe partir del objetivo del conocimiento de los errores para poder trabajar sobre ellos. Así, Guillén (2010), recordando a Bishop (1992), destaca los obstáculos que aparecen para representar las ideas geométricas, dado que existe un vocabulario visual muy complejo, con muchas convenciones y símbolos que deben comprender quienes aprenden estos conceptos, si se espera que den sentido a las figuras geométricas (Jaime y Gutiérrez, 2017). Las imágenes conceptuales suelen ser muy pobres, lo que genera una problemática, ya que estas son particularmente importantes en la geometría espacial (Gutiérrez y Jaime, 2015).

En la tabla 2, se muestra una tabla resumen con los principales errores referentes a las habilidades de visualización que recoge la literatura (Moral-Sánchez et al., 2021).

Tabla 2.
Principales errores referentes a las habilidades de visualización espacial

<i>Tipo de error</i>	<i>Referencias</i>
E1. No tener la habilidad de dibujar representaciones en el espacio y/o de manipular física o mentalmente los cuerpos geométricos.	Gutiérrez (1998a) Ramírez-Uclés et al. (2018)
E2. No tener la habilidad de visualización espacial; es decir, no relacionar representaciones en el plano con cuerpos espaciales (en los dos sentidos $2D \Rightarrow 3D$ y $3D \Rightarrow 2D$).	Gutiérrez (1998b)
E3. Confundir términos al referir los elementos de los poliedros (vértices, aristas, caras)	Astolfi (1999) Barrantes y Zapata (2015) Espinoza et al. (2021)

MARCO METODOLÓGICO Y SECUENCIA DIDÁCTICA

En el marco metodológico se presentan el currículum con el que se justifican los contenidos tratados y los materiales utilizados, además de los instrumentos de recogida y análisis de las resoluciones del alumnado.

Currículum

Para justificar los contenidos tratados, la NCTM recoge que los programas de enseñanza deberían capacitar a los estudiantes para:

Analizar las características y propiedades de figuras geométricas de dos y tres dimensiones y desarrollar razonamientos matemáticos sobre relaciones geométricas; Aplicar transformaciones y usar la simetría para analizar situaciones matemáticas; Utilizar la visualización, el razonamiento matemático y la modelización geométrica para resolver problemas. (NCTM, 2000, p. 43)

Por otro lado, el currículum español, dentro del bloque de geometría, formula los siguientes contenidos y estándares de aprendizaje:

Visualizar, crear e identificar planos de simetría y ejes de rotación en los poliedros regulares. Obtención de poliedros duales. Recrear entornos y objetos geométricos con herramientas tecnológicas para mostrar, analizar y comprender propiedades y figuras geométricas. (MEC, 2015, pp. 392-397)

Se evidencia así que tanto los currículos internacionales como los nacionales defienden el desarrollo de las habilidades espaciales en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Indicadores de aprendizaje específicos

En la tabla 3 se especifican los estándares de aprendizaje anteriormente expuestos, y se desgranar en indicadores de aprendizaje específicos de acuerdo con los contenidos tratados en las sesiones propuestas.

Tabla 3.
Indicadores de aprendizaje específicos

<i>Indicadores de aprendizaje específicos</i>
I1. Ser capaz de identificar y construir el punto medio de un segmento. I2. Ser capaz de construir e identificar los planos de simetría verticales y horizontales en un poliedro. I3. Ser capaz de construir e identificar los planos de simetría diagonales en un poliedro. I4. Ser capaz de verificar que se trata de un plano de simetría. I5. Ser capaz de identificar y construir el punto central de un polígono. I6. Ser capaz de construir poliedros regulares con estructuras de vértices y aristas sin usar estructura de caras. I7. Ser capaz de construir el poliedro dual de un tetraedro. I8. Ser capaz de construir el poliedro dual de un hexaedro (octaedro). I9. Ser capaz de construir el poliedro dual de un dodecaedro (icosaedro). I10. Ser capaz de construir e identificar los ejes de giro de un hexaedro. I11. Ser capaz de contar el orden de las simetrías rotacionales de un hexaedro. I12. Ser capaz de construir e identificar los ejes de giro de un tetraedro. I13. Ser capaz de contar el orden de las simetrías rotacionales en un tetraedro. I14. Ser capaz de construir e identificar los ejes de giro de un octaedro. I15. Ser capaz de construir e identificar los ejes de giro de un dodecaedro. I16. Ser capaz de construir e identificar los ejes de giro de un icosaedro.

Materiales

La enseñanza heurística proporciona al alumnado diferentes materiales didácticos manipulativos, gracias a los cuales podrán estudiar, por ejemplo, los sólidos platónicos desde diversos puntos de vista dinámicos (Guillén, 2000). Concretamente, en la experiencia didáctica de este artículo, los materiales manipulativos utilizados fueron: poliedros regulares de metacrilato transparente y una cartulina para simular los planos de simetría y los juegos Zome y Polydron, de los que se muestran algunos ejemplos en la figura 1.

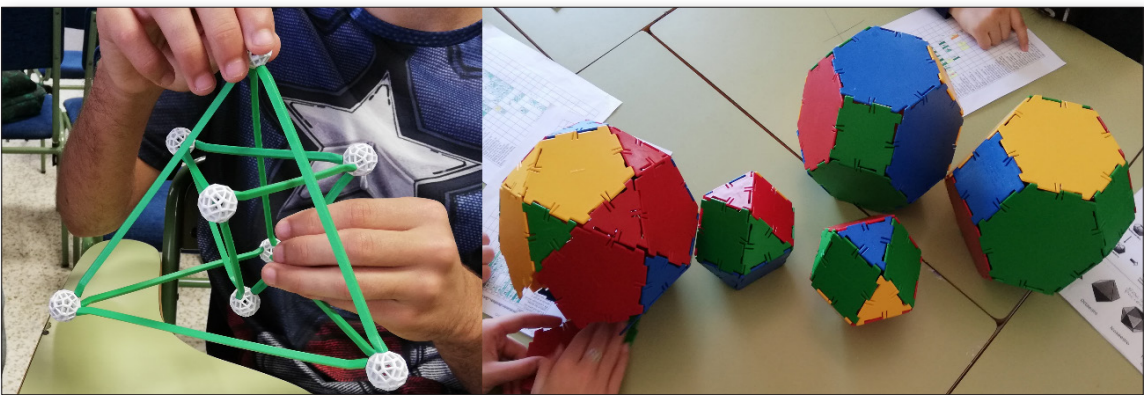


Fig. 1. Ejemplos con Zome, dual del tetraedro (izquierda) y con Polydron, sólidos arquimedianos (derecha).

El juego Zome consiste en «palos» rígidos que actúan a modo de aristas y «bolas con huecos» que actúan a modo de vértices, de manera que se pueden encajar para formar poliedros. El juego Polydron está compuesto por polígonos diferentes que se pueden encajar entre sí para construir poliedros. Todos estos materiales manipulativos se suelen utilizar en experiencias relacionadas con la visualización y el aprendizaje de la geometría.

El material digital utilizado es un *software* dinámico que permite al alumnado crear, manipular e interactuar con objetos geométricos tridimensionales en un entorno inmersivo a través de múltiples herramientas llamado Neotrie VR (por ejemplo, véase figura 2). Utiliza un *hardware* compuesto por unas gafas de RV y unos mandos con sensores para recrear un escenario tridimensional. Según Cangas et al. (2019), este tipo de herramientas podría ayudar a los estudiantes a resolver problemas geométricos con más rapidez, especialmente aquellos que requieren una mayor visión espacial.

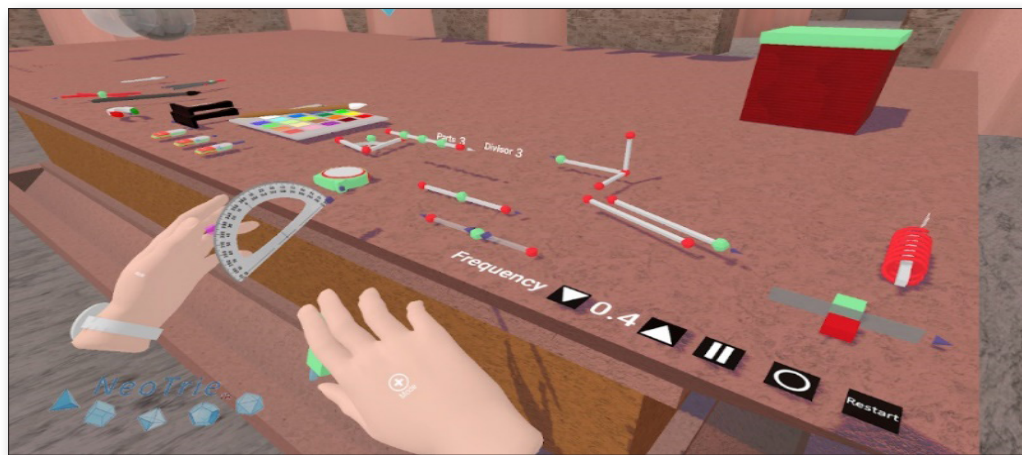


Fig. 2. Aspecto de la mesa de herramientas en Neotrie VR. Fuente: <http://www2.ual.es/neotrie/guide/>

Parte del éxito de los entornos virtuales se debe a las posibilidades que estos ofrecen a los estudiantes de aprender de sus errores en un entorno controlado, otorgándoles autonomía en la construcción de su aprendizaje y creando imágenes espaciales en la memoria (Farré-Riera, 2020). Para Chang et al. (2015) y Ferrer-Torregrosa et al. (2015), trabajar con tecnologías como la RV promueve el aprendizaje, al comprenderse mejor las ideas y los conceptos tratados en este tipo de entornos inmersivos, lo que hace que aumente la satisfacción personal del alumnado ante los logros conseguidos, fomentando la motivación y una actitud positiva.

Instrumentos de recogida y análisis de datos

Se utilizaron varios instrumentos para recoger la información: el diario de observación de la profesora-investigadora, los vídeos y fotos de las sesiones y una rúbrica de evaluación basada en los indicadores de aprendizaje específicos. En dicha rúbrica se reflejó para cada estudiante si había completado o no el indicador en la actividad realizada.

Se ha utilizado también un instrumento de análisis (véase tabla 4) validado previamente a través de una consulta a expertos, donde se establece qué tipo de habilidades (tabla 1) se pueden poner de manifiesto en cada uno de los indicadores (tabla 3) y cómo se relaciona cada habilidad con los tres tipos de errores (tabla 2).

Tabla 4.
Instrumento de análisis

<i>Habilidad espacial</i>	<i>Error</i>	<i>Indicadores específicos de aprendizaje</i>
H1. Coordinación motriz de los ojos	E1 y E3	I1, I2, I3, I5, I6, I7, I8, I9, I10, I11, I12, I13, I14, I15, I16
H2. Identificación visual	E2 y E3	I2, I3, I6, I7, I8, I9, I10, I11, I12, I13, I14, I15, I16
H3. Conservación de la percepción	E1 y E2	I4, I11, I13
H4. Percepción de la posición en el espacio	E1 y E2	I1, I2, I3, I4, I6, I7, I8, I9, I10, I11, I12, I13, I14, I15, I16
H5. Percepción de las relaciones espaciales	E1 y E2	I1, I2, I3, I5, I6, I7, I8, I9, I10, I11, I12, I13, I14, I15, I16
H6. Discriminación visual	E1, E2 y E3	I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, I9, I10, I11, I12, I13, I14, I15, I16
H7. Memoria visual	E1 y E3	I1, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, I9, I10, I12, I14, I15, I16

En la tabla 4, se puede observar cómo, por ejemplo, el I2 que señala la capacidad de construir e identificar los planos de simetría verticales y horizontales en un poliedro está relacionado con seis de las siete habilidades espaciales, ya que, según la consulta a expertos, se vincula con todas ellas. De esta manera, queda conformada la relación entre habilidades, indicadores y errores.

EXPERIENCIA DIDÁCTICA

En este artículo se muestran cuatro sesiones, que forman parte de una experiencia más amplia (Moral-Sánchez et al., 2022a; Moral-Sánchez et al., 2022b), cuyo contexto y desarrollo se explican a continuación. Todo el alumnado realizó previamente una evaluación inicial (Moral-Sánchez et al., 2021) y mostró errores de manera unificada que sirvieron como parte de la justificación de las actividades propuestas para intentar subsanarlos.

Contexto

Esta experiencia se ha llevado a cabo con 30 estudiantes de 3.º de la ESO, con edades comprendidas entre los 14 y 16 años, organizados en 6 equipos de 5 personas cada uno, y pertenecientes a uno de los institutos de educación secundaria de Vélez-Málaga (Málaga). Entre el alumnado hay una diversidad importante en cuanto a ritmos de aprendizaje y casuística, ya que hay estudiantes repetidores, absentistas y con trastornos de hiperactividad y actitudinales.

La metodología didáctica usada fue el aprendizaje basado en retos en el que los estudiantes colaboran para dar solución a un problema planteado. Este tipo de estrategias ayudan al desarrollo de habilidades cognitivas como el pensamiento crítico y el pensamiento creativo e innovador en la búsqueda de la solución (Jiménez et al., 2019).

Si bien el contexto ideal para el desarrollo de esta experiencia hubiese sido contar con al menos 6 dispositivos de RV, uno por cada equipo, en el momento de realizarla este *hardware* tenía un elevado presupuesto, cosa que no ocurre en el momento actual, por lo que solo se pudieron adquirir dos equipos completos. Además, el *software* Neotrie VR, utilizado para llevar a cabo las actividades con RV, estaba en su versión beta, en fase de pruebas, por lo que algunas funciones, como, por ejemplo, poder truncar las esquinas de los poliedros, no estaban aún disponibles; hoy en día este *software* se ha desarrollado y permite esta y muchas otras posibilidades.

Por lo tanto, disponer de solo dos equipos de RV condiciona el diseño didáctico de las actividades que se querían realizar. Por ello, en las dos primeras actividades que se proponen se divide el grupo

completo en dos grupos más pequeños, ambos heterogéneos en cuanto al contexto del alumnado que lo forman. El Grupo 1, formado por 10 personas, empezó directamente a trabajar rotando con los dos equipos y realizando las sesiones en el entorno inmersivo. El segundo grupo, Grupo 2, conformado por los 20 estudiantes restantes, empezó trabajando en paralelo las mismas actividades con materiales manipulativos.

Este contexto permite comparar, por tanto, en estas dos primeras actividades, al alumnado que utilizó la RV con el que utilizó únicamente el material manipulativo.

La tercera actividad, realizada por todo el grupo con material manipulativo dado el problema que se ha explicado con el *software*, que no permitía el truncamiento, y la cuarta actividad, que sí la pudo realizar todo el grupo con RV, al disponer de más sesiones de tiempo, lo que posibilitó que todos los equipos pudieran rotar los 2 dispositivos disponibles, se han diseñado sobre la base de poder observar si se han adquirido habilidades espaciales y se han subsanado los errores por parte de un grupo y otro.

Cabe señalar que, para adquirir la usabilidad de la herramienta de RV, se desarrollaron 10 sesiones previas a la experiencia en la hora de libre disposición del alumnado; los componentes del Grupo 1 realizaron estas 10 sesiones antes de comenzar la primera actividad (véase, por ejemplo, la figura 3), pero los componentes del Grupo 2 no las realizaron hasta terminar la tercera sesión, con lo que las tres primeras actividades las llevaron a cabo con materiales manipulativos, sin haber utilizado la herramienta de RV.



Fig. 3. Alumna aprendiendo la usabilidad en Neotrie VR.

Estas sesiones de usabilidad tuvieron como finalidad familiarizarse con el entorno virtual, aprender el manejo del menú principal de la interfaz (véase la figura 4), saber dibujar poliedros (vértices, aristas y caras), aprender a señalar el punto medio de un segmento y de una cara o el punto central de un polígono, saber utilizar la herramienta de reflexión y saber emplear la herramienta de rotación.

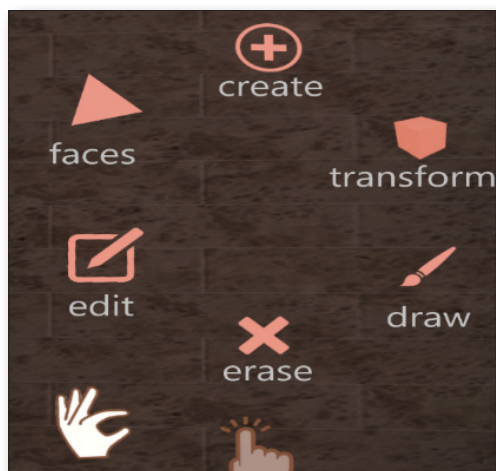


Fig. 4. Menú de opciones Neotrie VR.

Sesiones

El organigrama del diseño de las cuatro sesiones se muestra en la figura 5.

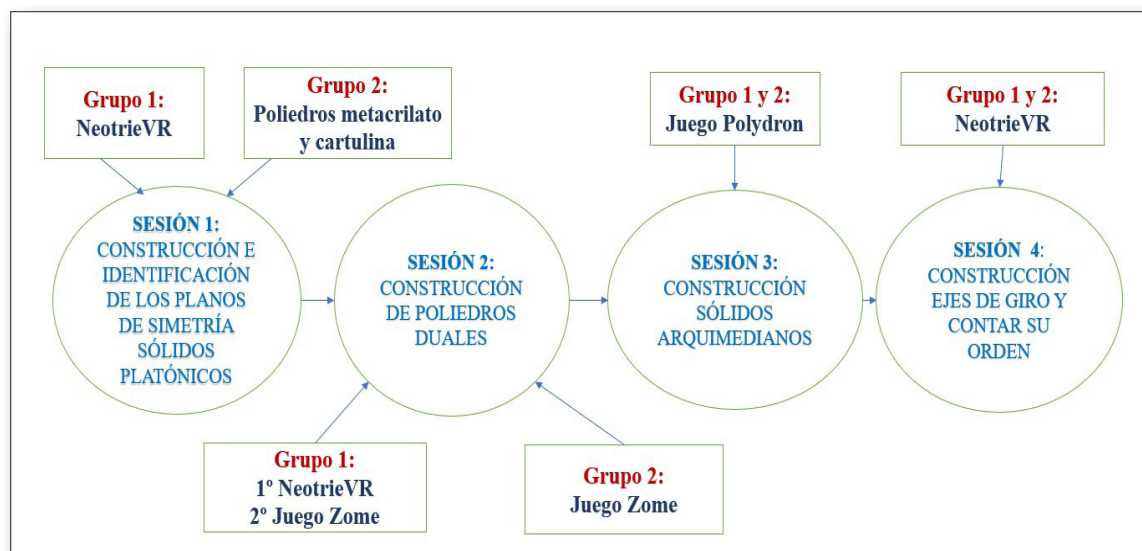


Fig. 5. Esquema de la secuencia didáctica realizada por ambos grupos.

A continuación, se detallan dichas sesiones. En la tabla 5, se muestran los indicadores específicos de la actividad, el reto planteado para el Grupo 1 y el Grupo 2 y la secuencia de pasos para su realización en ambos casos.

Tabla 5.
Sesión 1: Construcción e identificación de planos de simetría en poliedros regulares

<i>Sesión 1: Construcción e identificación de planos de simetría en poliedros regulares (indicadores de aprendizaje específicos: I1, I2, I3, I4).</i>
<i>Grupos 1, reto con RV:</i> «Dibuja e identifica todos los planos de simetría de cada poliedro regular y comprueba, cuando sea posible, que efectivamente se trata de un plano de simetría».
<i>Secuencia que el alumnado debería seguir para completar la actividad con éxito:</i> 1. Construir un poliedro regular mediante vértices y aristas o generar dicho poliedro por comando de voz. 2. Dibujar los planos de simetría en el poliedro regular elegido de manera que se dividía ese cuerpo en dos partes iguales. Con el ejemplo de un hexaedro regular, se deben dibujar los 9 planos; para ello se va creando cada plano en hexaedros diferentes, para que queden claramente identificados. Para los planos horizontales y verticales, hay que crear los puntos medios de las aristas paralelas de las caras opuestas dos a dos y unirlos. Los planos diagonales se pueden hacer directamente dibujando las diagonales de las caras opuestas del cubo también dos a dos. Por último, para la mejor comprensión e identificación de los planos de simetría, se pueden colorear dichos planos. 3. Realizar la comprobación, cuando sea posible, de si efectivamente se trata de un plano de simetría o no. Se debe aplicar la herramienta de reflexión sobre cada poliedro. Para ello, hay que seleccionar tres puntos del plano y un cuarto punto fuera del plano, de modo que, si la figura se queda igual es que efectivamente se trataba de un plano de simetría. 4. Estos pasos 1, 2 y 3 se repetirían para el resto de los poliedros regulares.
<i>Grupo 2, reto con material manipulativo, poliedros regulares de metacrilato y cartulinas:</i> «Determina con la cartulina cuántos planos de simetría tiene cada poliedro regular y comprueba, si es posible, que es un plano de simetría».
<i>Secuencia que el alumnado debería seguir para completar la actividad con éxito:</i> 1. Coger uno de los poliedros regulares de metacrilato. 2. En el caso de un hexaedro, encajar en todas las posiciones posibles el trozo de cartulina, previamente cortado del tamaño de una de las aristas, de modo que el cubo quede dividido en dos partes iguales de manera aproximada. 3. Estos pasos 1 y 2 se repetirían para el resto de los poliedros regulares.

En la secuencia de la sesión 2, que se describe en la tabla 6, el Grupo 1 también realizó la actividad con Neotrie VR, pero luego se les pidió comprobar que podían hacerlo con el material manipulativo del juego Zome, y así ver si se habían adquirido habilidades espaciales. Mientras, el Grupo 2 solo usó el material manipulativo del juego Zome.

Tabla 6.
Sesión 2: Construcción de duales de poliedros regulares

<i>Sesión 2: Construcción de duales de poliedros regulares (indicadores de aprendizaje específicos: I5, I6, I7, I8, I9).</i>
<i>Grupo 1, reto con RV:</i> «Dibuja los poliedros duales de cada poliedro regular».
<i>Secuencia que debe llevar a cabo el alumnado:</i> 1. Construir un poliedro regular mediante vértices y aristas o generación de este por comando de voz (no es necesaria la creación de las caras del poliedro). 2. Obtener el punto central de la cara de cada polígono con la herramienta correspondiente que ofrece el <i>software</i>. 3. Unir mediante aristas esos puntos centrales de las caras hasta formar el poliedro dual correspondiente de cada poliedro regular. 4. Repetir los pasos 1, 2 y 3 para el resto de los poliedros regulares.
<i>Grupo 2, reto con material manipulativo, juego Zome:</i> «Construye los poliedros duales de cada poliedro regular».
<i>Secuencia que debe llevar a cabo el alumnado:</i> 1. Ir encajando los palos y las bolas hasta formar un poliedro regular. 2. Imaginar que una bola se sitúa en el centro de cada cara del poliedro formado, e intentar formar otro poliedro uniendo esas bolas con los palos. 3. Repetir los pasos 1 y 2 para el resto de los poliedros regulares.

Como ya se ha comentado en el contexto, la sesión 3, que se muestra en la tabla 7, está diseñada para que se desarrolle solo con material manipulativo a través del juego Polydron, ya que la herramienta de RV no estaba aún optimizada en la versión que se utilizó para poder dibujar el truncamiento de los poliedros. En esta actividad no se especifican los indicadores de aprendizaje específicos; solo se analizan la estrategia de cada componente y equipo de 5 estudiantes para construir los poliedros truncados.

Tabla 7.

Sesión 3: Construcción de poliedros truncados

<i>Sesión 3: Construcción de los sólidos arquimedianos.</i>
<i>Grupo de clase completo, reto para ambos grupos con material manipulativo, juego Polydron:</i> «Construye los poliedros truncados a partir de las imágenes de estos que aparecen en la hoja de papel entregada en dos dimensiones».

La sesión 4, que se muestra en la tabla 8, fue diseñada para realizarla solo en el entorno inmersivo, ya que las actividades consultadas previamente al diseño para poder llevarla a cabo con material manipulativo requerían una logística en la búsqueda de mucho material y, según las fuentes consultadas de expertos, esto no suele dar buenos resultados de aprendizaje. Al disponer solo de dos equipos de RV, para poder rotarlos, esta actividad se realizó en tres horas de clase; el resto de los equipos realizó simultáneamente otras actividades de clase.

Tabla 8.

Sesión 4: Construcción e identificación de los ejes de giro de los sólidos platónicos y conteo del orden de giro de algunos de ellos

<i>Sesión 4: Construcción e identificación de los ejes de giro de los sólidos platónicos y conteo del orden de giro de algunos de ellos (indicadores de aprendizaje específicos: I5, I6, I10, I11, I12, I13, I14, I15, I16).</i>
<i>Grupo de clase completo, reto para ambos grupos con RV:</i> «Identifica y construye los ejes de giro de todos los poliedros regulares». «Cuenta el orden de giro en un tetraedro y un hexaedro para cada uno de sus ejes de giro».
<i>Secuencia que debería seguir el alumnado:</i> 1. Construir el poliedro regular correspondiente mediante vértices y aristas o generar dicho poliedro por comando de voz. 2. Trazar los ejes de rotación del poliedro regular. Para ello, hay que señalar con la herramienta correspondiente del <i>software</i> los centros de las caras de los polígonos y unirlos entre sí o con el vértice correspondiente, de manera que quede constituido el eje. En el ejemplo de un hexaedro se dibujaron 3 ejes de giro de orden 4, que pasaban por los centros de las caras paralelas, 4 ejes de giro de orden 3, que pasaban por los vértices opuestos, y 6 ejes de giro de orden 2, que pasaban por los puntos medios de las aristas opuestas. 3. Para determinar el orden de giro, la estrategia que se debe seguir es colorear una de las caras que no contenga al eje de giro (estableciendo así una referencia visual si se necesita para poder contar el orden). Con la herramienta de rotación del <i>software</i> seleccionaron 2 puntos del eje de giro y un tercero de un vértice del poliedro que no forme parte de eje de giro, y contaron al rotar la figura, cada vez que el poliedro adoptara una posición similar a la inicial hasta que la cara coloreada, usada de referencia, volviera a su posición de partida. 4. Repetir los pasos 1 y 2 para el octaedro, dodecaedro e icosaedro y 1, 2 y 3 para el tetraedro y el hexaedro.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se pueden ver fotografías que muestran algunas de las resoluciones del alumnado para cada uno de los retos propuestos. Asimismo, se presentan unas tablas donde se cuantifica el número de estudiantes que cumplieron o no cada uno de los indicadores específicos una vez realizadas las actividades. Por otro lado, se presentan los resultados globales obtenidos en cuanto al análisis de habilidades y errores según la relación establecida en la tabla 4.

Resoluciones del alumnado en cada sesión

Sesión 1

Con el material manipulativo, el alumnado, dentro de cada equipo de 5 componentes, cada uno con una figura, fue probando a colocar la cartulina de la manera que ellos consideraban conveniente para que el objeto quedase dividido en dos mitades (véase, por ejemplo, figura 6).



Fig. 6. Ejemplo de plano de simetría de un hexaedro con materiales manipulativos.

Con la herramienta de RV la actividad es llevada a cabo por el alumnado también de manera grupal; aunque cada alumno realizaba la actividad individualmente, el resto podía verla a través de la pantalla, como se puede observar en la figura 7.

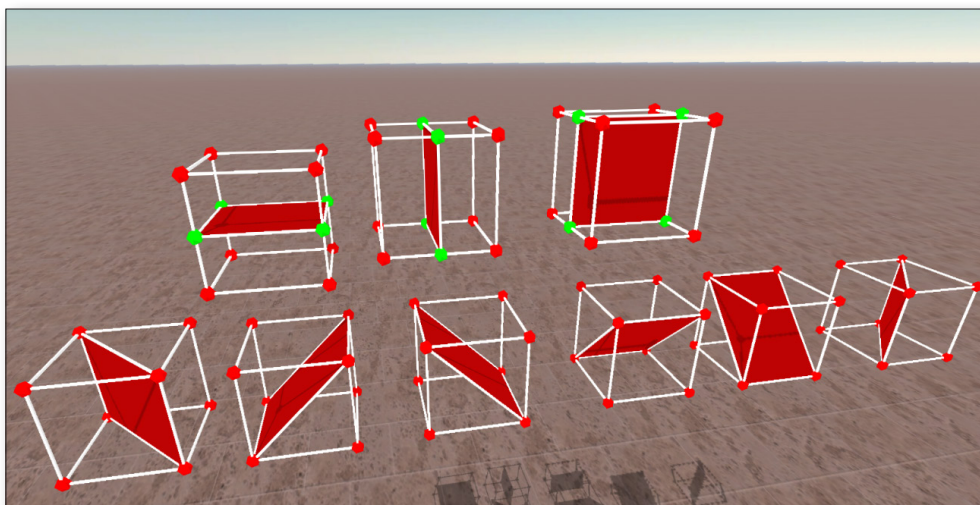


Fig. 7. Identificación y construcción de los planos de simetría de un hexaedro regular.

Ellos mismos han ido realizando los pasos y eligiendo las herramientas que han considerado necesarias. Esas herramientas fueron: goma, generador del punto medio, paleta de colores, para colorear los polígonos y visualizar mejor la simetría, y herramienta de reflexión (esta herramienta se usará para la comprobación de que se trata realmente de un plano de simetría en los casos en los que sea posible).

La profesora solo intervino cuando se solicitó ayuda por parte del alumnado y principalmente para recordar cuáles eran concretamente las herramientas disponibles dentro del entorno inmersivo. Trabajar de forma colaborativa podría ayudar a la resolución de los ejercicios, dado que los compañeros se ayudan entre ellos al ver lo que va realizando el resto por la pantalla grande.

En los siguientes vídeos, a modo de ejemplo de la resolución del alumnado, se puede observar el proceso: los estudiantes van dibujando algunos de los planos de simetría en los diferentes sólidos platónicos. El primer vídeo fue grabado directamente en la pantalla con el ordenador utilizado en las sesiones de clase (<https://bit.ly/3T66JY7>) y el segundo, con una cámara para ver el ejercicio desde fuera (<https://bit.ly/3CSvCBz>).

A continuación, en la tabla 9, se muestran los resultados de la rúbrica de indicadores específicos en los que se refleja la actividad realizada de planos de simetría de un hexaedro.

Tabla 9.
Rúbrica de indicadores, sesión 1

Indicador	Grupo 1: RV		Grupo 2: Manipulativos	
	Superado	No superado	Superado	No superado
I1	10	0	19	1
I2	10	0	14	6
I3	9	1	4	16
I4	10	0	0	20

Como se observa en la tabla 9, todos los componentes del Grupo 1 y la mayoría del Grupo 2 (aunque estos no con una medida exacta del punto medio, sino aproximada) consiguieron identificar los puntos medios de las aristas. Los estudiantes del Grupo 1 habían probado a dibujar el punto medio, en las 10 sesiones previas, en un segmento, pero no en un poliedro. Al colocar o dibujar los planos horizontales y verticales, mientras que el Grupo 1 no tuvo mayor problema, algunos estudiantes del Grupo 2 no hicieron todos los planos posibles, y solo situaron algunos de ellos. Con los planos diagonales, todos menos un estudiante del Grupo 1 dibujaron todos los posibles; por el contrario, la gran mayoría del Grupo 2 no colocó ninguno de ellos. En cuanto a la comprobación de si se trataba o no de un plano de simetría, mientras que todos los componentes del Grupo 1 lo hicieron con la herramienta de reflexión del *software*, el Grupo 2 no dispuso ni se le ocurrió ninguna forma de comprobación. Estos mismos resultados se pueden extrapolar al resto de poliedros regulares.

Respecto a los errores, en el Grupo 1, la dificultad del alumno que no superó el I3 fue debida al error E1, ya que no fue capaz de dibujar algunos de los planos diagonales. En el Grupo 2, también apareció el error E1, al no ser capaces de representar algunos de los planos de simetría, así como el error E2, ya que no relacionaron el plano con su posición en el poliedro de metacrilato en 3D.

Sesión 2

La figura 8 muestra la realización de la actividad de construcción de poliedros duales con la herramienta de RV.



Fig. 8. Estudiante realizando poliedros duales, en este caso hexaedro-octaedro.

Las herramientas que el alumnado eligió utilizar en Neotrie VR fueron: herramienta del punto medio, goma, generador de vértices, generador de aristas, opción de colorear un polígono.

En la tabla 10, se muestran los resultados de la rúbrica de indicadores específicos para la actividad de los poliedros duales.

Tabla 10.
Rúbrica de indicadores, sesión 2

	<i>Grupo 1: RV</i>		<i>Grupo 2: Manipulativos</i>	
Indicador	Superado	No superado	Superado	No superado
I5	9	1	0	20
I6	10	0	3	17
I7	10	0	3	17
I8	10	0	1	19
I9	7	3	0	20

Como se observa en la tabla 10, la mayoría del alumnado del Grupo 1 que trabajó con el entorno inmersivo no tuvo dificultad, ni para construir cada uno de los poliedros duales sin basarse en la estructura de caras o en los desarrollos planos, ni para señalar los puntos centrales de los polígonos que formaban dichas caras de manera exacta con la herramienta del programa. En el Grupo 2, solo 3 estudiantes construyeron correctamente los poliedros regulares sin utilizar estructuras de caras, únicamente con aristas y vértices, y esos mismos estudiantes construyeron el dual del tetraedro, pero solo uno de ellos hizo un hexaedro/octaedro. En el Grupo 1, además del dual del tetraedro, todos hicieron el dual hexaedro/octaedro y la mayoría, el del dodecaedro/icosaedro. Se debe considerar también que la herramienta de RV permite que el proceso sea más ágil y rápido que trabajando con el material manipulativo.

Respecto a los errores detectados en el Grupo 2, se observó que todos los estudiantes presentaron la dificultad E3 a la hora de cumplir el I5 y de localizar el centro de la cara, ya que Zome solo tiene

aristas y vértices; también el error E1 en I6-I9, al no ser capaces de construir algunos de los poliedros regulares ni sus duales, ya que hubo una gran confusión para localizar el centro de la cara con la estructura de vértices y aristas. En el Grupo 1 solo un estudiante mostró el error E3 al no ser capaz de localizar el centro del polígono con la herramienta, y el error E1 se presentó realizando el dual del icosaedro-dodecaedro.

En la tabla 11 se muestra una comparativa de la actividad realizada con el juego Zome entre el Grupo 1, que lo intentó tras acabar de hacerlo con la RV, y el Grupo 2, que solo usó el material manipulativo. Cabe recordar que este juego no tiene estructura de caras, solo de aristas y vértices.

Tabla 11.
Comparativa de duales con Zome, sesión 2

	Grupo 1		Grupo 2	
	Superado	No superado	Superado	No superado
Dual tetraedro	10	0	3	17
Dual hexaedro/octaedro	10	0	1	19
Dual dodecaedro/icosaedro	6	4	0	20

Se observa cómo en el Grupo 1 todo el alumnado hizo los duales del tetraedro y del hexaedro/octaedro y cómo la mayoría también construyó los de dodecaedro/icosaedro. Esto puede ser debido a que ya lo había construido antes con la RV. Sin embargo, en el Grupo 2, solo unos pocos hicieron el dual del tetraedro y solo uno de los veinte alumnos logró hacer el del hexaedro/octaedro.

Además, el alumnado del Grupo 1, cuando utilizó Zome tras la RV, fue capaz de construir poliedros duales recurrentes (véase, por ejemplo, figura 9).

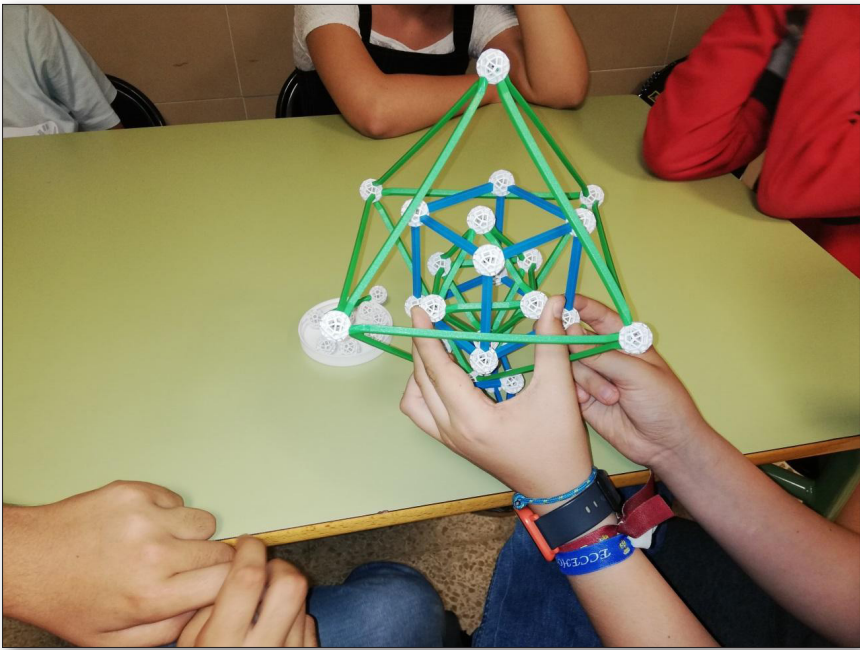


Fig. 9. Creación de poliedros duales con Zome por parte del Grupo 1.

Sesión 3

En esta sesión, toda la clase construye poliedros truncados con el juego Polydron. Como se observa en la figura 10 (derecha), el alumnado del Grupo 1, que ya había usado la RV, procedió a la construcción de poliedros en tres dimensiones de forma manipulativa directamente en el espacio, sin necesidad de establecer previamente el desarrollo plano de la figura que querían hacer. Por su parte, el alumnado del Grupo 2, figura 10 (izquierda), que aún no había utilizado la herramienta de RV, sí que necesitó seguir las instrucciones que les ofrecía el manual del juego con el desarrollo plano.

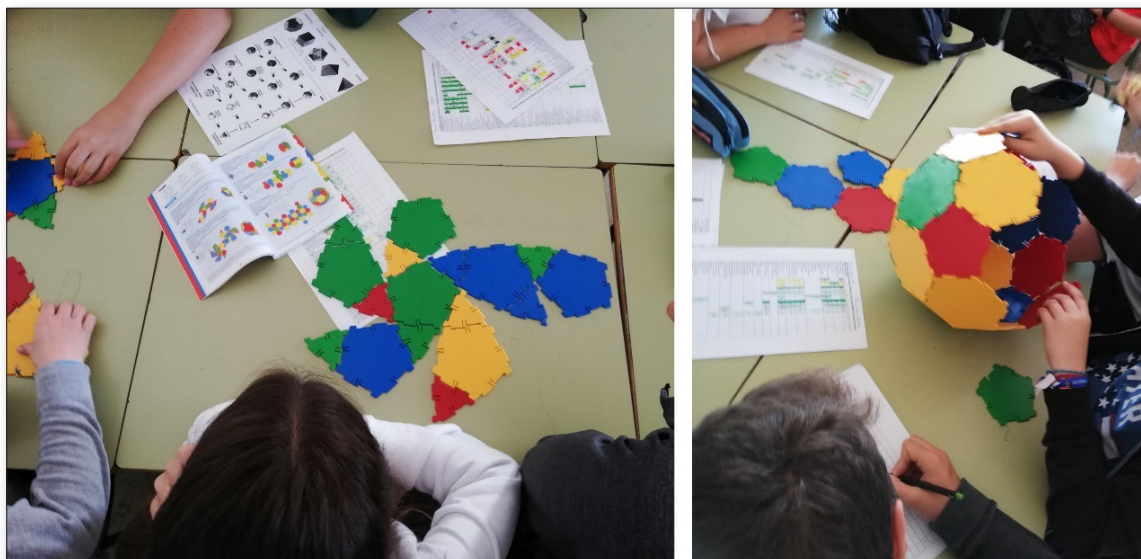


Fig. 10. Construcción de sólidos arquimedianos con Polydron.

Sesión 4

Por último, se realizó una actividad con RV en la que participaron todos los alumnos de la clase, como se ve en la figura 11, que muestra a un estudiante dibujando los ejes de giro de un icosaedro.



Fig. 11. Construcción ejes de giro de un icosaedro.

Las herramientas que el alumnado utilizó en Neotrie VR fueron: herramienta de rotación, herramienta del punto medio, goma, generador de vértices, generador de aristas, opción de colorear un polígono.

En la tabla 12 se muestra el resultado de lo que completó cada grupo.

Tabla 12.
Rúbrica de indicadores, sesión 4

Indicador	Grupo 1		Grupo 2	
	Superado	No superado	Superado	No superado
I10	10	0	18	2
I11	10	0	16	4
I12	10	0	15	5
I13	10	0	15	5
I14	10	0	10	10
I15	7	3	0	20
I16	7	3	0	20

El Grupo 1 realizó la actividad con más rapidez, seguramente debido a que ya había llevado a cabo otras dos actividades anteriores. En el caso del Grupo 2, aunque sí había realizado las 10 sesiones de usabilidad, era la primera vez que cada estudiante llevaba a cabo una actividad completa. Los estudiantes del Grupo 1, en su mayoría, realizaron todos los ejes de giro de los poliedros regulares y contaron el orden de giro del tetraedro y del hexaedro. Por otro lado, los del Grupo 2, en su mayoría, lograron desarrollar los ejes de giro del tetraedro y el hexaedro; pero, para contar su orden, la mayoría recurrió a colorear una cara para establecer, así, el punto de referencia. Los del Grupo 1, sin embargo, no lo necesitaron.

Respecto a los errores observados, el alumnado del Grupo 1 manifestó la dificultad E1 al no ser capaces de dibujar algunos de los ejes de rotación en el dodecaedro y en el icosaedro. Por otro lado, algunos estudiantes del Grupo 2 incurrieron en el error E1, también con el hexaedro y el tetraedro, aunque, como se observa en la tabla, fueron menos estudiantes. Además, también manifestaron el error E2 al no ser capaz de localizar la cara de referencia del poliedro para poder contar el orden de giro.

Al resolver las actividades 1, 2 y 4 con la RV, se ha detectado y recogido en las observaciones del diario la manifestación por parte de los estudiantes de las habilidades espaciales en los ejemplos que se describen en la tabla 13.

Tabla 13.
Habilidades espaciales mostradas en las sesiones 1, 2 y 4

Sesión 1: H1. Dibujo de los poliedros regulares y de los planos de simetría utilizando la coordinación mano-ojo y el movimiento del cuerpo. H2. Identificación de cada uno de los planos de simetría independientemente del poliedro que se trate. H4. Comprobación de que efectivamente se trata de los planos de simetría del poliedro (reflexión). H5. Unión de las aristas y vértices al dibujar poliedros o para hacer los planos de simetría. H6. Diferenciación entre planos horizontales, verticales y diagonales en un hexaedro. H7. Dibujo de los planos de simetría y poliedros sin referencias visuales de imagen presentes.
Sesión 2: H1. Dibujo de los poliedros duales. H2. Identificación de que se trata del poliedro dual del poliedro regular dibujado. H4. Colocación del dibujo del poliedro dual en la posición exacta que le corresponde respecto al poliedro regular. H5. Identificación de la relación espacial entre el poliedro regular y su dual para poder dibujarlo. H6. Distinción de un poliedro dual de otro que no lo sea. H7. Dibujo de los poliedros regulares y sus duales sin ninguna referencia visual de imágenes presente.
Sesión 4: H1. Dibujo de los ejes de giro del poliedro regular. H2. Reconocimiento de cada giro completo del poliedro y capacidad de contar el orden de giro. H3. Identificación de dónde está la cara coloreada que se usa como referencia en el giro. H4. Identificación de la relación del poliedro al girar respecto a su posición o referencia de partida. H5. Identificación del cambio de posición del cubo al no mantenerse la relación entre la cara coloreada (referencia) y la que no lo está. H6. Identificación de las caras coloreadas al realizar el giro para contar su orden de giro. H7. Recordar el orden de giro sin tener el poliedro regular delante.

Análisis y resultados de habilidades espaciales

Por último, en la tabla 14, se realiza un análisis basado en la relación entre habilidades e indicadores de la tabla 4, calculando el porcentaje de los indicadores específicos superados frente al total de los mismos puestos en juego. Se realiza el cálculo al finalizar las dos primeras actividades en las que el Grupo 1 solo usó RV y el Grupo 2 solo manipulativo (teniendo en cuenta del I1 al I9), y otro al finalizar las cuatro sesiones, cuando ya todos los grupos habían utilizado la RV.

Tabla 14.
Adquisición de habilidades espaciales

<i>Habilidad espacial</i>	<i>Grupo 1 Final de sesión 2</i>	<i>Grupo 2 Final de sesión 2</i>	<i>Grupo 1 Final de sesión 4</i>	<i>Grupo 2 Final de sesión 4</i>
H1	94 %	27 %	93 %	39 %
H2	93 %	21 %	92 %	38 %
H3	100 %	0 %	100 %	52 %
H4	95 %	27 %	93 %	39 %
H5	94 %	27 %	93 %	39 %
H6	94 %	24 %	99 %	37 %
H7	94 %	24 %	99 %	37 %

Como se observa en la tabla 14, el porcentaje de adquisición de habilidades espaciales es mucho mayor en el Grupo 1 que en el Grupo 2, aunque el Grupo 2 mejora sus porcentajes al finalizar las cua-

tro sesiones, por lo que se constata, así, la influencia positiva del uso de la RV. En cuanto al porcentaje de error total (E1, E2 y E3) del grupo clase, y basándonos en la tabla anterior, está en torno al 7 % de media en el Grupo 1 y entre el 48 % y 63 % en el Grupo 2.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A principio del siglo XXI, Presmeg (2006) apuntaba a la necesidad de disponer de una herramienta para aumentar el uso y poder de la visualización espacial en la educación matemática. Quizás se haya encontrado una de esas herramientas en el potencial que para la geometría ofrecen los entornos inmersivos de RV. Este artículo comparte y analiza una experiencia didáctica de geometría con actividades de RV, mostrando cómo es posible la integración de dichos entornos en el proceso de enseñanza-aprendizaje, favoreciendo la aparición de habilidades espaciales y pudiendo corregir algunos de los errores en geometría (Hernández, 2019; Roura y Ramírez, 2021; Sua et al., 2021). A su vez, se ha constatado la usabilidad, versatilidad y ubicuidad de la RV en la realización de las actividades llevadas a cabo en el aula, coincidiendo con las conclusiones de Santos et al. (2014) y Carrillo y Cortés (2016).

Respecto al objetivo secundario derivado del propio diseño didáctico y del contexto de la experiencia, se ha hecho una comparativa de dos actividades en las que los integrantes del Grupo 1 solo utilizaron RV y los del Grupo 2 solo usaron material manipulativo. Los resultados muestran que el número de estudiantes que cumplieron los indicadores específicos de aprendizaje en el Grupo 1 fue mayor en proporción a quienes lo hicieron en el Grupo 2, como muestran las tablas 9 y 10. Como ya indicaron Sinclair et al. (2016), gracias a este tipo de herramientas se abre la posibilidad de realizar un estudio más exhaustivo de las habilidades de visualización espacial en geometría. De esta manera, las cualidades visuales que aportan las tecnologías inmersivas hacen que se propongan como un elemento integrador y formativo en matemáticas, habilitando al alumnado para la construcción de su autoaprendizaje (Poonpaiboonpipat, 2021). La RV, con un diseño didáctico fundamentado, y con el apoyo y complemento de los materiales manipulativos, puede ser una herramienta útil para el desarrollo de las habilidades de visualización espacial en geometría (Sinclair et al., 2016).

Respecto a la adquisición de habilidades espaciales, tanto al finalizar estas dos actividades como al finalizar las cuatro sesiones, y que se refleja en la tabla 14, el alumnado del Grupo 1 ha manifestado dichas habilidades en un mayor porcentaje que el alumnado del Grupo 2. De la misma manera, el alumnado del Grupo 2 mejoró sus habilidades espaciales tras finalizar las cuatro sesiones, según se muestra en dicha tabla, por lo que pudo influir, aparte de la práctica con el resto de los materiales manipulativos, el haber usado la RV; esto coincide con lo que apuntaban Escrivá et al. (2018) e Ibili (2019), que concluían en sus estudios que la RV ejerce un papel fundamental en el desarrollo del sentido espacial del alumnado.

Respecto a los errores y las dificultades que presentó el alumnado en la evaluación inicial, la mayoría de los estudiantes del Grupo 1, de acuerdo con las tablas de indicadores no superados y las observaciones de los errores manifestados en las sesiones propuestas, no ha vuelto a cometer la práctica totalidad de errores manifestados en la evaluación inicial, mientras que, en el Grupo 2, los estudiantes han seguido mostrando muchos de ellos durante las actividades, aunque también se observa una mejora al finalizar las cuatro sesiones.

Las limitaciones que implican en este estudio de innovación las características particulares del alumnado con un único grupo-clase y el contexto determinado en el que se ha desarrollado la experiencia pueden suponer una pérdida de objetividad, ya que la figura docente es también parte investigadora, por lo que no se podrían generalizar los resultados. En una línea futura intentaremos subsanar esto con nuevos experimentos con estudiantes de otros cursos de educación secundaria y universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del proyecto de investigación FEDER Junta de Andalucía UAL2020-SEJ-B2086.

REFERENCIAS

- Astolfi, J. (1999). *El error, un medio para enseñar*. Díada Editora.
- Ayala, R., Laurente, C., Escuza, C., Núñez, L. y Díaz, J. (2020). Mundos virtuales y el aprendizaje inmersivo en educación superior. *Propósitos y Representaciones*, 8(1), e430.
<http://dx.doi.org/10.20511/pyr2020.v8n1.430>
- Barrantes López, M. y Zapata Esteves, M. A. (2015). Obstáculos y errores en la enseñanza-aprendizaje de las figuras geométricas. *Campo Abierto. Revista de Educación*, 27(1), 55-71.
- Bishop, A. J. (1992). Implicaciones didácticas de la investigación sobre la visualización. En R. C. Núñez, E. A. Sánchez y G. Z. Badillo (Eds.), *Antología en Educación Matemática* (pp. 29-42). CINVESTAV.
- Cajaraville, J. A., Fernández Blanco, T. y Godino, J. D. (2007). Configuraciones epistémicas y cognitivas en tareas de visualización y razonamiento espacial. En P. Bolea, M. Camacho, P. Flores, B. Gómez, J. Murillo y M. T. González (Eds.), *Investigación en Educación Matemática X* (pp. 7-26). SEIEM.
- Cangas, D., Morga, G. y Rodríguez, J. L. (2019). Geometry teaching experience in virtual reality with Neotrie VR. *Psychology, Society, & Education*, 11(3), 355-366.
<https://doi.org/10.25115/psye.v11i3.2270>
- Carrillo, J. L. y Cortés, J. A. (2016). Secuencias didácticas con en el área de geometría en Educación básica. *Faro: Revista Teórica del Departamento de Ciencias de la Comunicación*, 23(1), 279-304.
- Chang, Y. L., Hou, H. T., Pan, C. Y., Sung, Y. T. y Chang, K. E. (2015). Apply an augmented reality in a mobile guidance to increase sense of place for heritage places. *Journal of Educational Technology & Society*, 18(2), 166-178.
- Cunningham, S. (1991). The visualization environment for mathematics Education. En W. Zimmermann y S. Cunningham (Eds.), *Visualization in teaching and learning mathematics* (pp. 67-76). Mathematical Association of America.
- De Freitas, E. y Sinclair, N. (2012). Diagram, gesture, agency: theorizing embodiment in the mathematics classroom. *Educational Studies in Mathematics*, 80(1), 133-152.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10649-011-9364-8>
- Del Grande, J. J. (1990). Spatial sense. *Arithmetic Teacher*, 37(6), 14-20.
- Escrivá, M. T., Jaime, A. y Gutiérrez, Á. (2018). Uso de software 3D para el desarrollo de habilidades de visualización en Educación Primaria. *Edma 0-6: Educación Matemática en la Infancia*, 7(1), 42-62.
<https://doi.org/10.24197/edmain.1.2018.42-62>
- Espinoza, E. L., Carballo, A. M., Cruz, H. M. y Vega, E. M. (2021). Situación de contraejemplo y su utilidad en la actividad de enseñanza de la matemática. *UNIÓN-Revista Iberoamericana de Educación Matemática*, 17(61), e004.
- Farré-Riera, L. (2020). Contextos de aprendizaje participativos en secundaria. *Obra Digital*, 19, 133-148.
<https://doi.org/10.25029/od.2020.284.19>

- Ferrer-Torregrosa, J., Torralba, J., Jiménez, M., García, S. y Barcia, J. (2015). Development and assessment of a tool based on augmented reality for anatomy. *Journal of Science Education and Technology*, 24(1), 119-124.
- Geefrath, G. y Siller, H. S. (2018). GeoGebra as a Tool in Modelling. En L. Ball, P. Drijvers, S. Ladel, H. S. Siller, M. Tabach y C. Vale, *Uses of Technology in Primary and Secondary Mathematics Education Processes* (pp. 363-374). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-76575-4_21
- González-Parra, D. C. (2018). *Uso de material manipulativo y tecnológico para fortalecer habilidades de visualización espacial en niños de quinto grado* [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma de Bucaramanga. <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/2553>
- Guillén, G. (2000). Sobre el aprendizaje de conceptos geométricos relativos a los sólidos: Ideas erróneas. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(1), 35-53.
- Guillén, G. (2010). ¿Por qué usar los sólidos como contexto en la enseñanza/aprendizaje de la geometría? ¿Y en la investigación? En M. M. Moreno, A. Estrada, J. Carrillo, y T. A. Sierra (Eds.), *Investigación en Educación Matemática XIV* (pp. 21-68). SEIEM.
- Gutiérrez, Á. (1991). Procesos y habilidades en visualización espacial. En Á. Gutiérrez (Ed.), *Memorias del 3er Congreso Internacional sobre Investigación Matemática: Geometría* (pp. 44-59). CINVESTAV.
- Gutiérrez, Á. (1998a). Tendencias actuales de investigación en geometría y visualización (ponencia). *Encuentro de Investigación en Educación Matemática*, TIEM98. Centre de Recerca Matemàtica, Institut d'Estudis Catalans. <http://www.uv.es/Angel.Gutierrez/archivos1/textospdf/Gut98b.pdf>
- Gutiérrez, Á. (1998b). Las representaciones planas de cuerpos 3-dimensionales en la enseñanza de la geometría espacial. *Ema*, 3(3), 193-220.
- Gutiérrez, Á. (2006). La investigación sobre enseñanza y aprendizaje de la geometría. En P. Flores, F. Ruíz, y M. De la Fuente (Eds.), *Geometría para el siglo XXI* (pp. 13-58). SAEM Thales.
- Gutiérrez, Á. y Jaime, A. (2015). Análisis del aprendizaje de geometría espacial en un entorno de geometría dinámica 3-dimensional. *PNA*, 9(2), 53-83.
- Gutiérrez, Á., Ramírez, R., Benedicto, C., Beltrán-Meneu, M. J. y Jaime, A. (2018). Visualization Abilities and Complexity of Reasoning in Mathematically Gifted Students' Collaborative Solutions to a Visualization Task. A Networked Analysis. En K. S. S. Mix y M. T. Battista (Eds.), *Visualizing Mathematics* (pp. 309-337). Springer.
- Hernández, U., Anaya, S. L., Lara, E. A. y Carrascal, M. C. (2019). Las Innovaciones Educativas con TIC como generadoras de cambio en las prácticas pedagógicas de aula. *Revista Ingeniería e Innovación*, 7(1), 14-18.
<https://doi.org/10.21897/23460466.1709>
- Ibili, E. (2019). The use of dynamic geometry software from a pedagogical perspective: current status and future prospects. *Journal of Computer and Education Research*, 7(14), 337-355.
<https://doi.org/10.18009/jcer.579517>
- Jaime, A. y Gutiérrez, Á. (2017). Investigación sobre estudiantes con alta capacidad matemática. En J. M. Muñoz-Escolano, A. Arnal-Bailera, P. Beltrán-Pellicer, M. L. Callejo y J. Carrillo (Eds.), *Investigación en Educación Matemática XXI* (pp.71-89). SEIEM.
- Jiménez, A. B., Hinojosa, V. C., Ramos, J. C., Sánchez, R. M., Blasco, V. J. Q. y Mendoza, C. A. (2019). El aprendizaje basado en retos como propuesta para el desarrollo de las competencias clave. *Journal of Parents and Teachers*, 380, 50-55.
<https://doi.org/10.14422/pym.i380.y2019.008>
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (2014). Real decreto 1105/2014 por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato. *Boletín oficial del Estado*, 3, 169-546.

- Moral-Sánchez, S. N., Sánchez-Compañía, T. y Romero-Albaladejo, I. M. (2021). Evaluación inicial como catalizador para el diseño de unidades de aprendizaje de Geometría en Educación Secundaria. *Revista Épsilon*, 107, 47-57.
- Moral-Sánchez, S. N., Sánchez-Compañía, M. T. y Sánchez-Cruzado, C. (2022a). El modelo Flipped Learning enriquecido con plataformas educativas gamificadas para el aprendizaje de la geometría. *Revista Pixel-Bit*, 65, 149-182.
<http://dx.doi.org/10.12795/pixelbit.93538>
- Moral-Sánchez, S. N., Sánchez-Compañía, T. y Romero-Albaladejo, I. M. (2022b). Geometry with a STEM and Gamification Approach: A Didactic Experience in Secondary Education. *Mathematics*, 10(18), 3252.
<https://doi.org/10.3390/math10183252>
- NCTM (2000). *Principios y estándares para la educación matemática*. NCTM.
- Presmeg, N. (2006). Research on visualization in learning and teaching mathematics. En Á. Gutiérrez y P. Boero (Eds.), *Handbook of Research on the Psychology of Mathematics Education* (pp. 205-235). Sense Publishers.
- Poonpaiboonpipat, W. (2021). Pre-service mathematics teachers' perspectives on STEM-based learning activities. *Journal of Physics: Conference Series*, 1835(1), 12081-12083.
- Ramírez-Uclés, R. (2012). *Habilidades de visualización de los alumnos con talento matemático* [Tesis doctoral no publicada]. Universidad de Granada. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/23889>
- Ramírez-Uclés, R., Ramírez-Uclés, I., Flores Martínez, P. y Castro Martínez, E. (2013). Análisis de las capacidades de visualización espacial e intelectual en los alumnos con talento matemático. *Revista Mexicana de Psicología*, 30(1), 24-31.
- Ramírez-Uclés, R., Flores Martínez, P. y Ramírez-Uclés, I. (2018). Análisis de los errores en tareas geométricas de argumentación visual por estudiantes con talento matemático. *Relime*, 21(1), 29-56.
<https://doi.org/10.12802/relime.18.2112>
- Roura, R. y Ramírez, R. (2021). Sentido espacial en futuros maestros. En P. D. Diago, D. F. Yáñez, M. T. González-Astudillo y D. Carrillo (Eds.), *Investigación en Educación Matemática XXIV* (pp. 537-544). SEIEM.
- Santos, M. E. C., Chen, A., Taketomi, T., Yamamoto, G., Miyazaki, J. y Kato, H. (2014). Augmented reality learning experiences: Survey of prototype design and evaluation. *IEEE Transactions on Learning*, 7(1), 38-56.
<https://doi.org/10.1109/TLT.2013.37>
- Sinclair, N. y Bruce, C. (2015). New opportunities in geometry education at the primary school. *ZDM Mathematics Education*, 51(3), 319-329.
<https://doi.org/10.1007/s11858-015-0693-4>
- Sinclair, N., Bartolini Bussi, M., De Villiers, M., Jones, K., Kortenkamp, U., Leung, A. y Owens, K. (2016). Recent research on geometry education: an ICME13 survey team report. *ZDM Mathematics Education*, 48(5), 691-719.
<https://doi.org/10.1007/s11858-016-0796-6>
- Socas, M. (1997). Dificultades, obstáculos y errores en el aprendizaje de las Matemáticas en la Educación Secundaria. En L. Rico (Coord.), *La educación matemática en la enseñanza secundaria* (pp. 125-154). Universidad de Barcelona.
- Sua, C., Gutiérrez, Á. y Jaime, A. (2021). Análisis de una actividad de visualización en un entorno de geometría dinámica 3d y realidad aumentada. En P. D. Diago, D. F. Yáñez, M. T. González-Astudillo y D. Carrillo (Eds.), *Investigación en Educación Matemática XXIV* (pp. 579-586). SEIEM.

Using Virtual Reality in Geometry for the development of spatial skills

Silvia Natividad Moral-Sánchez

Departamento de Didáctica de la Matemática, de las CC. SS. y de las CC. EE. Universidad de Málaga (Málaga), España.
silviamoral@uma.es • <https://orcid.org/0000-0002-0200-3569>

María Teresa Sánchez-Compañá

Departamento de Didáctica de la Matemática, de las CC. SS. y de las CC. EE. Universidad de Málaga (Málaga), España.
teresasanchez@uma.es • <https://orcid.org/0000-0001-7474-5038>

Isabel Romero Albaladejo

Departamento de Didáctica de la Matemática. Universidad de Almería (Almería), España.
imromero@ual.es • <https://orcid.org/0000-0002-4557-5284>

In the 21st century, there is a need for a change in the educational paradigm, and the use of ICT can help us achieve this. The main aim of this article is to share and analyse a geometry teaching experience on polyhedra in 3rd of ESO (students aged between 14 and 16). The activities with virtual reality are designed with the purposes of helping students overcome the geometric errors detected in the initial assessment and develop spatial skills. This experience was carried out with 30 secondary school students, organised into 6 teams of 5 people each. The whole group was divided into two smaller, heterogeneous groups. Group 1, made up of 10 students, started working directly with virtual reality, while Group 2, made up of the remaining 20 students, began to work in parallel on the same activities with manipulative materials. As secondary objectives, derived from the didactic design itself as well as from the context of the specific experience, a comparison is made, in two of the activities, between the immersive virtual reality tool Neotrie VR and the conventional manipulative materials used.

Several instruments were employed to collect information, including an assessment rubric based on specific learning indicators. An analysis instrument was also used to establish which spatial skills can be highlighted in each of the learning indicators and how each spatial skill is related to geometric errors.

The results of the first session, where the symmetry planes of Platonic solids were identified and constructed with Neotrie VR by Group 1, and with methacrylate polyhedra and a cardboard by Group 2, show that the number of learning indicators achieved by Group 1 is significantly higher than that of Group 2. Furthermore, while Group 1 had a reflection tool in the software to check whether the plane constructed was actually a plane of symmetry, Group 2 did not have this option. The results of the second session, in which dual polyhedra were constructed using NeotrieVR (Group 1) and Zome game (Group 2), show that the number of learning indicators achieved by Group 1 is, once again, higher than that obtained by the members of Group 2. Most students in Group 1 constructed each of the dual polyhedra without relying on the structure of faces or flat developments, while in Group 2, only 3 students constructed the dual tetrahedron and only one the hexahedron/octahedron. In the third session, where Archimedean solids were built with the Polydron game, Group 1 built them in 3D directly and Group 2 needed to use the flat developments to assemble figures. In the last session, where both groups used Neotrie VR to make the axes of rotation and count their order, students in Group 2 mostly resorted to colouring a face to establish a reference point and count the order, while students in Group 1 did not need to do so. According to the analysis instrument, at the end of the first two sessions, Group 1 students showed a higher percentage of spatial skills than Group 2. At the end of the four sessions, Group 2 improved this percentage, not only from the practice with the rest of the manipulative materials, but also due to the positive influence of the use of the virtual reality tool. Regarding errors and difficulties found among students in the initial assessment, most of the students in Group 1 did not make practically any of the errors again, while in Group 2, they continued to fail during the activities, although an improvement was also observed at the end of the four sessions.

Virtual reality with a well-founded didactic design, supported and complemented by manipulative materials, can be a useful tool for the development of spatial visualisation skills in geometry, as well as for overcoming errors.



Desarrollo del pensamiento algebraico a través de la justificación en educación primaria

Development of Algebraic Thinking Through Justification in Elementary Education

Eder Pinto

Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Educación, Rancagua, Chile
eder.pinto@uoh.cl

Marta Molina

Universidad de Salamanca, departamento de Didáctica de las Matemáticas y de las Ciencias Experimentales, Ávila, España
martamolina@usal.es

Cristina Ayala-Altamirano

Universidad de Málaga, departamento de Didáctica de la Matemática, Ciencias Sociales y Ciencias Experimentales, Málaga, España
cristina.ayala@uma.es

María C. Cañadas

Universidad de Granada, departamento de Didáctica de la Matemática, Facultad de Ciencias de la Educación, Granada, España
mconsu@ugr.es

RESUMEN • El objetivo de este trabajo es describir una propuesta de enseñanza que promueva el pensamiento algebraico a través de la expresión y justificación de ideas matemáticas al resolver tareas relacionadas con tres enfoques distintos del pensamiento algebraico. Diseñamos un experimento de enseñanza implementado durante la pandemia de la COVID-19 en Chile. Analizamos las discusiones orales y las producciones escritas de niños de cuarto de primaria (9-10 años). Los resultados muestran que los niños expresaron y justificaron ideas algebraicas cada vez más sofisticadas. Es decir, adoptaron paulatinamente un lenguaje matemático más preciso y abstracto. Concluimos que esta modalidad de trabajo, en la cual se destaca el carácter algebraico de la aritmética a través de diversas instancias de discusión, es un aporte para los docentes, al guiarlos en abordar los desafíos de enseñanza actuales.

PALABRAS CLAVES: Conjetura; Educación primaria; Generalización; Justificación; Pensamiento algebraico.

ABSTRACT • The aim of this paper is to describe a teaching proposal that promotes algebraic thinking through the expression and justification of mathematical ideas when solving tasks related to three different approaches to algebraic thinking. We designed a classroom teaching experiment implemented during the COVID pandemic in Chile. We analyze the oral discussions and the written productions of children in fourth grade (9-10 years old). The results show that the children expressed and justified increasingly sophisticated algebraic ideas. That is, they gradually adopted a more precise and abstract mathematical language. We conclude that this modality of work, in which the algebraic character of arithmetic is highlighted through various instances of discussion, is a contribution for teachers, by guiding them in addressing current teaching challenges.

KEYWORDS: Conjecture; Elementary education; Generalization; Justification; Algebraic thinking.

Recepción: noviembre 2022 • Aceptación: enero 2023 • Publicación: marzo 2023

Pinto, E., Ayala-Altamirano, C., Molina, M. y Cañadas, M. C. (2023). Desarrollo del pensamiento algebraico a través de la justificación en educación primaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 41(1), 149-173.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5835>

INTRODUCCIÓN

Los currículos de diferentes países han introducido, desde hace varios años, el desarrollo del pensamiento algebraico desde los primeros cursos (Pincheira y Alsina, 2021). Recientemente, el currículo español ha introducido la noción de «sentido algebraico», la cual involucra «los saberes relacionados con el reconocimiento de patrones y las relaciones entre variables, la expresión de regularidades o la modelización de situaciones con expresiones algebraicas» (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2022, p. 93). Dichos saberes se reconocen como elementos que forman parte del pensamiento algebraico (Kaput, 2008). Además, un creciente número de investigaciones han reportado cómo niños de 4 a 12 años interactúan con contenidos algebraicos (por ejemplo, Blanton et al., 2022; Cetina-Vázquez y Cabañas-Sánchez, 2022; Morales et al., 2018; Pinto y Cañadas, 2021; Radford, 2021). Sin embargo, aún quedan desafíos respecto a cómo introducir el pensamiento algebraico en educación primaria.

Las experiencias de comunicación y representación para dar significado a las ideas matemáticas han cobrado interés en el desarrollo del pensamiento algebraico (por ejemplo, Ayala-Altamirano y Molina, 2021; Kaput, 2008; Rusell et al., 2017; Stephens et al., 2017) y constituyen una línea abierta en la investigación sobre pensamiento algebraico (Kieran, 2022). Si bien la manera de introducir el álgebra en la escuela varía según el país, existe un interés común en que los niños construyan justificaciones cada vez más sofisticadas para autoconvencerse y convencer a otros sobre las regularidades encontradas (por ejemplo, Carpenter et al., 2003; Lannin et al., 2011; Russell et al., 2017). En el contexto del pensamiento algebraico, la justificación permite a los niños refinar y expresar con mayor claridad sus ideas matemáticas generales (Stephens et al., 2017) y ayuda al profesorado a tomar decisiones pedagógicas bien informadas (Ingram et al., 2019), a partir de lo que expresan los niños (Morgan et al., 2014).

Uno de los desafíos de la educación del siglo **xxi**, destacado en las orientaciones del currículo español, es implementar en el aula metodologías activas que permitan dinamizar la actividad mediante el intercambio de ideas, la elaboración de argumentos, la investigación y la reflexión grupal (Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2022). Considerando esto, en este trabajo presentamos el diseño instruccional de una escuela de verano (escuela, en adelante). La escuela es una actividad que se implementa durante períodos de vacaciones escolares y a la cual asisten niños de 9 a 10 años que tienen interés en participar. La escuela que presentamos aquí tenía por propósito trabajar durante dos semanas la expresión y justificación de ideas matemáticas generales, en el contexto del álgebra escolar.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Concebimos el pensamiento algebraico como un tipo de pensamiento matemático que se refiere a cantidades indeterminadas (incógnitas, variables, parámetros o números generalizados), y trata dichas cantidades de forma analítica, es decir, aunque las cantidades sean desconocidas, se suman, restan, multiplican o dividen como si fueran conocidas (Radford, 2018). Al pensar algebraicamente, se razona sobre la generalidad, se percibe una estructura algebraica a partir del estudio de relaciones en las operaciones y se estudian los cambios entre las cantidades involucradas (Kieran, 2004).

Prácticas esenciales y enfoques al pensamiento algebraico

El pensamiento algebraico puede entenderse a través de cuatro prácticas esenciales: (a) generalizar; (b) representar; (c) justificar; y (d) razonar con estructuras y relaciones matemáticas (Blanton et al., 2011; Kaput, 2008). La *generalización* está en el centro del pensamiento algebraico y se puede interpretar como la acción de reconocer que algunos atributos de la situación matemática pueden cambiar, mientras que otros permanecen invariables (Mason, 2017). Atender a la generalización en las situaciones

propuestas permite que los niños se alejen de las particularidades asociadas al cálculo aritmético y puedan identificar la estructura y las relaciones matemáticas involucradas (Blanton et al., 2011).

Al *representar*, los niños pueden emplear distintos medios para expresar sus ideas matemáticas generales, algunos convencionales y otros no, tales como los gestos, el ritmo al hablar y el lenguaje natural (Radford, 2018). Es importante mencionar que el pensamiento algebraico puede tener lugar sin que se haga uso de simbolismo algebraico (Carraher y Schliemann, 2007). Es por esto por lo que la expresión de la generalización tendrá distintos grados de sofisticación según las representaciones empleadas.

La práctica de *razonar* involucra tratar las generalizaciones como objetos en sí mismos (Blanton et al., 2018). Es decir, implica que los niños empleen las generalizaciones en otras situaciones matemáticas. La *justificación* la describiremos en el siguiente apartado.

Estas cuatro prácticas deben estar presentes en la actividad algebraica, independientemente del enfoque del álgebra escolar que se considere. En este trabajo distinguimos tres de ellos:

1. *Aritmética generalizada*. Las operaciones aritméticas se usan como contenido para desarrollar pensamiento algebraico, y se focalizan en sus propiedades. El foco está en notar regularidades en las operaciones aritméticas que puedan ser generalizadas más allá de números específicos (Stephens et al., 2017).
2. *Equivalencia, expresiones, ecuaciones e inecuaciones*. Se busca desarrollar una comprensión relacional del signo igual, así como razonar con expresiones, establecer la equivalencia entre distintas expresiones en términos generales y plantear y resolver ecuaciones e inecuaciones (Blanton et al., 2018). Se busca fomentar el pensamiento relacional, lo que implica considerar las expresiones desde una perspectiva estructural, en lugar de como procesos que se deben seguir paso a paso (Carpenter et al., 2003; Molina, 2009).
3. *Funciones (pensamiento funcional)*. Se centra en la generalización y expresión de la relación entre cantidades que varían de forma conjunta (Blanton et al., 2011). Específicamente, la función, la relación entre cantidades y la variación conjunta entre las cantidades involucradas constituyen los elementos centrales para desarrollar el pensamiento algebraico en los primeros cursos (Cañas y Molina, 2016, p. 210).

La justificación en educación primaria

De manera general, la justificación matemática es entendida como un proceso de interacción social que ocurre en el aula y que favorece que los niños desarrollen su comprensión y conocimiento del contenido, así como constituye una herramienta para acceder a varias formas de razonamiento matemático (Thanheiser y Sugimoto, 2022). La justificación ayuda a determinar y explicar la verdad de una conjetura o afirmación (Blanton et al., 2011). Lo anterior favorece una mejor comprensión del problema, su estructura y relaciones. Desde nuestra perspectiva, los argumentos que forman parte del proceso de justificación se construyen a partir de los conocimientos compartidos por la comunidad (Simon y Blume, 1996), es decir, se basan en ideas, definiciones y propiedades matemáticas que están al alcance conceptual de los niños.

En el contexto del pensamiento algebraico, Russell et al. (2017) han desarrollado un modelo de enseñanza que busca apoyar a los profesores en el desarrollo de argumentos matemáticos. Este modelo contempla cinco fases: (a) notar un patrón o regularidad; (b) escribir una conjetura basada en la regularidad notada; (c) investigar a través de representaciones la validez de la conjetura; (d) construir un argumento matemático sobre el por qué la regularidad ocurre; y (e) comparar qué ocurre con las conjeturas al trabajar con otras operaciones aritméticas, considerando un conjunto de problemas, ecuaciones o expresiones similares a las tratadas anteriormente.

METODOLOGÍA

La escuela es una actividad que se realiza con niños de 9 a 10 años durante las vacaciones de verano y el foco estuvo en el fomento y desarrollo del pensamiento algebraico en niños de estas edades. Su objetivo fue promover que los niños expresaran y justificaran las ideas matemáticas generales encontradas al trabajar con diferentes contenidos de carácter algebraico. Esta actividad tuvo lugar durante las primeras dos semanas de enero (verano en Chile). Dado el contexto sanitario provocado por la pandemia de la COVID-19, se desarrolló de manera virtual. Los niños se conectaron desde sus hogares a través de diferentes dispositivos: móviles, tabletas u ordenadores. Adicionalmente, cada niño empleó materiales físicos que le fueron facilitados: una pizarra con marcadores de diferentes colores, una carpeta para registrar sus hallazgos en hojas de trabajos y materiales manipulativos (figuras de papel que representaban sobres, cartas, mesas y personas).

Participantes

Veintiún niños, de entre 9 y 10 años, asistieron a las sesiones. El mes anterior habían acabado 4.º de Primaria, curso que fue desarrollado completamente de manera virtual. Los niños pertenecían a una fundación educacional que atiende a niños y jóvenes de sectores de escasos recursos.

En cuanto a sus conocimientos previos, y debido a la situación sanitaria del país, durante gran parte del curso los niños trabajaron los objetivos de aprendizaje que se refieren al eje de números y operaciones. En lo que respecta al eje de patrones y álgebra, los niños trabajaron exclusivamente con patrones numéricos en tablas que involucraban una operación. En el curso anterior (3.º de Primaria), resolvieron ecuaciones de un paso que involucraban adiciones y sustracciones, empleando estrategias como ensayo y error y utilizando la operación inversa. Las representaciones matemáticas que solían usar son las simbólico-numéricas y el énfasis de las clases estaba centrado en fomentar la fluidez en el cálculo.

Los niños fueron seleccionados con ayuda de sus profesores habituales de Matemática a partir de tres criterios: (a) disposición a trabajar, dado que nos interesaba contar con niños que quisieran participar voluntariamente en las actividades; (b) diferentes intereses, ritmos de aprendizaje y calificaciones en la asignatura de Matemática; y (c) paridad de género. Esto se tradujo en que participaron 10 niñas y 11 niños.

Diseño general

El diseño de la Escuela contempló un trabajo colaborativo que involucró la participación de los profesores habituales de Matemática de los niños y de los profesores-investigadores doctores en Didáctica de la Matemática de Chile y España. Estos últimos llevan años trabajando en el pensamiento algebraico de educación primaria (www.pensamientoalgebraico.es). En el diseño de la escuela se mantuvieron cuatro reuniones entre ambos grupos de profesores para revisar conjuntamente las tareas diseñadas por los investigadores y que los profesores habituales juzgaran su adecuación desde el punto de vista de los conocimientos y experiencia previa de los niños. En la implementación, los profesores-investigaciones guiaron las sesiones y los docentes habituales cumplieron un rol observador y tras cada sesión podían comentar sus impresiones con los profesores-investigadores.

Organizamos la escuela en 10 sesiones, tal como se muestra en la figura 1.

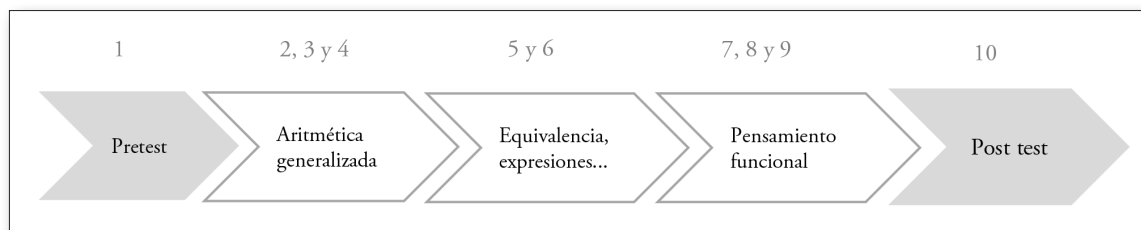


Fig. 1. Organización de las sesiones.

En la primera y última sesión aplicamos una evaluación para recoger evidencias sobre cómo los niños expresaban y justificaban sus ideas al interactuar con contenidos algebraicos. Estas evaluaciones contemplaban tres tareas, cada una asociada a un enfoque del álgebra. En el pretest, observamos que los niños abordaron las tareas centrándose en el cálculo y la búsqueda de una respuesta numérica y única. Los elementos que mencionaban en sus justificaciones estaban en coherencia con esto, es decir, adoptaban una perspectiva aritmética empleando un vocabulario coloquial o matemáticamente impreciso. En el posttest observamos un cambio en las estrategias de los niños. Teniendo en cuenta nuestra caracterización del pensamiento algebraico, la mayoría de los alumnos se refirieron a cantidades indeterminadas con distintos significados (números generalizados, incógnitas o variables), percibieron la estructura de los problemas propuestos e identificaron relaciones que expresaron de modo general de diversas formas. Con respecto a las justificaciones, consideraron los elementos algebraicos antes mencionados y el vocabulario también fue más sofisticado, ya que utilizaron las palabras que se introdujeron entre las sesiones 2 a la 9 (para más detalles, ver Pinto y Ayala-Altamirano, 2021)

Las sesiones 2 a 9 las organizamos siguiendo los enfoques del álgebra escolar previamente descritos. Comenzamos con la aritmética generalizada (sesiones 2 a 4), pues conjeturamos que los contextos matemáticos relacionados con este enfoque (propiedades de las operaciones) eran más cercanos a los niños, dadas sus experiencias matemáticas previas. Luego seguimos con el trabajo con ecuaciones (sesiones 5 a 6), dado que fue un tema que los niños habían trabajado en el año anterior. Finalmente, abordamos el trabajo con funciones (sesiones 7 a 9).

La expresión y justificación de ideas matemáticas generales fue el eje transversal de nuestra propuesta. Para su desarrollo, cada una de las sesiones 2 a 9 fueron organizadas en tres bloques, tal como se muestra en la figura 2. Una de las razones por las que seguimos esta organización fue para proporcionar distintos espacios de cooperación, confrontación y discusión de ideas y para esto nos inspiramos en las ideas de Russell et al. (2017). Otra razón fue dar oportunidad a los niños de identificar paulatinamente regularidades y generalizar. Para esto último nos basamos en las ideas de Blanton (2008) y Cañadas y Castro (2007).

Inicio de la sesión – Grupo completo (21 niños) Introducción de un problema matemático para: (a) conectar con los conocimientos previos de los niños y experiencias cotidianas; (b) introducir vocabulario matemático; y (c) brindar un contexto general a la actividad del bloque 1.
Bloque 1. Búsqueda de regularidades y desarrollo de una conjetura – Grupos pequeños (4-5 niños) Los niños individualmente notan regularidades en el problema presentado. Luego, en grupos expresan una conjetura sobre el problema.
Receso 1
Bloque 2. Articular una afirmación general a través de diferentes representaciones – Grupo completo (21 niños) Basados en las conjeturas trabajadas en el grupo pequeño, los niños investigan la veracidad de dichas conjeturas a través de diferentes representaciones matemáticas. Luego intentan explicar de modo general, o refiriéndose a cantidades indeterminadas, por qué la conjetura es verdadera.
Receso 2
Bloque 3. Extender lo aprendido a otros casos – Grupos pequeños (10-11 niños por grupo) Con base en los hallazgos anteriores, los niños transfieren lo discutido a otros casos, con la posibilidad de afinar o refinar los hallazgos obtenidos.
Cierre de la sesión

Fig. 2. Estructura de cada sesión.

Cada uno de los bloques tuvo una extensión de 40-45 minutos, aproximadamente. Con la finalidad de atender a la diversidad, el docente agrupaba a los niños de diferentes formas para asegurar diversos tipos de interacciones entre los participantes durante la sesión. En lo que respecta a los grupos pequeños (bloques 1 y 3), estos favorecieron que todos expresaran sus ideas.

El rol de los profesores-investigadores fue trabajar en colaboración con los niños y promover la discusión. Para esto, el profesor realizó preguntas, introdujo vocabulario nuevo, lo relacionó con las ideas de los niños y promovió distintas formas de representación de las ideas matemáticas (nuevas o propuestas por los niños). Se buscó que en el transcurso del tiempo los niños fueran cada vez más autónomos en la resolución de diferentes situaciones y en sus respectivas discusiones.

Diseño de las sesiones

En esta sección describimos las actividades relacionadas con cada uno de los enfoques mencionados.

Sesiones de aritmética generalizada

En las sesiones 2, 3 y 4 buscamos que los niños: (a) expresaran, a través de diferentes representaciones, las regularidades encontradas al trabajar con diferentes tipos de relaciones y propiedades numéricas; y (b) construyeran justificaciones sobre la veracidad de sus conjeturas. Para conseguir lo anterior, los contextos alentaban a evitar los cálculos y, en cambio, buscaran regularidades a través de diferentes representaciones.

En la sesión 2, la actividad consistía en argumentar qué sucedía al sumar números pares e impares. Planteamos esta cuestión a partir de un juego inicial: «Yo diré un número y ustedes dirán otro número. Si sumamos los números y el resultado es par, yo gano un punto, pero si es impar, ustedes ganan el punto». Los niños debían desarrollar y comunicar estrategias para ganar, a través del uso de diferentes tipos de representaciones, tales como: (a) manipulativas, como las tarjetas par e impar, (b) simbólico-numérica, mediante cálculos aritméticos y (c) lenguaje natural, tanto oral como escrito. En esa sesión se introdujo vocabulario matemático específico (número par, número impar, sumandos, sumas y conjetura), que contribuyó a una mayor sofisticación en los argumentos.

En las sesiones 3 y 4 discutimos con los niños sobre el significado del signo igual a partir del análisis de diferentes sentencias numéricas y algebraicas (ver figura 3).

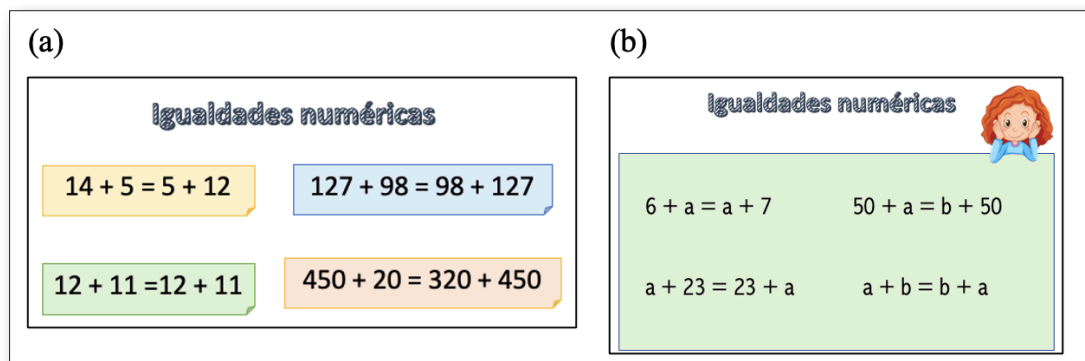


Fig. 3. Ejemplos de sentencias numéricas empleadas en las sesiones tercera (a) y cuarta (b).

Las propiedades aritméticas de la adición involucradas en ambas sesiones fueron las mismas (conmutativa, compensación, asociativa y complementaria de la suma y la resta). En estas sesiones introdujimos vocabulario específico y precisamos el significado de algunos conceptos matemáticos, tales como: sumando y suma, igualdad, propiedades conmutativa y asociativa de la adición y sentencias numéricas. Las propiedades conmutativa y asociativa fueron abordadas mediante la búsqueda de relaciones numéricas, haciendo explícita la presencia de cada propiedad. La diferencia entre ambas sesiones fue el tipo de representación matemática trabajada. En la sesión 3 abordamos las sentencias numéricas solo con representaciones simbólico-numéricas, mientras que en la sesión 4 se introdujo, por primera vez, la letra como una representación para generalizar las propiedades aritméticas (por ejemplo, $a + 23 = 23 + a$). En este caso, la letra fue introducida explicando que se empleaba para representar un número natural cualquiera. Para más información sobre estas sesiones, ver Embid (2022).

Sesiones de equivalencia, expresiones y ecuaciones

En las sesiones 5 y 6 nos propusimos que los niños: (a) representaran y resolvieran ecuaciones mediante diferentes estrategias, (b) emplearan la letra como representación de una incógnita y (c) proporcionaran evidencias que validaran explicaciones dadas. Durante esas sesiones introdujimos las ideas de igualdad, ecuación, historias matemáticas¹ y letra como incógnita.

En cada una de las sesiones se trabajó con diferentes problemas aritméticos de estructura verbal, los cuales fueron representados con lenguaje natural y los niños debían traducirlos y representarlos con lenguaje matemático. En primera instancia, las cantidades indeterminadas podían ser representadas como los niños consideraran pertinente, y luego se discutía sobre la posibilidad de representarlas con letras. En la figura 4 presentamos el problema trabajado en la quinta sesión: cartas y sobres (Jansen y Radford, 2015).

1. Corresponde a la contextualización de una expresión simbólica empleando lenguaje natural (escrito o hablado). Así, por ejemplo, «María tiene 25 lápices y pierde algunos. Al llegar a casa, solo tiene 15» sería una historia matemática asociada a la expresión $25 - x = 15$.

Silvia y Carlos tienen algunas cartas. Carlos tiene 3 cartas y Silvia tiene 2 cartas. Su madre prepara tres sobres con el mismo número de cartas en cada uno. Le da 1 sobre a Carlos y 2 a Silvia. Ahora los dos niños tienen la misma cantidad de cartas. ¿Cuántas cartas hay en un sobre?

Fig. 4. El problema de las cartas y los sobres.

En la figura 5 mostramos los problemas utilizados en la sesión 6. El primer problema, el de los lápices, involucra una incógnita y tiene una solución. El problema de las manzanas tiene asociadas dos incógnitas, cuyos valores no se pueden determinar dado que no hay datos suficientes en el enunciado. Más información sobre el desarrollo de esta sesión es discutida en Ayala-Altamirano et al. (2022).

- a) Compré una caja con lápices de colores. Como en mi casa tenía 15 lápices, ahora tengo 20 en total.
- b) Tengo una canasta con manzanas. En el interior de la canasta hay 20 manzanas verdes y otras rojas.

Fig. 5. El problema de los lápices (a) y el problema de las manzanas (b).

Sesiones de funciones

En las sesiones 7, 8 y 9 los problemas presentados involucraron diferentes tipos de funciones lineales, todos ellos en el contexto de una fiesta de cumpleaños. Nuestro interés era que los niños: (a) identificaran las regularidades presentes en las relaciones entre variables; y (b) desarrollaran una justificación de por qué la regla de función representa con precisión la situación del problema.

En la sesión 7 presentamos el problema de la silla musical (ver figura 6), que involucra la función $y = x - 1$. Los niños establecieron conjeturas y predicciones sobre cuántas sillas se necesitarían cuando participan 10, 8, 501, 1000, x y *cualquier* número de niños. El propósito fue concluir que el número de sillas dependería del número de jugadores: se colocará *siempre* una silla menos que el número de personas que está jugando.

Durante una fiesta de cumpleaños, los asistentes participarán del juego «la silla musical». Este juego trata de bailar alrededor de unas sillas y buscar un asiento cuando la música se detenga. Los jugadores deben estar muy atentos para no perder.

Por ejemplo:

- Cuando hay 2 jugadores, se debe colocar 1 silla.
- Cuando hay 3 jugadores, se deben colocar 2 sillas.
- Cuando hay 5 jugadores, se deben colocar 4 sillas.

Fig. 6. Problema de la silla musical.

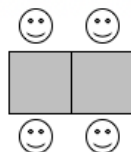
En la sesión 8 presentamos una adaptación del problema de las mesas y personas de Carraher y Schliemann (2007). Este problema involucra la función $y = 2x$ (ver figura 7).

Francisco está celebrando su cumpleaños. Él dispone de mesas cuadradas y quiere asegurarse de tener un asiento para todos.

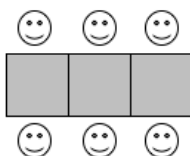
Francisco puede sentar a dos personas en una mesa, de la siguiente manera:



Si coloca otra mesa, puede sentar a 4 personas



Si vuelve a colocar otra mesa, puede sentar a 6 personas



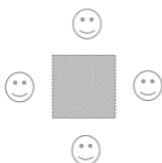
¿Cuántas personas se podrán sentar en 4, 6, 10, 8, 20, 50 y 100 mesas?

Fig. 7. Problema de las mesas y las personas (parte 1).

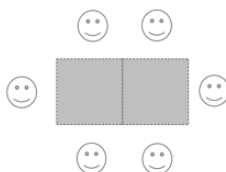
Diferentes tipos de representaciones fueron presentadas para explorar las regularidades involucradas: (a) materiales manipulativos, los cuales representaban las mesas y personas; (b) tablas, para que los niños organizaran los valores de las variables; (c) representaciones simbólico-numéricas, en las cuales los cálculos podrían ayudar a encontrar regularidades; y (d) representaciones simbólico-algebraicas, donde se presentaron evidencias del uso de la letra.

Finalmente, en la sesión 9 presentamos la segunda parte del problema de las mesas y las personas, en el cual la función involucrada es $y = 2x + 2$ (ver figura 8). Durante la resolución de este problema, el interés estaba puesto en que todos emplearan, en algún momento, la letra para relacionar las variables involucradas en la situación (mesas y personas).

Ahora Francisco ha decidido cambiar la organización de las mesas y las personas. Por ejemplo, puede sentar a cuatro personas en una mesa, de la siguiente manera:



Si coloca otra mesa, puede sentar a 6 personas:



Si vuelve a colocar otra mesa, puede sentar a 8 personas:



¿Cuántas personas se podrán sentar en 4, 6, 10, 8, 20, 50 y 100 mesas?

Fig. 8. Problema de las mesas y las personas (parte 2).

PRINCIPALES HALLAZGOS

Considerando el alcance y la extensión de este manuscrito, en esta sección describimos los principales hallazgos referidos a una sesión por cada enfoque al álgebra escolar. Presentamos la última sesión de cada enfoque, dado que en estas se pueden observar evidencias de cómo los niños interactúan y construyen justificaciones matemáticas más sofisticadas, apoyándose en diferentes tipos de representaciones. Describimos los principales hallazgos de esta sesión diferenciando los tres bloques en los que se estructuran. Para asegurar el anonimato de los niños, empleamos etiquetas que tienen la estructura A_i , donde $i = 1$ hasta 21.

Aritmética generalizada: el caso de las sentencias numéricas (sesión 4)

Los propósitos de la sesión fueron: (a) emplear la letra como representación de un número generalizado y (b) fomentar una visión relacional (no computacional u operacional) para construir argumentos matemáticos.

Bloque 1. Búsqueda de regularidades y desarrollo de una conjetura

Los niños, reunidos en grupos pequeños, discutieron sobre la veracidad o falsedad de diferentes igualdades numéricas (ver figura 3, en b). Al ser la primera interacción con la letra, en un principio los niños

tuvieron dudas sobre el modo de emplear las letras en un contexto matemático. Estas dudas se disiparon al recordar las sentencias numéricas de la sesión anterior y explicar que las letras representaban un número desconocido cualquiera. El siguiente diálogo es un ejemplo representativo de lo que ocurrió en los diferentes grupos al afirmar que la sentencia $a + 23 = 23 + a$ es verdadera.

- Profesor (P): ¿Qué te hizo pensar que esta sentencia es verdadera, A_1 ?
- A_1 : Porque si las dos a valen lo mismo y los dos 23 valen lo mismo. Y si se suman, darán lo mismo.
- P: A_2 y A_3 , ¿les suena a algo parecido esta sentencia? ¿Relacionado con lo que vimos ayer?
- A_2 : Sí, básicamente serían los mismos números cambiados de posición.
- P: Bien. Son los mismos sumandos, pero cambiados de posición. A_3 , ¿te acuerdas del nombre que tiene esta propiedad de la adición, en la cual se tienen los mismos dos sumandos, pero en diferentes posiciones?
- A_3 : ¡Hm! ¿Propiedad conmutativa?

En el extracto anterior se observa que los niños justificaron sus respuestas estableciendo relaciones entre sumandos que se muestran a cada lado del signo igual, sin tener que recurrir al cálculo, es decir, haciendo uso de un significado relacional del signo igual. Sobre la forma en la que interactúan con letras, los niños refirieron a estas como una cantidad indeterminada, no mencionando ningún número en particular. Además, aunque con ayuda del profesor, el extracto anterior da cuenta de que los niños relacionaron lo discutido en la clase anterior y evocaron propiedades de las operaciones (conmutativa de la adición, en este caso) para justificar la veracidad de las sentencias.

Bloque 2. Articular una afirmación general a través de diferentes representaciones

La clase completa analizó las conjeturas planteadas por cada grupo pequeño durante el bloque anterior. Así, por ejemplo, A_{17} explicó la conjetura que concluyeron en su grupo al analizar la sentencia $50 + a = b + 50$, indicando: «en ambos lados hay un 50, pero *creemos*² que a y b son números diferentes. Entonces, *creemos* que la sentencia es falsa». Ante esta afirmación, el grupo completo estuvo de acuerdo en indicar que la afirmación es falsa y se generó el siguiente diálogo con el resto de la clase:

- P: ¡Qué interesante! A ver, A_8 , explícame cómo lo pensaron con tu grupo.
- A_8 : Todo el grupo votó que era falsa porque nosotros dijimos que a y b no son iguales... dijimos que uno era más grande que el otro. Como la a va antes que la b ...
- P: Entiendo. O sea, podríamos decir que a y b son diferentes, pero no sabemos cuál es más grande que la otra, ¿cierto? Entonces, ¿por qué razón la sentencia es falsa?
- A_8 : A ver. Los números estaban bien en ambos lados...
- P: ¿A qué te refieres?
- A_8 : Pues en ambos lados (del signo igual) está el 50.
- P: Entiendo, y entonces ¿qué pasa con a y b ?, ¿qué se les está sumando?
- A_8 : La a y la b no son la misma letra, y no nos iba a dar el mismo resultado, pues una (letra) era mayor que la otra. Entonces, diríamos que a podía valer 1 y b podría valer 2.
- P: A ver. Entonces, A_3 , ¿qué podríamos hacer para que esta sentencia sea verdadera?
- A_3 : Eh, yo creo que podría ser verdadera si cambiamos la a por una b , o la b por una a .

En este ejemplo, de nuevo los niños interpretan el signo igual como una relación al establecer relaciones entre los sumandos que se mostraban a cada lado del signo igual. Cuando les tocó comparar

2. La cursiva es nuestra.

las letras, ellos intentaron justificar sus razonamientos indicando que las letras son diferentes. Basándose en el orden del alfabeto le asignaron un posible valor a cada letra para justificar la falsedad de la sentencia, refiriendo a estos valores como unos valores posibles de dichas letras. Una conclusión que ellos acordaron en este bloque fue que a y b no pueden representar lo mismo pues son letras diferentes. Matemáticamente hablando, letras distintas sí podrían representar la misma cantidad. No obstante, esto no fue objeto de discusión dado que era el primer acercamiento al uso de letras.

Bloque 3. Extender lo aprendido a otros casos

Los niños propusieron sus propias sentencias numéricas clasificándolas como fáciles o difíciles. Sus compañeros tuvieron el desafío de averiguar si eran verdaderas o falsas. La tabla 1 muestra algunos ejemplos representativos.

Tabla 1.
Sentencias inventadas por los niños

Fáciles		Difíciles
$a+23=23+a$	$27+b+17=12+b$	$30+40+25+c=40+25+30+c$
$309+b=390+b$	$80+b=a+40+40$	$a+342+24+2+4+=x2+3343+42+4+n+e$
$16+a=86+x$	$a+14=a+10+4$	$1234+a=10000+200+40+3+a$
$a+14=a+10+4$	$107+a=50+50+7+a$	$1235+d=1000+200+30+5+d$
$a+1+35=34+8+x$	$34+a+b=5+5$	$x+1.200+145=145+1.000+200+x$
$b+32=a+31$	$x+21=20+1+x$	
$63+a=62+a$		

Tal como se observa en la tabla 2, la diferencia entre las sentencias «fáciles» y «difíciles» tiene relación con la cantidad de sumandos involucrados, así como en el ámbito numérico empleado. Resulta interesante señalar que la mayoría de las sentencias involucra una única letra (a , b , c , d , x). Por otra parte, observamos en las respuestas de los niños propiedades de adición, tales como la conmutativa ($a + 23 = 23 + a$) y la asociativa ($107 + a = 50 + 50 + 7 + a$).

Uno de los profesores propuso la sentencia $a + 0 = a$, que involucra otra propiedad, la del elemento neutro de la adición. La mayoría de los niños indicó que la sentencia era verdadera. El siguiente diálogo se generó entre el profesor y los niños:

- P: ¿Por qué es verdadera, A_{12} ?
- A_{12} : El 0 no vale.
- P: ¿Cómo es eso?
- A_{17} : Se refiere a que el 0 no es un dígito que se pueda demostrar de una forma.
- P: Entonces, si sumo 0...
- A_{17} : No hace nada.
- P: ¿Y alguien sabe cómo se llama esa propiedad?

Aunque los niños no conocían el nombre de la propiedad, en este extracto es posible observar que no rechazan el uso de la letra y en sus argumentos se refieren al efecto de sumar cero, una propiedad sobre la que no habían discutido previamente.

Equivalencia, expresiones y ecuaciones: problemas aritméticos verbales (sesión 6)

En esta sesión buscábamos que los niños: (a) representaran situaciones cotidianas con lenguaje matemático; y (b) proporcionaran evidencias que validaran las explicaciones dadas.

Bloque 1. Búsqueda de regularidades y desarrollo de una conjetura

Los niños representaron primero el problema de los lápices y, luego, el problema de las manzanas (ver la figura 5). Cada niño tuvo la oportunidad de presentar su respuesta y compararla con la de sus compañeros. Como se observa en la figura 9, los niños identificaron las estructuras de las situaciones y la expresaron de diversas formas. La mayoría emplearon una letra para representar la cantidad desconocida involucrada en el problema. Otros niños emplearon el signo «?» o realizaron dibujos acompañados con representaciones simbólicas.

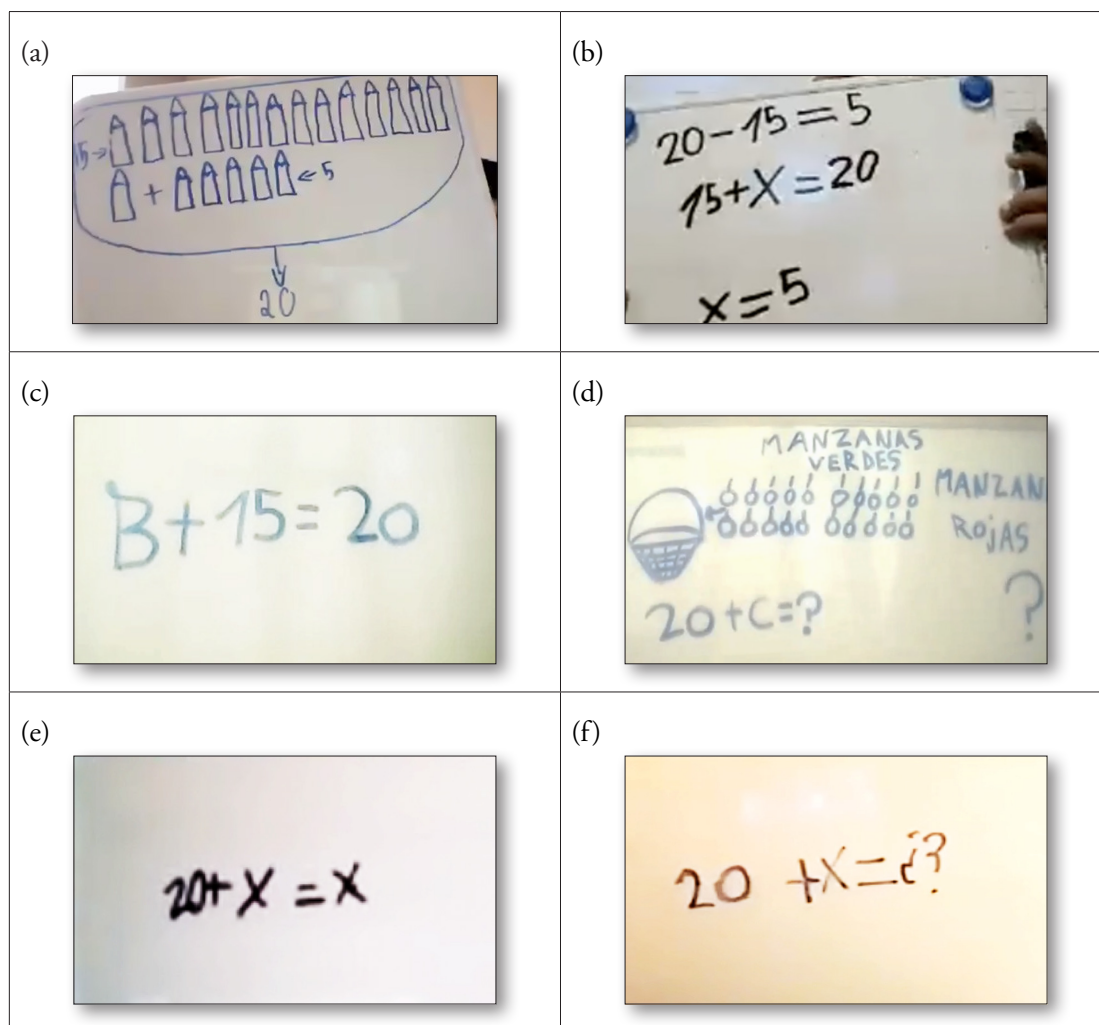


Fig. 9. Representaciones del problema de la caja de lápices en los recuadros (a), (b) y (c) y el de las manzanas, en (d), (e) y (f).

Sobre la solución de la ecuación, en el problema de los lápices los niños acordaron que la incógnita solo podía ser igual a cinco. En el caso del problema de las manzanas, al discutir sobre la solución de la ecuación en los diferentes grupos, los niños acordaron que no podrían saber cuántas manzanas había en el canasto y que, por tanto, no podían conocer el valor de las cantidades desconocidas. Así, por ejemplo, A_{12} dijo que no había suficiente información. Y A_6 dijo: «nos falta una pista. Por ejemplo, cuánto daría o cuánto fue el resultado».

Bloque 2. Articular una afirmación general a través de diferentes representaciones

Posteriormente a que los niños presentaran sus representaciones, el profesor presentó su propia representación de los problemas (ver figuras 10 y 11). Al discutir el valor de la letra x en el problema de los lápices (figura 10), A_2 indicó que x solo puede tomar el valor de 5, pues si tomara un valor diferente, el resultado cambiaría. Esto generó consenso entre los niños. Adicionalmente, una niña, A_7 , indicó que $x + 15 = 20$ era lo mismo que $15 + x = 20$, dado que los sumandos se cambian de posición, tal como indica la propiedad conmutativa.

Desafío 1

Compré una caja con lápices de colores.
Como en mi casa tenía 15 lápices, ahora tengo 20 en total.



$x + 15 = 20$

¿Cuántos lápices hay en la caja?

Fig. 10. Representación del profesor del problema de los lápices.

En lo que refiere al problema de las manzanas (ver figura 11), el desafío residió en la posibilidad de determinar el valor de T y S . Existió un acuerdo en la mayoría de los niños que no se podía determinar dado que «faltaba información». Los niños reconocieron que T , que representa el total de manzanas, podría ser cualquier letra. Lo mismo ocurrió con S .

Desafío 2

Tengo una canasta con manzanas.
En el interior de la canasta hay 20 manzanas verdes y otras rojas.



$T = 20 + S$

¿Cuántas manzanas hay en la canasta?

Fig. 11. Representación del profesor del problema de la canasta de manzanas.

Como una forma de contrastar ideas entre los niños, el profesor preguntó si la expresión $20 + c = c$ representa el problema, dado que había sido propuesta en uno de los grupos. El siguiente diálogo tuvo lugar entre el profesor y una niña, A₇.

P: ¿Esa expresión representa el problema de las manzanas?

A₇: No.

P: ¿Por qué?

A₇: Porque si ya tenemos la c , nos daría el mismo resultado que la c , no nos daría el resultado total...

P: ¿Cómo así? ¿podrías explicarlo de otra forma?

A₇: En vez de poner la c al final, debíamos colocar otra letra.

P: ¿Cómo cuál?

A₇: Como la a . Puede ser cualquier letra que queramos... como la a , la b .

El extracto anterior da cuenta de un razonamiento común entre los niños: una misma letra no puede representar dos cosas diferentes (por ejemplo, número de manzanas rojas y número de manzanas total). En síntesis, al trabajar con los dos problemas, los niños identificaron que el valor que pueden tomar las letras depende de la situación y la información que se conozca. Hay situaciones en las que las letras pueden tomar un único valor (como en el problema de los lápices), mientras que otras pueden representar cualquier valor (como en el problema de las manzanas).

Bloque 3. Extender lo aprendido a otros casos

En este bloque se realizó el proceso inverso, los niños inventaron una historia matemática relacionada con la ecuación $25 + u = 45$. Les dimos algunos minutos para que escribieran su problema, y luego los compartieron entre ellos y evaluaron su pertinencia. Algunos de los problemas más comunes fueron los siguientes:

- Tengo 45 lápices y 25 son de color rojo y *otros* son de color amarillo.
- Yo tengo 25 marcadores. Compré una caja y ahora tengo 45 en total. ¿Cuántos plumones tengo en la caja?
- Hay 45 personas durmiendo; 25 en camas y *algunos* en sillas.
- Sofía tiene 25 libros y Marta tiene 20 libros. ¿Cuántos libros hay en total?

La mayoría de los niños crearon historias matemáticas coherentes con la estructura mostrada de la ecuación dada. Además, interpretaron la letra u como una cantidad indeterminada. Por ejemplo, en el primer problema, lo indeterminado hace referencia a *otros*, mientras que, en el tercero, se hace referencia a *algunos*.

Pensamiento funcional: el problema de las mesas y las personas (sesión 9)

El propósito de esta sesión fue: (a) expresar con notación algebraica la regla que relaciona la variable independiente con la dependiente; y (b) desarrollar una justificación de por qué la regla funcional representa con precisión la situación del problema.

Bloque 1. Búsqueda de regularidades y desarrollo de una conjetura

Los niños resolvieron la segunda parte del problema de mesas y personas, en el cual la función involucrada es $y = 2x + 2$ (ver figura 8). La figura 12 muestra algunas de las respuestas de los niños, las cuales consideramos representativas del grupo.

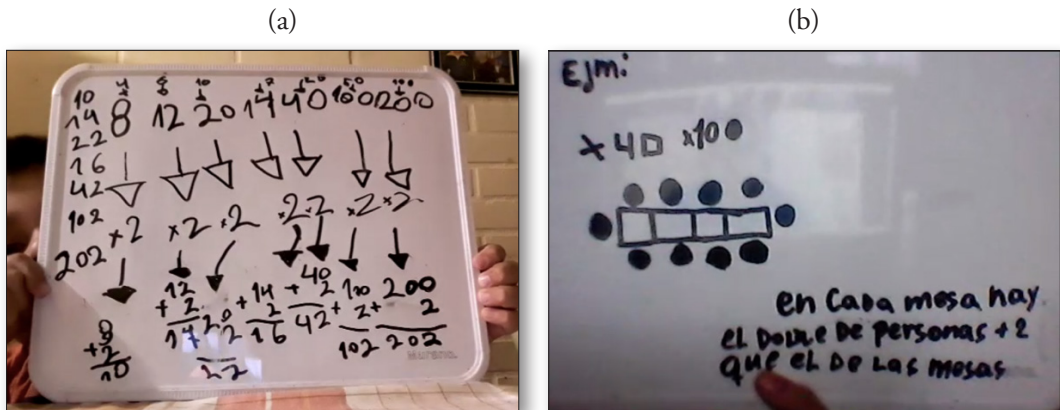


Fig. 12. Regularidades encontradas por los niños.

La mayoría de los niños encontraron regularidades haciendo referencia a los cálculos realizados (figura 12, en a), mientras que otros notaron las regularidades al analizar la configuración visual de las mesas y personas (figura 12, en b). Luego cada profesor introdujo la tabla para organizar la información y afinar las conjeturas que fueron encontrando. La figura 13 muestra la respuesta de uno de los grupos pequeños.

Nombre: _____

Número de mesas	Número de personas
11	24
17	36
36	74
	100
500	
	1.000
10.000	
n	$2n+2$
$x-2$	x

Fig. 13. Regularidades al organizar los datos en una tabla.

La discusión favoreció compartir las diferentes estrategias empleadas por los niños al completar la tabla. La tabla suponía abordar las relaciones para números específicos y cantidades indeterminadas mediante el uso de la letra. Además, favoreció el establecimiento de relaciones directas (dado el valor de la variable independiente, calcular el valor de la variable dependiente) e indirectas (dado el valor de la variable dependiente, calcular el valor de la variable independiente).

Bloque 2. Articular una afirmación general a través de diferentes representaciones

Al analizar y discutir las conjeturas que encontraron los niños sobre la relación entre el número de mesas y el número de personas a través de diferentes representaciones expresadas en sus pizarras (dibujos, cálculos, escritura), ellos identificaron que hay una parte que siempre se mantiene constante: las personas de los extremos. Además, identificaron que el número de personas dependía del número de mesas. Para profundizar en estas ideas, centramos la atención en las regularidades involucradas en el cálculo aritmético. Comenzamos por identificar las regularidades en los cálculos que permiten identificar la cantidad de personas para 5 y 8 mesas. La figura 14 da cuenta del análisis realizado con los niños.

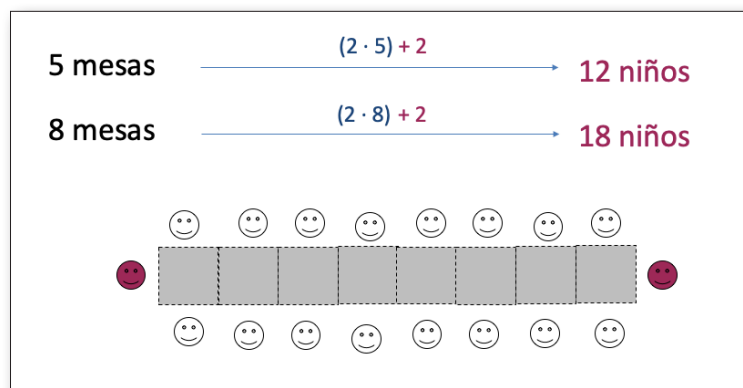


Fig. 14. Regularidades en el cálculo.

A las regularidades ya percibidas por los niños fuimos conectando sus hallazgos con las expresiones numéricas que permiten encontrar la cantidad de personas dado un número determinado de mesas: $2 \times \text{número de mesas} + 2$. Los niños fueron explicando el sentido de multiplicar por dos y sumar 2. De modo similar a como lo hacían en las sesiones sobre ecuaciones, se motivó a los niños a pensar si las expresiones contaban la historia del problema. Luego avanzamos con otros números para comprobar si esta regla funcionaba en otros casos hasta llegar al uso de la letra. Para ello, les pedimos que representaran con una letra la regla que relaciona el número de mesas y el número de personas. La figura 15 da cuenta de algunas de las diferentes producciones de los niños.

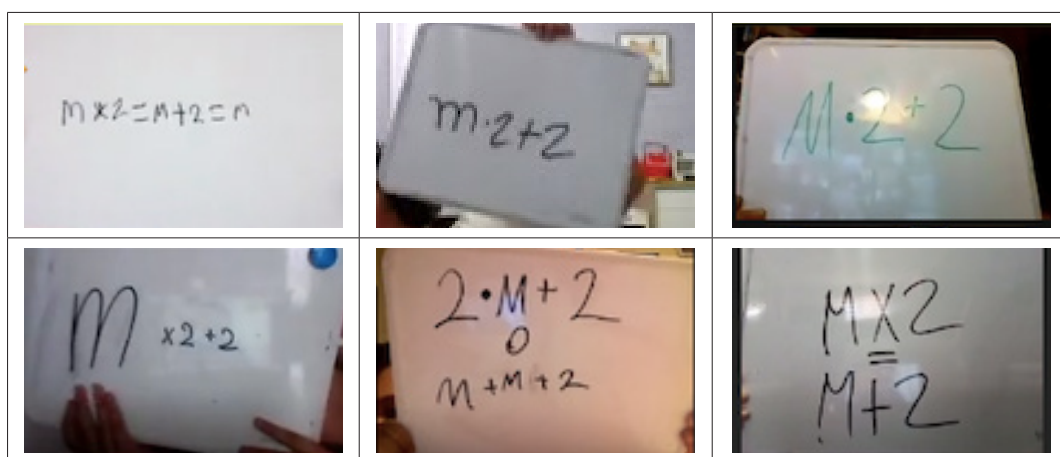
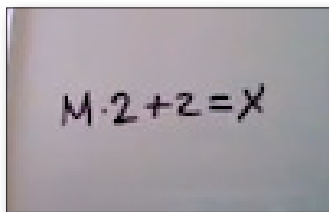


Fig. 15. Reglas de los niños empleando notación algebraica.

Las reglas encontradas por los niños les permitieron comprobar las respuestas que dieron al inicio de la clase. Esto favoreció que fueran precisando una regla que les ayude a encontrar la cantidad de personas (x) dada cualquier cantidad de mesas (m), tal como se muestra en la figura 16.



$$M \cdot 2 + 2 = X$$

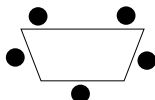
Fig. 16. Reglas que permiten encontrar el número de personas para cualquier cantidad de personas.

Bloque 3. Extender lo aprendido a otros casos

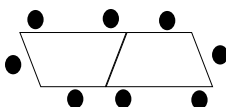
A los niños les presentamos un nuevo problema, que involucraba la función $y = 3x + 2$ y fue respondido individualmente para, luego, compartir los hallazgos. En la figura 17 presentamos el problema.

Javiera celebrará su cumpleaños. Ella ha conseguido algunas mesas y ha decidido sentar a sus amigos de la siguiente forma:

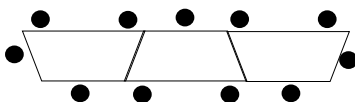
Si tiene 1 mesa, 5 niños podrían sentarse:



Si tiene 2 mesas, 8 niños podrían sentarse:



Si tiene 3 mesas, 11 niños podrían sentarse:



- ¿Cuántas personas se sentarán en 5, 10, 60 y 100 mesas?
- ¿Cuál será la regla que relaciona cualquier número de mesas y el número de personas?

Fig. 17. Problema de las mesas de Javiera.

El problema de las mesas de Javiera (ver figura 17) involucra las mismas variables tratadas en los problemas anteriores, a excepción de la disposición geométrica de las mesas y las personas. A través de este problema pretendíamos que los niños extendieran las regularidades encontradas en los problemas anteriores (relaciones entre las variables), con la finalidad de expresar reglas usando notación algebraica. Inicialmente, la discusión se centró en explorar las regularidades dadas en los dibujos de las mesas y personas. Muy pocos niños encontraron regularidades. Por ejemplo, A_{15} indicó que «en las mesas siempre hay dos personas frente a una». Otro niño, A_3 , indicó que «la regularidad es un patrón de 3, ya que va de 3 en 3. O sea, en cada mesa se agrega de 3 en 3». Esta regla ayudó a los niños a visualizar y comprobar, mediante diferentes casos particulares, las regularidades encontradas en el problema.

Luego se les pidió a los niños que explicaran cuál era la regla que relacionaba el número de mesas y personas usando letras. Un niño, A_8 , escribió en su pizarra la regla que había encontrado, tal como se muestra en la figura 18.

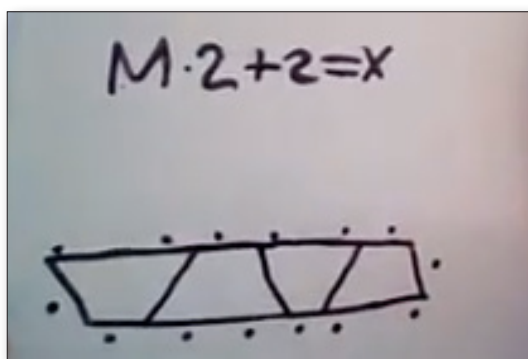


Fig. 18. Respuesta de A_8 .

A partir de la respuesta de A_8 , el resto del grupo analizó la expresión y mostró su desacuerdo en que esa fuera la regla, pues «al probar con otros números, no da». Ante esta respuesta, se produce el siguiente diálogo entre el profesor y los niños.

P: A ver, pero ¿cuál sería la regla que relaciona el número de mesas con el número de personas?

A_3 : Yo antes multiplicaba por dos y sumaba dos. Ahora hay que multiplicar por 3 y sumar 2

P: ¿Por qué?

A_3 : Por ejemplo, probé con cuatro mesas. Lo comprobé en el dibujo. Multiplico tres por cuatro y le sumo dos. Y me da catorce.

P: ¿Estás pensando en esto, A_3 ? (ver figura 19)

A_3 : Sí.

P: Vale. ¿Y qué tal si todos probamos esta regla con 5 mesas?

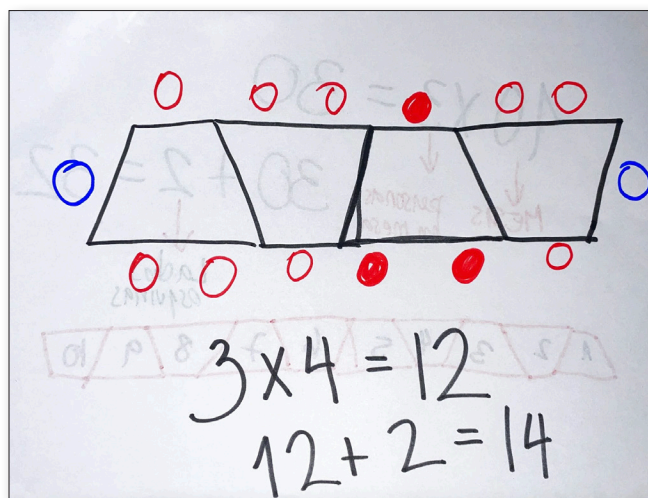


Fig. 19. Respuesta de A_3 escrita por profesor.

La regularidad anterior, basada en la representación pictórica, favoreció que los niños dieran sentido a las operaciones aritméticas involucradas en la situación (multiplicar por tres y sumar dos).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este artículo describimos el diseño y desarrollo de una escuela de verano en la cual niños de 9 a 10 años expresaron y justificaron ideas matemáticas generales al trabajar con diferentes contenidos algebraicos.

Los actuales currículos de Matemática promueven que los docentes creen instancias de discusión e intercambio de ideas (por ejemplo, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2022), que, según diversas investigaciones (Ayala-Altamirano y Molina, 2021; Blanton et al., 2011; Carpenter et al., 2003; Russell et al., 2017; Simon y Blume, 1996; Thanheiser y Sugimoto, 2022), son claves para la adquisición del conocimiento matemático y para generar oportunidades que involucren a todos los niños. Además, existe el reto de tratar desde temprana edad el álgebra, pero desde una perspectiva que vaya más allá de abordar primero la aritmética para luego avanzar hacia el álgebra. En este trabajo, siguiendo la propuesta del *early algebra*, se busca «algebrizar» las matemáticas elementales, lo que implica potenciar el currículum tradicional y crear hábitos de pensamiento que atiendan a la estructura matemática (Kaput, 2008). En concreto, la contribución de este trabajo es evidenciar cómo situaciones aritméticas cotidianas (por ejemplo, la descripción de las propiedades de las operaciones aritméticas o la resolución de problemas aritméticos) permiten a los niños dialogar sobre saberes algebraicos.

La implementación de la propuesta muestra que los niños participantes, sin importar el enfoque del álgebra que se tratara, evidenciaron que manejaban un pensamiento algebraico cuando se referían a cantidades indeterminadas (números generalizados, incógnitas o variables), y trataban dichas cantidades de forma analítica (Radford, 2018). También razonaron sobre la generalidad y percibieron una estructura algebraica a partir del estudio de relaciones en las operaciones (Kieran, 2004). Esto se evidenció en las distintas sentencias propuestas para representar las propiedades aritméticas, en las ecuaciones propuestas para representar los problemas o en la expresión de la regla funcional.

Es importante destacar que lo anterior se logró paulatinamente. En un inicio, se centraban en el cálculo y buscaban una respuesta numérica y única. Algunas intervenciones docentes que conjeturamos que ayudaron a este cambio son:

- a) Animarles a evitar los cálculos.
- b) Pedirles que contaran historias matemáticas para sentencias numéricas, sin calcular. Se buscaba que atendieran a la estructura de las sentencias y desde ahí establecer conclusiones.
- c) Hablar de cantidades indeterminadas paulatinamente y con distintos significados: presentándola como un número cualquiera en las sentencias numéricas (aritmética generalizada) o un dato desconocido o incógnito del problema (ecuaciones) o una cantidad que puede variar (funciones).
- d) Permitir que las cantidades desconocidas se representaran de distintos modos.

También los resultados muestran que la organización de cada sesión en torno a tres bloques (búsqueda de regularidades y desarrollo de una conjetura; articular una afirmación general a través de diferentes representaciones; y extender lo aprendido a otros casos) permitió que los niños percibieran lo general y se refirieran a cantidades indeterminadas expresando sus argumentos e ideas matemáticas de maneras cada vez más sofisticadas. Más allá del contenido matemático involucrado, los tres momentos de discusión se convirtieron en espacios para cooperar, confrontar y discutir ideas matemáticas, lo que favoreció «cultivar hábitos de pensamiento que atiendan a la estructura que subyace a las matemáticas» (Molina, 2009, p. 136). Lo anterior también se vio favorecido porque los argumentos se construyeron a partir de los conocimientos compartidos por los niños (Simon y Blume, 1996), lo que permitió generar un espacio para expresar las ideas y comparar las representaciones con distintos grados de sofisticación, considerándolas todas válidas y dando oportunidades para que todos los niños participaran, no solo aquellos más avanzados. Si bien no todos los niños emplearon el simbolismo algebraico, la adopción de este lenguaje fue progresiva. El diseño instruccional recogió los conocimientos previos de los niños, se incorporó progresivamente un vocabulario específico (nombre de las propiedades de las operaciones, por ejemplo) y se fomentó el uso de variadas representaciones (concretas, pictóricas y simbólicas).

Consideramos que la propuesta es adecuada y está alineada con los planes de estudios de distintos países. La implementación de los tres enfoques de contenido gracias al aprovechamiento del conocimiento aritmético no implica más tiempo, más bien sugerimos una reestructuración del diseño de aula. Con respecto a los tres bloques de discusión, sostenemos que es posible transferir este diseño a otros temas de las matemáticas escolares, dado que la interacción con ideas generales constituye el corazón del pensamiento matemático (Mason, 1996). Incluso es transferible a otras áreas de conocimiento.

Concluimos y destacamos, tal como lo señalan otros autores (por ejemplo, Carraher y Schliemann, 2007), la importancia de centrar la atención más allá de los cálculos. En el aula de Matemática es necesario generar espacios para que los niños interactúen con cantidades cada vez más abstractas, lo que permitirá que estos adapten, ajusten y reorganicen un conjunto de experiencias matemáticas previas; entiendan por qué existen determinadas relaciones matemáticas y que piensen y aprendan matemática por y para ellos mismos, entre otras ideas (Carpenter y Levi, 2000; Carraher y Schliemann, 2015; Russell, Schifter et al., 2017).

Si bien investigaciones previas han abordado formas de abordar la enseñanza del álgebra o la introducción de competencias matemáticas como la modelización (Trelles, Toalongo y Alsina, 2022; Cetina-Vásquez y Cabañas-Sánchez, 2022), la originalidad de nuestro estudio tiene relación con que el diseño y desarrollo de la escuela abordó de forma integrada contenidos algebraicos relativos a enfoques diferentes del álgebra y a la aritmética.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a los niños, a sus padres y a los profesores involucrados en la escuela.

Esta investigación se enmarca en un proyecto financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) de Chile a través del proyecto FONDECYT INICIACIÓN 11220843. Asimismo, este trabajo se ha realizado en el proyecto con referencia PID2020-113601GB-I00, financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) de España.

REFERENCIAS

- Ayala-Altamirano, C. y Molina, M. (2021). Fourth-graders' justifications in early algebra tasks involving a functional relationship. *Educational Studies in Mathematics*, 107(2), 359-382.
<https://doi.org/10.1007/s10649-021-10036-1>
- Ayala-Altamirano, C., Pinto, E., Molina, M. y Cañadas, M. C. (2022). Interacting with indeterminate quantities through arithmetic word problems: Tasks to promote algebraic thinking at elementary school. *Mathematics* 10(1), 2229.
<https://doi.org/10.3390/math10132229>
- Blanton, M. (2008). *Algebra and the elementary classroom: Transforming thinking, transforming practice*. Heinemann.
- Blanton, M. L., Levi, L., Crites, T. y Dougherty, B. J. (2011). *Developing essential understanding of algebraic thinking for teaching mathematics in grades 3-5*. NCTM.
- Blanton, M., Brizuela, B., Stephens, A., Knuth, E., Isler, I., Gardiner, A., Stroud, R., Fonger, N. y Stylianou, D. (2018). Implementing a framework for early algebra. En C. Kieran (ed.), *Teaching and learning algebraic thinking with 5- to 12-year-olds: The global evolution of an emerging field of research and practice* (pp. 27-49). Springer.
- Blanton, M., Gardiner, A. M., Ristorph, I., Stephens, A., Knuth, E. y Stroud, R. (2022). Progressions in young learners' understandings of parity arguments. *Mathematical Thinking and Learning*, 1-32.
<https://doi.org/10.1080/10986065.2022.2053775>
- Cañadas, M. C. y Castro, E. (2007). A proposal of categorisation for analysing inductive reasoning. *PNA*, 1(2), 67-78.
<https://doi.org/10.30827/pna.v1i2.6213>
- Cañadas, M. C. y Molina, M. (2016). Una aproximación al marco conceptual y principales antecedentes del pensamiento funcional en las primeras edades. En E. Castro, E. Castro, J. L. Lupiáñez, J. F. Ruíz-Hidalgo y M. Torralbo (eds.), *Investigación en Educación Matemática. Homenaje a Luis Rico* (pp. 209-218). Comares.
- Carpenter, T. P., Franke, M. L. y Levi, L. (2003). *Thinking mathematically: Integrating arithmetic and algebra in elementary school*. Heinemann.
- Carpenter, T. y Levi, L. (2000). *Developing conceptions of algebraic reasoning in the primary grades* (Research report No. 00-2). National Center for Improving student Learning and Achievement in Mathematics and Science.
- Carraher, D. W. y Schliemann, A. D. (2007). Early algebra and algebraic reasoning. En F. K. Lester (ed.), *Second handbook of research on mathematics teaching and learning* (pp. 669-705). NCTM.
- Cetina-Vázquez, M. y Cabañas-Sánchez, G. (2022). Estrategias de generalización de patrones y sus diferentes formas de uso en quinto grado. *Enseñanza de las Ciencias*, 40(1), 65-86.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3096>

- Embid, S. (2022). *Una mirada a los números pares, impares e igualdades numéricas: ¿Cómo justifican generalizaciones los niños de 9-10 años según su pensamiento algebraico?* (trabajo de fin de máster). Universidad de Granada.
- Ingram, J., Andrews, N. y Pitt, A. (2019). When students offer explanations without the teacher explicitly asking them to. *Educational Studies in Mathematics*, 101(1), 51-66.
<https://doi.org/10.1007/s10649-018-9873-9>
- Janßen, T. y Radford, L. (2015). Solving equations: Gestures, (un)allowable hints, and the unsayable matter. En K. Krainer y N. Vvondrová (eds.), *Proceedings on the Ninth Congress of the European Society for Research in Mathematics Education* (pp. 419- 425). Charles University.
- Kaput, J. J. (2008). What is algebra? What is the algebraic reasoning? En J. J. Kaput, D. W. Carraher y M. L. Blanton (eds.), *Algebra in the early grades* (pp. 5-17). Lawrence Erlbaum Associates.
- Kieran, C. (2004). Algebraic thinking in the early grades: What is it? *The Mathematics Educator*, 8(1), 139-151.
- Kieran, C. (2022). The multi-dimensionality of early algebraic thinking: background, overarching dimensions, and new directions. *ZDM – Mathematics Education*, 1-20.
<https://doi.org/10.1007/S11858-022-01435-6>
- Lannin, J., Ellis, A. B. y Elliot, R. (2011). *Developing essential understanding of mathematical reasoning*. NCTM.
- Mason, J. (1996). Expressing generality and roots of algebra. En N. Bernarz, C. Kieran y L. Lee (eds.), *Approaches to algebra: Perspectives for research and teaching* (pp. 65-86). Springer.
- Mason, J. (2017). Overcoming the algebra barrier: Being particular about the general, and generally looking beyond the particular, in homage to Mary Boole. En S. Stewart (ed.), *And the rest is just algebra* (pp. 97-117). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-45053-7_6
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. (2022). *Real Decreto 157/2022 de 01 de marzo, por el que se establece la ordenación y enseñanzas mínimas de la Educación Primaria*. BOE, 52, 24386–24504.
- Molina, M. (2009). Una propuesta de cambio curricular: integración del pensamiento algebraico en Educación Primaria. *PNA*, 3(3), 135-156.
<https://doi.org/10.30827/pna.v3i3.6186>
- Morales, R., Cañadas, M. C., Brizuela, B. M. y Gómez, P. (2018). Relaciones funcionales y estrategias de alumnos de primero de educación primaria en un contexto funcional. *Enseñanza de las Ciencias*, 36(3), 59-78.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.2472>
- Morgan, C., Craig, T., Schuettte, M. y Wagner, D. (2014). Language and communication in mathematics education: An overview of reserarch in the field. *ZDM – Mathematics Education*, 46(6), 843-853.
<https://doi.org/10.1007/s11858-014-0624-9>
- Pincheira, N. y Alsina, Á. (2021). Hacia una caracterización del álgebra temprana a partir del análisis de los currículos contemporáneos de Educación Infantil y Primaria. *Educación Matemática*, 33(1), 153-180.
<https://doi.org/10.24844/em3301.06>
- Pinto, E. y Ayala-Altamirano, C. (2021). Álgebra más allá de letras y números: Oportunidades para desarrollar el pensamiento algebraico en la educación primaria. *Tangram – Revista de Educação Matemática*, 4(4), 35-48.
- Pinto, E. y Cañadas, M. C. (2021). Generalizations of third and fifth graders within a functional approach to early algebra. *Mathematics Education Research Journal*, 33(1), 113-134.
<https://doi.org/10.1007/s13394-019-00300-2>

- Radford, L. (2018). The emergence of symbolic algebraic thinking in primary school. En C. Kieran (ed.), *Teaching and learning algebraic thinking with 5 - 12 year- olds. ICME 13 Monographs* (pp. 3-25). Springer.
- Radford, L. (2021). O ensino-aprendizagem da álgebra na teoria da objetivação. En V. Moretti y L. Radford (eds.), *Pensamento algébrico nos anos iniciais: Diálogos e complementaridades entre a teoria da objetivação e a teoria histórico-cultural* (pp. 171-195). Livraria da Física.
- Russell, J., Schifter, D. y Bastable, V. (2017). *Connecting arithmetic to algebra. Strategies for building algebraic thinking in the elementary grades*. Heinemann.
- Simon, M. A. y Blume, G. W. (1996). Justification in the mathematics classroom: A study of prospective elementary teachers. *Journal of Mathematical Behavior*, 15(1), 3-31.
- Stephens, A. C., Ellis, A. B., Blanton, M. L. y Brizuela, B. M. (2017). Algebraic thinking in the elementary and middle grades. En J. Cai (ed.), *Compendium for research in mathematics education* (pp. 386-420). NCTM.
- Thanheiser, E. y Sugimoto, A. (2022). Justification in the context of elementary grades: Justification to develop and provide access to mathematical reasoning. En K. Bieda, A.M. Conner, K.W. Kosko y M. Staples (eds.), *Conceptions and consequences of mathematical argumentation, justification, and proof* (pp. 35-48). Springer.
- Trelles, C., Toalongo, X. y Alsina, Á. (2022). Una actividad de modelización matemática en primaria con datos auténticos de la COVID-19. *Enseñanza de las Ciencias*, 40(2), 193-213.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3472>

Development of Algebraic Thinking Through Justification in Elementary Education

Eder Pinto

Universidad de O'Higgins, Instituto de Ciencias de la Educación, Rancagua, Chile
eder.pinto@uoh.cl

Cristina Ayala-Altamirano

Universidad de Málaga, departamento de Didáctica de la Matemática, Ciencias Sociales y Ciencias Experimentales, Málaga, España
cristina.ayala@uma.es

Marta Molina

Universidad de Salamanca, departamento de Didáctica de las Matemáticas y de las Ciencias Experimentales, Ávila, España
martamolina@usal.es

María C. Cañadas

Universidad de Granada, departamento de Didáctica de la Matemática, Facultad de Ciencias de la Educación, Granada, España
mconsu@ugr.es

The interest in algebraic thinking in the first years of elementary education (6-12 years old) is an aspect of growing interest in the research agenda in mathematics education and in the Mathematics curriculums of different countries. Despite the multiple efforts to introduce this type of mathematical thinking in primary classrooms, there are still challenges regarding how to incorporate it in these educational grades.

In this paper, we present the instructional design of an activity that we developed in summer and whose purpose was to promote algebraic thinking among elementary school children: the *Summer School*. Specifically, the *Summer School* sought to develop algebraic thinking in children through the expression and justification of general mathematical ideas, in the context of school algebra.

The conceptual framework adopted in this proposal considers that algebraic thinking is organized around four core practices: *a*) generalize; *b*) represent; *c*) justify; and *d*) reason with mathematical structures and relationships. These four core practices must be present in the algebraic activity, regardless of the school algebra approach that is considered: *a*) generalized arithmetic; *b*) equivalence, expressions, equations, and inequalities; and *c*) functions. Specifically, we are interested in how children express their algebraic ideas using different types of mathematical representations (pictures, words, symbols, tables) and the way in which they construct arguments allowing them to determine and explain the truth of a conjecture or statement.

Twenty-one Chilean children from 9-10 years old, from low-income educational schools, participated in the summer school for two weeks. The activity was implemented online, given the health contingency caused by COVID-19, and we organized it in 10 sessions. The usual teachers of the children participated in the design and implementation of the summer school together with teacher-researchers from Chile and Spain.

In sessions 1 and 10 we applied an assessment, and the remaining sessions (2 to 9) were organized around the different approaches to school algebra. In general, through these sessions we wanted the children to express and justify their mathematical ideas in increasingly sophisticated ways. Thus, we organize each session into three blocks: *a*) search for regularities and development of a conjecture, in which we divide the children into small groups; *b*) articulate a general affirmation through different representations, carried out with the whole group; and *c*) extend what was learned to other cases, which involved working with a small group of students. This model made it possible to provide different spaces for cooperation, confrontation and discussion of algebraic ideas.

The main results show how children interact with general mathematical ideas through different mathematical representations (drawings, words, numbers, tables and symbols). In addition, these representations allow them to build increasingly sophisticated arguments when interacting with different content. For example, children can understand the different meanings of the equal sign through different number relationships involving different properties of arithmetic operations, or the search for different regularities between covarying quantities.

The contribution of this work is to show how everyday arithmetic situations (e.g., description of the properties of arithmetic operations or solving arithmetic problems) allow children to discuss algebraic knowledge. This does not take more time out of class, but we rather suggest a restructuring of the classroom design. Additionally, the instructional design of this *Summer School* allowed children to perceive the general and refer to indeterminate quantities, expressing their arguments and mathematical ideas in increasingly sophisticated ways. This can be extrapolated to other topics of school mathematics, given that the interaction with general ideas constitutes the heart of mathematical thought.

