

## **Aprendiendo evolución a través de cuestiones sociocientíficas**

Sá-Pinto, Xana; Beniermann , Anna ; Børsen, Tom; Georgiou, Martha; Jeffries, Alex; Pessoa, Patricia; Sousa, Bruno; Zeidler, Dana L.

*Creative Commons License*  
CC BY 4.0

*Publication date:*  
2025

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Sá-Pinto, X., Beniermann , A., Børsen, T., Georgiou, M., Jeffries, A., Pessoa, P., Sousa, B., & Zeidler, D. L. (2025). *Aprendiendo evolución a través de cuestiones sociocientíficas*. (1 ed.) University of Aveiro.

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Aprendiendo evolución a través de cuestiones sociocientíficas



Xana Sá-Pinto, Anna Beniermann,  
Tom Børsen, Martha Georgiou,  
Alex Jeffries, Patrícia Pessoa,  
Bruno Sousa, Dana L. Zeidler.

**TÍTULO:** Aprendiendo evolución a través de cuestiones sociocientíficas

**EDITORES/AS:** Xana Sá-Pinto, Anna Beniermann, Tom Børsen, Martha Georgiou, Alex Jeffries, Patrícia Pessoa, Bruno Sousa, Dana L. Zeidler

**DIRECCIÓN Y COORDINACIÓN ARTÍSTICA:** Roberto Torres, La Ciència AITeu Món

**DISEÑO Y MAQUETACIÓN:** Albert Travel

**EDITORIAL:** Universidade de Aveiro

1ª edición - 2025

**DOI:**

El contenido que se presenta en esta publicación es de responsabilidad exclusiva de sus respectivos autores/as.

© Autores/as. Esta obra está bajo la Licencia Internacional Creative Commons 4.0.

Esta publicación se basa en el trabajo derivado de la COST Action CA17127. Building on scientific literacy in evolution towards scientifically responsible Europeans (EuroScitizen), financiada por COST (European Cooperation in Science and Technology).

COST (European Cooperation in Science and Technology) es una agencia de financiación de redes de investigación e innovación. Nuestras Actions ayudan a conectar iniciativas de investigación en toda Europa y permiten a científicos y científicas hacer crecer sus ideas compartiéndolas con otros compañeros y compañeras. Esto impulsa su investigación, su carrera y su innovación.

[www.cost.eu](http://www.cost.eu)

# CONTENTS

1.	<b>APRENDIENDO EVOLUCIÓN A TRAVÉS DE CUESTIONES SOCIOCIENTÍFICAS: UNA PERSPECTIVA DE ALFABETIZACIÓN CIENTÍFICA FUNCIONAL</b>	4
2.	<b>USO DE CUESTIONES SOCIOCIENTÍFICAS PARA FOMENTAR LA ALFABETIZACIÓN CIENTÍFICA DEL ALUMNADO</b>	17
3.	<b>ENSEÑANZA DE LA EVOLUCIÓN A TRAVÉS DE CUESTIONES SOCIOCIENTÍFICAS PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE</b>	29
4.	<b>ENFOQUE CSC FUERA DE LAS ESCUELAS: ¿CÓMO PUEDEN UTILIZARSE ESTOS ENFOQUES EN LOS MUSEOS DE CIENCIA Y OTROS CONTEXTOS EDUCATIVOS NO FORMALES?</b>	48
5.	<b>¿QUÉ IMPACTO TIENE LA EVOLUCIÓN EN NUESTRAS VIDAS?</b>	71
6.	<b>EDUCACIÓN SOBRE EVOLUCIÓN Y DIVULGACIÓN: COSAS IMPORTANTES QUE DEBE SABER SOBRE CÓMO ENSEÑAR EVOLUCIÓN BIOLÓGICA</b>	86
7.	<b>OPORTUNIDADES PARA ABORDAR LA EVOLUCIÓN HUMANA</b>	105
8.	<b>EVOLUCIÓN DE LA COOPERACIÓN Y LA SOSTENIBILIDAD DE LOS RECURSOS DE PROPIEDAD COMÚN</b>	127
9.	<b>CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN COMO UNA CUESTIÓN SOCIOCIENTÍFICA: UNA ACTIVIDAD PARA LA EDUCACIÓN SUPERIOR</b>	148
10.	<b>¿POR QUÉ ESTÁN DISMINUYENDO LOS POLINIZADORES? EQUILIBRIO ENTRE LA SALUD DE LOS POLINIZADORES Y EL MARGEN DE BENEFICIOS DE LAS PARTES INTERESADAS</b>	165
11.	<b>LOS IMPACTOS DE LA RADIACIÓN SOLAR EN NUESTRA SALUD</b>	182
12.	<b>¿SE NOS PERMITE JUGAR CON EL ADN (HUMANO)? ABORDANDO LAS CUESTIONES SOCIOCIENTÍFICAS A TRAVÉS DEL DIÁLOGO FILOSÓFICO - EL CASO DE LA INGENIERÍA GENÉTICA</b>	197



## Editorial

# Aprendiendo evolución a través de cuestiones sociocientíficas: Una perspectiva de alfabetización científica funcional



# Aprendiendo evolución a través de cuestiones sociocientíficas: una perspectiva de alfabetización científica funcional

**Dana L. Zeidler<sup>1</sup>,  
Anna Beniermann<sup>2</sup>,  
Tom Børsen<sup>3</sup>,  
Martha Georgiou<sup>4</sup>,  
Alex Jeffries<sup>5</sup>,  
Patrícia Pessoa<sup>6,7</sup>,  
Xana Sá-Pinto<sup>6</sup>,  
Bruno Sousa<sup>8</sup>**

<sup>1</sup>University of South Florida, United States

<sup>2</sup>Humboldt-Universität zu Berlin, Germany

<sup>3</sup>Aalborg University, Denmark

<sup>4</sup>National and Kapodistrian University of Athens, Greece

<sup>5</sup>Milner Center for Evolution, Department of Life Sciences,  
University of Bath, UK

<sup>6</sup>CIDTFF – Research Centre on Didactics and Technology in the  
Education of Trainers, University of Aveiro, Portugal

<sup>7</sup>UTAD – University of Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal

<sup>8</sup>Alpoente School Grouping, Portugal

La teoría de la evolución es probablemente uno de los marcos conceptuales y teóricos unificadores de las ciencias naturales más importantes (National Research Council, 2012). Es el caso modelo de un conjunto interrelacionado de observaciones, inferencias, predicciones y reconstrucciones retrospectivas que tienen un poder explicativo para dar sentido al mundo viviente. Sin embargo, se ha demostrado que la comprensión de la evolución es baja en muchos países, incluso para los estudiantes universitarios en carreras con estudios relacionados con la biología (Kuschmierz et al., 2021).

La comprensión científica, y en particular de la evolución, no está limitada por fronteras geopolíticas, pero puede verse afectada por ellas, ya que la comprensión de la ciencia está influenciada tanto positiva como negativamente por un conjunto de consideraciones socioculturales. En ocasiones, estas consideraciones pueden implicar malentendidos o engaños, como transformar las pruebas científicas para que sirvan a propósitos religiosos o políticos (Jørgensen et al., 2019).

La comprensión pública de la ciencia en general, o la teoría de la evolución en particular, debe ser examinada por las comunidades científicas y educativas y se debe tener en cuenta la eficacia de las propias prácticas educativas. Al hacerlo, podríamos descubrir una ironía pedagógica: que algunas de nuestras costumbres educativas más arraigadas obstaculizan la comprensión de los estudiantes (Zeidler et al., 2011).

Es importante destacar desde el principio que, aunque enmarquemos el aprendizaje de la evolución a través de la lente de las controversias o cuestiones sociocientíficas (CSC, del inglés “socioscientific issues” o SSI, por sus siglas en inglés) (Zeidler, 2014; Zeidler y Sadler, 2023), no consideramos la evolución en sí misma una CSC. Las CSC son problemas y dilemas de naturaleza controvertida, sin soluciones inmediatas claras, que requieren

consideraciones basadas en pruebas y están marcados por implicaciones morales y éticas (Zeidler y Sadler, 2023). La teoría de la evolución carece de estas características definitorias. Que la evolución haya ocurrido y continúe transformando el mundo orgánico a través de procesos macro y micro no es, en sí mismo, controvertido en la comunidad científica. Sin embargo, dado que es controvertido en algunas partes de la sociedad, puede clasificarse como una Ciencia Socialmente Negada (Borgerding y Dagistan, 2018) y un Problema Científico Controvertido (Benierrmann et al., 2021).

Si bien ciertas explicaciones pueden ser desafiadas y modificadas cuando surgen nuevas pruebas a través de descubrimientos y avances tecnológicos (por ejemplo, el gradualismo frente al equilibrio puntuado), esto no sorprende en gran medida a aquellos con puntos de vista informados sobre la Naturaleza de la Ciencia (NdC), porque la propia naturaleza del conocimiento científico se caracteriza por ser un conocimiento duradero, pero sujeto a cambios, social y culturalmente arraigado, necesariamente subjetivo, temperado por la creatividad humana, empírico y guiado por el poder explicativo (Abd-El-Khalick y Lederman, 2023; Lederman y Lederman, 2014).

Una vez que salimos del ámbito académico y abordamos cómo enseñamos conceptos relacionados con la teoría de la evolución a estudiantes en entornos escolares, el contenido puede volverse más controvertido debido a que nos encontramos con diferentes suposiciones culturales, creencias religiosas y normas éticas. Está ampliamente reconocido que comprender la evolución es crucial para encontrar soluciones a los diversos desafíos que enfrentamos hoy en día (Carroll et al., 2014).

Además, este conocimiento tiene impactos en varias áreas. En la conservación de la biodiversidad, por ejemplo, podemos hablar sobre la mala adaptación de las especies al cambio climático y la contaminación, lo que provoca una reducción de la biodiversidad por

la extinción de especies (Barnosky et al., 2011). En la salud humana, se presentan problemas derivados de cambios en nuestra dieta, entorno y estilo de vida (como la obesidad, la diabetes, el cáncer, etc.), o, en el caso de las enfermedades, la evolución de patógenos nuevos o resistentes a los medicamentos (como las enfermedades infecciosas) (Organización Mundial de la Salud, 2014).

Si nos enfocamos en la seguridad alimentaria, podemos mencionar el aumento en la resistencia a los pesticidas que ha estado causando una disminución en la producción agrícola, comprometiendo el suministro de alimentos en todo el mundo (Tabashnik et al., 2014). Todos los ejemplos mencionados anteriormente están relacionados con procesos evolutivos, y una mayor aplicación de los principios de la biología evolutiva a desafíos como estos puede mejorar nuestra capacidad para responder a muchos de los problemas relacionados con la sostenibilidad (Carroll et al., 2014).

Con todo, aunque todas las CSC son controvertidas, no todos los problemas controvertidos son CSC (Zeidler et al., 2019). Sin embargo, nos encontramos con que, en la contextualización de la evolución dentro de un marco de CSC, existen multitud de temas (por ejemplo, la competencia entre individuos, la distribución equitativa de recursos, los sistemas socioecológicos, el calentamiento global, la modificación genética) que son, a la vez, relevantes para los/as estudiantes, controvertidos, mal estructurados, requieren que los estudiantes participen en diálogos o argumentación, implican grados de razonamiento ético o moral, y contribuyen al desarrollo personal a lo largo del tiempo.

Involucrar a los/as estudiantes en tales temas lleva al desarrollo moral y de vocaciones científicas a largo plazo, lo que requiere una perspectiva funcional de la alfabetización científica, desarrollada no a través de enseñanzas aisladas, sino de la construcción deliberada y

sistemática de una participación en CSC a lo largo del tiempo (Bencze, et al., 2019; Zeidler et al., 2019).

Este volumen tiene como objetivo acercar a los maestros/as y educadores/as científicos una visión progresista de la alfabetización científica que proporcione herramientas para conceptualizar y aplicar un enfoque CSC en la enseñanza, con el fin de promover aprendizajes informados sobre evolución. Se basa en la suposición de que aprovechar la experiencia de diversos sectores implicados - desde científicos/as evolutivos hasta educadores/as científicos, desde profesionales de museos hasta expertos/as en medios -, puede contribuir a soluciones educativas que ayuden a promover la alfabetización científica de los estudiantes, que sean más fáciles de implementar y más efectivas en contextos educativos reales.

El hecho de que 34 autores y 29 revisores de 15 países distintos hayan colaborado para producir este libro (a los que hay que sumar los equipos de voluntarios que se han encargado de traducirlo a diferentes idiomas: portugués, italiano, español) indica el nivel de importancia que los profesionales de todo el mundo dan a este tema. Es importante destacar que las cuestiones morales y éticas, que son parte integral del marco CSC, pueden estar influenciadas por temas evolutivos, ya que estos temas no se detienen en la frontera de ningún país, al igual que los problemas ambientales globales no limitan su impacto al área más cercana.

Además, en la medida en que la evolución biológica está relacionada con muchos problemas ambientales globales que amenazan la sostenibilidad de nuestro planeta, comprender los procesos evolutivos puede ayudar a la planificación y evaluación de soluciones a largo plazo para estos problemas, al mejorar la capacidad para comprender y evaluar diversos futuros posibles, probables y deseables, y promover la reflexión sobre las consecuencias de nuestras decisiones. Es importante destacar

que la competencia anticipatoria relacionada con la sostenibilidad es una de las competencias mencionadas por la UNESCO (2018) como esenciales para promover la sostenibilidad.

Nunca ha habido un momento más apremiante para solicitar la contribución de la comunidad científica y educadores de múltiples lugares en diferentes países. Observamos, por ejemplo, que los (rápidos) avances tecnológicos recientes han presentado nuevos desafíos para los académicos en general, en especial al área de didáctica de las ciencias. Uno de los mayores desafíos para el aprendizaje en el aula es que los estudiantes tomen fotografías de diapositivas de PowerPoint con palabras e imágenes sin ningún grado de procesamiento mental profundo.

Las experiencias imaginativas y creativas de la infancia que fomentan el desarrollo de la memoria a largo plazo y las destrezas de pensamiento crítico están ausentes (Duckworth, 2006). Así, las CSC pueden proporcionar el tipo de ayuda necesaria para reavivar experiencias auténticas de aprendizaje que faciliten la co-construcción de conocimiento basado en alcanzar consensos, la participación y la comprensión, que pueden resistir el desafío del escrutinio y las contraincidencias (Zeidler, 2014).

Dado que los/as estudiantes están inundados con una avalancha de información, tanto fiable como engañosa, la capacidad de utilizar destrezas de razonamiento crítico, adoptar múltiples perspectivas y tomar decisiones sobre el bienestar del mundo biológico y físico de manera justa representa la alfabetización científica en acción.

El objetivo final de una ciudadanía informada no puede ser menos que el ejercicio de la alfabetización científica. Esto es, en todos los aspectos, una condición necesaria para la difusión de la prosperidad humana. La competencia para comprender la evolución no debe subestimarse. Los/las educadores/as de ciencias se enfrentan a una especie de “metaignorancia” en la que los principiantes

tienen una sobreestimación indebida de su confianza para resolver asuntos fuera de su dominio de conocimiento.

Esto es resultado del Efecto Dunning-Kruger (Dunning et al., 2003) y se describe mejor como “...una ‘metaignorancia’ (o ignorancia de la ignorancia) [que] surge porque la falta de experiencia y conocimiento a menudo se esconde en el reino de lo ‘desconocido’ o se disfraza con creencias erróneas y conocimientos previos que solo parecen ser suficientes para concluir una respuesta correcta” (Dunning, 2011, p. 248). Por ejemplo, no ha pasado desapercibido que aquellos que adoptan ideologías políticas a menudo lo hacen sin una evaluación o consideración cuidadosa de las pruebas científicas (Owens et al., 2017).

Es irónico, entonces, que mientras la rápida progresión del desarrollo tecnológico ha brindado oportunidades para expandir los límites del conocimiento, también ha limitado cuán profundamente nos conectamos con ese conocimiento. La disminución en las puntuaciones de alfabetización científica puede explicarse mediante el aumento del uso de teléfonos móviles, iPads y ordenadores para adquirir conocimiento, ya que los libros de texto están siendo reemplazados por presentaciones visuales, sin explicaciones escritas suficientes que fomenten la reflexión (Carter et al., 2017).

Las conexiones sinápticas que son necesarias para la imaginación y la resolución de problemas requieren un aumento en las oportunidades de lectura. Contrariamente a las expectativas teóricas (Herman, 2013; Zeidler, et al., 2016), la curva de aprendizaje se ha desviado de las

1. La “tecnología i” fue presentada originalmente por Steve Jobs en una conferencia magistral de 1998, cuando presentó las capacidades de internet de un ordenador iMAC. Con la llegada de otros productos Apple, como los iPad, iBook, iPod, iPhone, iOS, etc., la “tecnología i” no solo se ha vuelto onnipresente en la marca Apple, sino que también conlleva una connotación genérica de individuos conectados con y a la tecnología “al alcance de un dedo”. Kember (2016) expande esta noción en su libro, *iMedia: The Gendering of Objects, Environments and Smart Materials*.

destrezas de pensamiento crítico y resolución de problemas hacia la multitarea y el uso de Internet para la comunicación personal. ¿Sugiere esto que la intrusión de la tecnología ha inhibido la capacidad de los estudiantes para discernir enunciados relevantes, fiables y válidos de falsedades? Si es así, los cerebros de los/as estudiantes tenderán a introducir hechos falsos cercanos a la información válida para crear una especie mutante altamente invasiva de híbridos entre hechos y ficción. La investigación muestra que los/as estudiantes presentan confusión entre el conocimiento y la creencia, donde la creencia representa rumores no probados pero creíbles (Zeidler et al., 2002, 2018).

Agravando esto está el hecho de que la cultura dominante en muchas ocasiones actúa como una espada de doble filo, sirviendo tanto como una lente etnocéntrica para solidificar la identidad del grupo como un filtro que elimina valores disonantes que pueden ir en contra de las creencias fundamentales de uno (Kahan et al., 2011a, 2011b).

Por lo tanto, los temas y el contenido que el profesorado de ciencias presenta en clase compiten con la publicidad de productos que usan ciencia inexacta. Una implicación importante es, por lo tanto, que un papel primordial del docente de ciencias incluye fomentar la adquisición de conocimientos y destrezas que fomenten el cuestionamiento de enunciados y de la propia autoridad (Oliveira-Martins et al., 2017).

Con ese fin, los capítulos en este libro presentan enfoques relacionados con las CSC para contrarrestar algunas de estas cuestiones socioculturales, profundizando en áreas que exploran la comprensión conceptual de la evolución mediante la aplicación de enfoques socioculturales coherentes con el marco de las CSC. Al hacerlo, alineamos nuestro enfoque con la Visión II de la alfabetización científica de Roberts y Bybee (2014), que enfatiza cómo la ciencia debe ser relevante en cuestiones personales y sociales que impactan la vida del

alumnado. En consecuencia, los temas cubiertos en este volumen también facilitan la Visión II, como se presenta en los siguientes resúmenes.

¿Por qué un enfoque pedagógico con CSC tiene impacto a la hora de fomentar la alfabetización científica en la Visión II y la Visión III? ¿Cuáles son las diferencias entre las CSC y otros enfoques educativos que vinculan la ciencia y la sociedad? ¿Y cómo puede el profesorado planificar la instrucción educativa abordando CSC? En el Capítulo 2, Emine Sarıkaya y Mustafa Sami Topçu describen su enfoque de cuestiones sociocientíficas, cómo surgió y cómo es diferente de los enfoques de ciencia, tecnología y sociedad.

También describen dos modelos para diseñar actividades educativas: la versión más reciente del Modelo de Enseñanza y Aprendizaje Sociocientífico propuesto por Friedrichsen, Sadler, Graham y Brown (2016) para diseñar actividades basadas en CSC y el Modelo de las 5E desarrollado por Bybee, que presenta un marco para diseñar experiencias de aprendizaje en ciencias (Scott et al., 2014). Los autores nos guían a través de estos dos modelos y ofrecen sugerencias sobre cómo hacer que estos dos modelos sean compatibles y útiles para diseñar enfoques de enseñanza basados en CSC.

De hecho, los problemas complejos y controvertidos a los que nos enfrentamos hoy en día requieren que la educación capacite a la ciudadanía con alfabetización científica y, en particular, con competencias en sostenibilidad que les permitan contribuir a sociedades más justas y sostenibles. En el Capítulo 3, Patrícia Pessoa, J. Bernardino Lopes, Alexandre Pinto y Xana Sá-Pinto abordan este campo de la educación para el desarrollo sostenible y su conexión con el aprendizaje de evolución y el enfoque pedagógico de CSC. A través de una revisión sistemática de la literatura, identifican estudios que abarcan estos diferentes enfoques para determinar qué competencias de sostenibilidad se desarrollan en estos estudios. Muestran que solo unos pocos estudios abordan

la educación sobre evolución y la educación para el desarrollo sostenible mediante un enfoque CSC. Esto resalta la importancia de realizar más estudios y desarrollar más actividades sobre cómo promover la educación para la sostenibilidad explorando CSC desde una perspectiva evolutiva.

Además, aunque la evolución está relacionada con muchos de los problemas de sostenibilidad actuales, como la salud humana, la conservación de la biodiversidad o la seguridad alimentaria, la mayoría de los temas abordados en los trabajos analizados están relacionados con el campo de la biotecnología. Por último, este estudio también destaca la importancia de fomentar el trabajo participativo para promover el desarrollo de competencias en sostenibilidad a través del aprendizaje colaborativo, significativo y contextualizado en la resolución de problemas reales.

En el Capítulo 4, Martha Georgiou, Maria João Fonseca, Corinne Fortin, Sébastien Turpin y Camille Roux-Goupille exploran la aplicación de CSC en contextos de educación no formal, especialmente en museos. Se presentan actividades del Museo de Historia Natural de Oporto, el Museo Nacional de Historia Natural de París y el Museo Zoológico de Atenas como ejemplos. Estas actividades se centran en la biodiversidad, uno de los aspectos de la evolución que se vuelve cada vez más notable y un componente esencial de la vida. También hacen referencia a la integración de actividades de CSC en otros entornos de educación no formal y ofrecen una reflexión crítica sobre la contribución de tales entornos a la educación de CSC.

Pero, ¿cómo está relacionada la evolución con CSC? En el Capítulo 5, Alex Jeffries describe cómo la evolución es relevante para temas que impactan nuestras vidas diarias y cómo estos temas pueden utilizarse como anzuelos para fomentar la participación del alumnado en el aula.

Desde la perspectiva evolutiva del lugar de la

humanidad en la naturaleza, hasta la importancia de la evolución en la predicción de cambios en la biodiversidad durante el cambio climático, pasando por las perspicacias evolutivas sobre el cáncer y el COVID-19, Jeffries nos guía a través de los procesos y cómo la comprensión de la evolución puede ser utilizada para tomar decisiones informadas en nuestra vida diaria.

Aunque la evolución es ampliamente reconocida como una de las teorías científicas más valiosas, cientos de estudios han documentado una variedad de factores socioculturales, lingüísticos, cognitivos y epistémicos que influyen en la comprensión y aceptación de la evolución, lo que la convierte en una de las disciplinas más desafiantes para comunicar y enseñar de manera efectiva. En el Capítulo 6, Ross H. Nehm y Kostas Kampourakis ofrecen una breve descripción de algunos de los temas más significativos relacionados con la enseñanza efectiva y la comunicación sobre evolución (perspectivas a nivel mundial, la naturaleza de la ciencia, el lenguaje de la evolución, sesgos cognitivos e ideas alternativas, razonamiento sobre fenómenos evolutivos, casos y currículo, prácticas de enseñanza, y evaluación y aprendizaje), invitando a los/as lectores/as a utilizar este capítulo como punto de partida para adentrarse en el rico mundo de la literatura sobre la enseñanza de la evolución. Estos autores sugieren prestar atención a todos estos temas para una educación y divulgación efectivas sobre la evolución.

El último capítulo de la parte teórica del libro, el Capítulo 7, conecta la teoría con la práctica. En este capítulo, Merav Siani y Anat Yarden presentan tres actividades de formación que podrían aplicarse en escuelas de secundaria y programas de formación de profesorado. Las actividades abordan tres problemas de salud humana: la tolerancia a la lactosa, la enfermedad celíaca y el consumo de almidón que afecta a la diabetes.

Se describen los principios que guiaron el diseño de estas tres actividades. Además, se

presentan algunos resultados después de la implementación de una de las actividades en un grupo de docentes en formación. Según los resultados, una proporción significativa de profesores/as utilizó más conceptos clave sobre evolución después de participar en la actividad, y una proporción significativa de ellos aumentó su aceptación de la evolución.

En el Capítulo 8, Susan Hanish, Dustin Eirdosh y Tammy Morgan abordan un dilema clásico sobre cómo tratar cooperativamente y de manera sostenible con recursos de uso común (un problema también conocido en economía como la “tragedia de los comunes”). La cuestión de manejar nuestros propios intereses en una sociedad humana con recursos finitos es una cuestión/problema muy realista, que abarca desde los individuos hasta desafíos globales como la sostenibilidad, la mitigación del cambio climático, o el manejo de pandemias.

Existen “tragedias” de recursos similares en el mundo natural y tienen mecanismos e implicaciones evolutivas para las especies involucradas. Hanish y sus colaboradores proporcionan una visión general de la teoría del dilema de recursos de uso común en contextos tanto evolutivos como de recursos naturales humanos. Este fondo teórico se desarrolla luego en un conjunto flexible de cinco situaciones de aprendizaje para la escuela secundaria (con consejos prácticos para el profesorado) que ayuda al alumnado a comprender las implicaciones sociocientíficas del uso sostenible de los recursos.

Las cinco situaciones de aprendizaje con lecciones y conjuntos de preguntas permiten a los/as estudiantes reflexionar y discutir tanto la teoría como los problemas asociados con los dilemas de uso común, lo que les permite desarrollar una comprensión de las CSC en general, la evolución, las prácticas científicas, la naturaleza de la ciencia y su relación con la sociedad, y desarrollar destrezas transversales como el análisis, la evaluación crítica, la comprensión epistémica y la apertura de mente.

En el Capítulo 9, Ümran Betül Cebesoy considera cómo la evolución en sí, como un tema socioculturalmente controvertido para ciertos sectores de la sociedad, puede abordarse mediante el marco de las CSC y propone una actividad para la educación superior.

“Como la evolución a menudo se aborda en la negociación de CSC y la argumentación es una herramienta frecuente en los enfoques de CSC, esta actividad aplica un enfoque en el que la argumentación desempeña un papel clave. Con el objetivo de aumentar la comprensión de los participantes sobre la selección natural, se aplica un contexto de resistencia a los antibióticos. La actividad consta de tres partes, la primera explora las ideas previas de los/as participantes sobre la evolución y sus concepciones previas sobre la resistencia a los antibióticos. La segunda parte comprende algunas actividades de lectura específicas e información sobre la resistencia a los antibióticos y el papel de la selección natural. En la última sección, una discusión en el aula desafía las ideas de los/as estudiantes y fomenta sus competencias en argumentación.”

La actividad completa tiene varios objetivos de aprendizaje relacionados con las CSC (desarrollar la comprensión de CSC, destrezas en toma de decisiones, considerar la existencia de diferentes puntos de vista y tomar decisiones informadas en contextos de selección natural), evolución (considerar la selección natural como uno de los mecanismos de la evolución, identificar la variación, la heredabilidad/herencia y la ventaja reproductiva/reproducción diferencial como tres conceptos principales de la selección natural, discutir el papel de estos factores en la comprensión de la selección natural y reconocer el papel de las mutaciones como fuentes significativas de variaciones genéticas), prácticas científicas (construir explicaciones, participar en argumentación y buscar pruebas, obtener, evaluar y comunicar información), Naturaleza de la Ciencia (considerar que la ciencia se basa en pruebas empíricas) y destrezas transversales (analizar

problemas desde múltiples perspectivas).

En el Capítulo 10, Rebecca Lewis, Ellen Bell y Eleanor Kent nos presentan los dilemas que enfrentan los agricultores al decidir cuánto invertir en prácticas agrícolas que sean respetuosas con los polinizadores. A través de un atractivo juego, el alumnado aprende sobre estos dilemas al desempeñar el papel de agricultores, tomar decisiones y recibir el rendimiento de los cultivos vendidos al final. Algunos de los procesos del juego están relacionados con procesos evolutivos como la coevolución o la selección natural involucrada en la resistencia a enfermedades, y las autoras ofrecen ideas y sugerencias sobre cómo explorar estos procesos en el aula.

En el Capítulo 11, Rita Ponce, Susana Carneiro, André Rodrigues y Mustafa Sami Topçu abordan la correlación entre la distribución geográfica del color de la piel humana y la intensidad de la radiación solar como uno de los ejemplos más notables de cómo la selección natural ha moldeado la evolución de nuestra especie y la divergencia entre las poblaciones humanas. Además, se discute el impacto de la radiación solar en la salud humana, destacando la importancia de comunicar sus posibles efectos negativos y cómo evitarlos.

Para lograr esto, los autores presentan una actividad educativa (3ºESO-2º Bachillerato) que propone la creación de una campaña de difusión centrada en los efectos de la radiación solar. El objetivo de la actividad es ayudar a los estudiantes a aprender sobre la selección natural, cómo provoca la divergencia de poblaciones y cómo están relacionados estos procesos con los procesos evolutivos. Además, los estudiantes explorarán los conceptos de subespecies y razas (y cómo este último no tiene una existencia biológica real). También se abordan cuestiones éticas y médicas en un debate organizado por los estudiantes para comunicar problemas de salud relacionados con la evolución y desarrollar prácticas científicas.

En el Capítulo 12, “¿Tenemos permitido

manipular el ADN (humano)? Abordar cuestiones sociocientíficas a través del diálogo filosófico: el caso de la ingeniería genética”, Jelle De Schrijver, Stefaan Blancke, Eef Cornelissen, Jan Sermeus y Lynda Dunlop argumentan que la educación sobre cuestiones sociocientíficas como la ingeniería genética puede ser desafiante. Pueden surgir tensiones subyacentes al discutir sobre ingeniería genética.

Estas tensiones pueden estar relacionadas con (1) la biología molecular y la ingeniería genética, (2) los aspectos evolutivos de la ingeniería genética, (3) la naturaleza de la ciencia y (4) la comprensión ética de las CSC. Las tensiones pueden llevar a confrontaciones, ya sea entre el alumnado o entre el alumnado y el docente. Para abordar tales tensiones, los autores sugieren un enfoque pedagógico: la ‘indagación filosófica’, que implica un diálogo en el que un docente (facilitador) ayuda a un grupo de estudiantes a descubrir supuestos ocultos y a fomentar una conversación argumentativa. Estímulos como casos, imágenes o citas proporcionan un contexto para ayudar al alumnado a participar en diálogos sobre preguntas filosóficas. Al final del capítulo, los autores proporcionan consejos a tener en cuenta al abordar CSC a través de la indagación filosófica.

Los capítulos presentados anteriormente sugieren que el currículum de CSC es un organismo en evolución, ya que aparecen cuestiones novedosas cambiando los titulares de los medios de comunicación y desafiando las creencias centrales del alumnado. No es coincidencia que el debate actual sobre las noticias falsas haya sido un desafío constante para descifrar el auténtico conocimiento científico.

Por lo tanto, es prudente desde el punto de vista educativo proporcionar a los/as estudiantes las destrezas necesarias para participar en la toma de decisiones informadas y morales que afecten cuestiones como el desarrollo sostenible, a lidiar con la controversia, a comprender la

necesidad de la biodiversidad y temas similares (por ejemplo, Oliveira-Martins et al., 2017; Stevenson et al., 2012; UNESCO, 2018, 2021).

Debido a estas oportunidades, los/as estudiantes comienzan a alejarse de creencias epistemológicas más estrechas y comienzan a ampliar su visión del mundo con nuevas perspectivas y problemas (Gauvain y Cole, 2009), ya que articulan opiniones más amplias y más inclusivas o decisiones morales basadas en las pruebas científicas. A medida que los estudiantes comienzan a participar en el razonamiento basado en pruebas, también muestran una mayor capacidad para compartir sus propias perspectivas y comprender las perspectivas de los demás (Newton y Zeidler, 2020).

Pedagógicamente, el entorno social de los/as estudiantes también está en constante cambio. A medida que evolucionan los problemas sociales, la sensibilización de los/as estudiantes o su implicación en esos problemas también puede cambiar. Es un hecho que siempre habrá una moral en constante cambio de los estudiantes. Es imperativo estar atentos y sensibles al “estilo de la época” de las normas socioculturales.

En la enseñanza de CSC, es importante entender que cualquier experiencia dada se interpreta de manera personal, se referencia y se comprende dentro de las normas de una época única (Bencze et al., en prensa). Por lo tanto, a medida que las generaciones de estudiantes cambian con los años, el contexto educativo debe ser sensible al estilo de la época, pudiendo moldearse o ajustarse.

Por lo tanto, las preguntas planificadas y espontáneas deben diseñarse y construirse de manera que maximicen la participación de los/as estudiantes en un momento y lugar determinados. Hacerlo respalda las referencias a la visión II de la alfabetización científica, haciendo hincapié en la comprensión de cómo la ciencia es relevante en cuestiones personales y sociales (Roberts y Bybee, 2014). Con el propósito de preparar a los estudiantes para que se conviertan en ciudadanos/as

científicamente alfabetizados, es prudente desde el punto de vista educativo proporcionarles las destrezas necesarias para participar en la toma de decisiones informadas y morales que afectarán sus vidas. Estas experiencias brindan oportunidades para que los/as estudiantes participen en discusiones que desarrollen sus destrezas de razonamiento ético y les permitan ser más sensibles a cuestiones morales y éticas. Además, la naturaleza y alcance del conocimiento científico requiere creencias justificadas. El desafío para los/as educadores/as es crear un plan de estudios general y lecciones que sean atractivas e interesantes para los/as estudiantes. El vocabulario científico fundamental y la enseñanza de contenido compiten con una avalancha diaria de información que se presenta a adultos/as y niños/as a través de los medios de comunicación electrónicos. El uso de cuestiones sociocientíficas como contexto para la enseñanza de ciencias se ha vuelto esencial en la última década, debido al creciente uso de Internet y las redes sociales que requiere que los/as estudiantes tomen decisiones morales y personales de naturaleza científica.

Dado que los conocimientos científicos comúnmente aceptados (por ejemplo, el cambio climático, la evolución, la investigación con células madre) son temas controvertidos en algunas partes de la sociedad (Beniermann et al., 2021), la instrucción de CSC proporciona un entorno seguro para aprender el vocabulario científico, así como el contenido. La introducción de lecciones a través del prisma de problemas sociales relevantes proporciona un marco

- 
2. Zeitgeist es un término alemán que puede traducirse como “espíritu de la época”. Se asocia con el clima intelectual y moral predominante de un grupo o cultura en particular, en una época dada. Por tanto, siempre es específico de un lugar y tiempo determinados y un producto de factores socioculturales que impactan en la conciencia colectiva, las normas sociales y los valores de la gente, dejando huella en aquellos que comparten esa experiencia vivida.

auténtico y sólido para adquirir una mejor comprensión de conceptos relevantes y cuestiones éticas.

En el aprendizaje de la evolución a través de CSC debemos crear un plan de estudios para el cerebro en desarrollo que incluya las experiencias necesarias para mejorar la alfabetización, la resolución de problemas globales e individuales, la toma de decisiones morales y el autoconocimiento. No se debe subestimar el hecho de que el entorno sociocultural deja su huella en el cerebro en desarrollo (Harris, 2010).

Nacemos con una alta neuroplasticidad: nuestros cerebros se adaptan constantemente y se moldean según las demandas de nuestro entorno, así como las herramientas intelectuales, culturales y tecnológicas que empleamos en nuestras tomas de decisiones cotidianas (Garland y Howard, 2009; Mundkur, 2005).

Se ha sugerido que, si bien nos volvemos más hábiles en escanear y leer rápidamente montones de datos (tanto verdaderos como falsos), nuestra capacidad para la contemplación profunda y la reflexión se ha visto gravemente comprometida (Carr, 2014).

En este sentido, enseñar contenido científico que cambia a lo largo del tiempo ha sido un desafío para el profesorado. No cuesta imaginar entonces que el tema de la teoría evolutiva probablemente genere diversos niveles de conflicto cognitivo y disonancia para el alumnado; también para los adultos. En general, las personas evocarán una serie de gimnasia mental y contorsiones para evitar la inconsistencia entre sus creencias fundamentales y las ideas que desafían esas creencias fundamentales (Cooper, 2019; Zeidler, 2001).

Sin embargo, es ese mismo estado psicológico de “desequilibrio” cognitivo y moral lo que se puede aprovechar para obligar a los/as estudiantes a explorar, explicar, resolver y aprender con más detalle conceptos que desafían sus concepciones epistemológicas del

mundo. En otras palabras, tener que enfrentar pruebas científicas o argumentos que son inconsistentes con creencias y comprensiones previas puede generar un nivel de tensión cognitiva y moral, a veces llamado “concepto umbral” (Land et al., 2016), necesario para crear disonancia, que es precursora de su resolución, así como de ideas y aprendizajes novedosos.

En la investigación de CSC transcultural (Zeidler et al., 2013), encontramos que un modelo umbral ayuda a explicar la relación entre el razonamiento sociocientífico de los/as estudiantes y la sofisticación epistemológica, avanzando desde justificaciones próximas, inmediatas y concretas hacia una mayor consideración de “intangibles” que consisten en justificaciones abstractas sobre decisiones de CSC (Zeidler, 2016).

Sugerimos que un marco educativo de CSC es una estrategia pedagógica viable que permite a los/as educadores/as de ciencias fortalecer su labor y, posteriormente, guiar al alumnado hacia una comprensión conceptual más profunda de los principios temáticos y organizativos en el campo de la evolución, así como de la ciencia en sí.

## REFERENCIAS

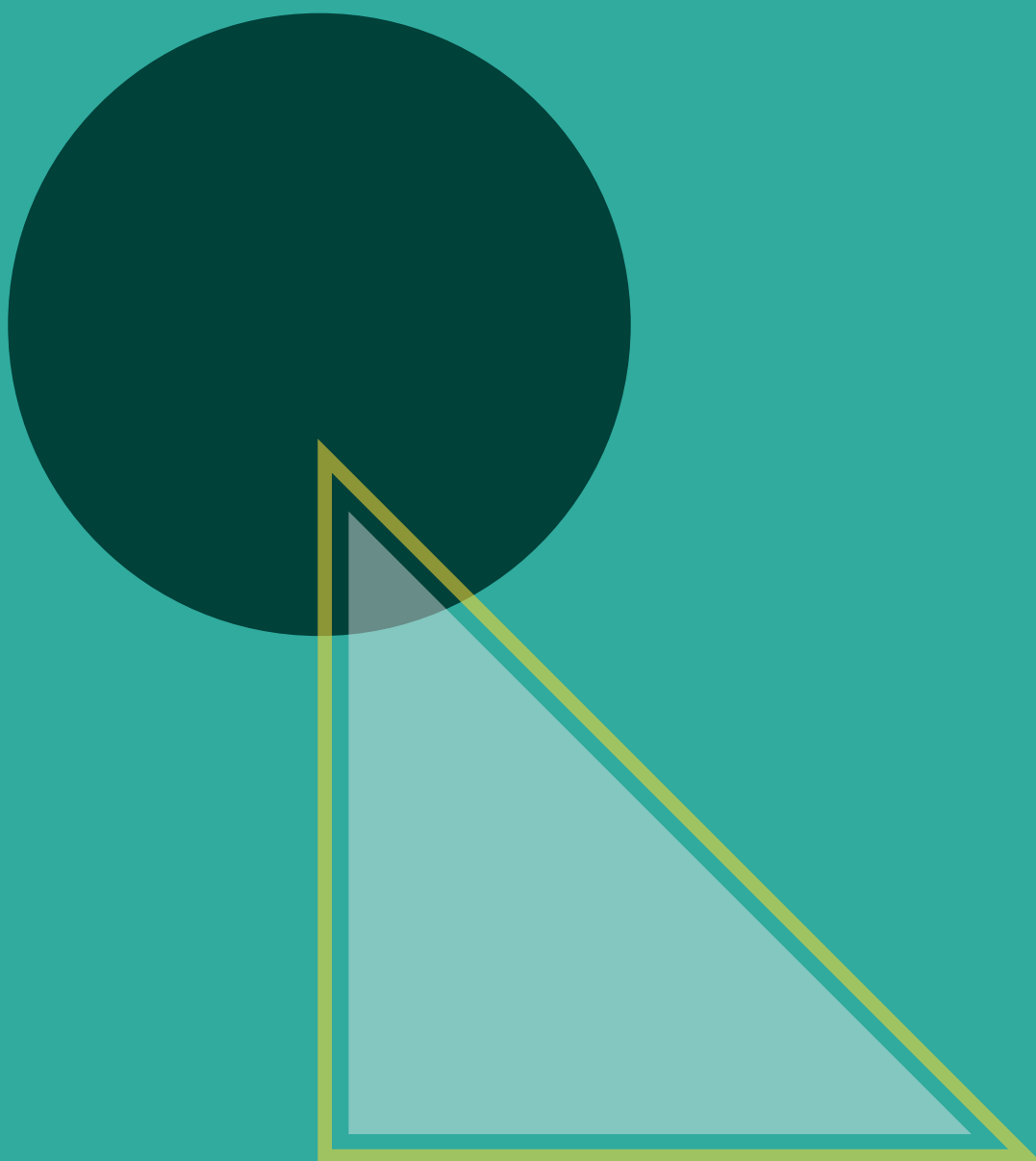
- Abd-El-Khalick, F., & Lederman, N.G. (2023). Research on Teaching, Learning, and Assessment of Nature of Science. In N. G. Lederman, D.L. Zeidler, & J.S. Lederman (Eds.), *Handbook of Research on Science Education, Volume III*. Routledge. (In Press).
- Barnosky, A. D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G. O., Swartz, B., Quental, T. B., Marshall, C., McGuire, J. L., Lindsey, E. L., Maguire, K. C., Mersey, B., & Ferrer, E. A. (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471(7336), 51–57.
- Bencze, J.L., Pouliot, C., Pedretti, E. Simonneaux, L., Simonneaux, J., & Zeidler, D.L. (2020). SAQ, SSI & STSE education: Defending and extending 'Science-in-Context.' *Cultural Studies in Science Education*, 15(3), 825-851.
- Benierrmann, A., Mecklenburg, L., & Upmeyer zu Belzen, A. (2021). Reasoning on Controversial Science Issues in Science Education and Science Communication. *Education Sciences*, 11(9), 522.
- Borgerding, L. A., & Dagistan, M. (2018). Preservice science teachers' concerns and approaches for teaching socioscientific and controversial issues. *Journal of Science Teacher Education*, 29(4), 283-306.
- Carr, N. (2011). *The shallows: What the Internet is doing to our brains*. W.W. Norton & Company.
- Carroll, S. P., Jørgensen, P. S., Kinnison, M. T., Bergstrom, C. T., Denison, R. F., Gluckman, P., Smith, T. B., Strauss, S. Y., & Tabashnik, B. E. (2014). Applying evolutionary biology to address global challenges. *Science*, 346(6207).
- Carter, M.D., Walker, M.M., Hough, M.S., & O'Brien (2017). Reading rate acceleration: How fast is too fast? *Journal of Literacy and Technology*, 18(3), 2-37.
- Cooper, J. (2019). Cognitive Dissonance: Where We've Been and Where We're Going. *International Review of Social Psychology*, 32(1), 7.
- Duckworth, E. (2006). *The having of wonderful ideas and other essays on teaching and learning*. Teachers College Press.
- Dunning, D. (2011). The Dunning-Kruger Effect: On Being Ignorant of One's Own Ignorance. *Advances in Experimental Social Psychology*, 44, 247–296.
- Dunning, D., Johnson, K., Ehrlinger, J., & Kruger, J. (2003). Why people fail to recognize their own competence. *Current Directions in Psychological Science*, 12, 83–87.
- Garland, E.L., & Howard, M.O. (2009). Neuroplasticity, psychosocial genomics, and the biopsychosocial paradigm in the 21st Century. *Health & Social Work*, 34(3), 191-199.
- Gauvain, M., & Cole, M. (2009). *Readings on the Development of Children*. 5th ed. Worth.
- Herman, B. C. (2013). Convergence of Postman and Vygotsky's perspectives regarding contemporary media's impact on learning and teaching. In M. P. Clough, J. K. Olson, & D. S. Niederhausers (Eds.), *The nature of technology: Implications for teaching and learning* (pp. 293–328). Sense Publishers.
- Harris, S. (2010). *The moral landscape: How science can determine human values*. Free Press.
- Jørgensen, P. S., Folke, C., & Carroll, S. P. (2019). Evolution in the Anthropocene: Informing governance and policy. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50(1), 527–546.
- Kahan, D. M., Jenkins-Smith, H., & Braman, D. (2011a). Cultural cognition of scientific consensus. *Journal of risk research*, 14(2), 147-174.
- Kahan, D. M., Wittlin, M., Peters, E., Slovic, P., Ouellette, L.L., Braman, D. & Mandel, G. (2011b). *The Tragedy of the Risk-Perception Commons: Culture Conflict, Rationality Conflict, and Climate Change*. Temple University Legal Studies Research Paper No. 2011-26; Cultural Cognition Project Working Paper No. 89; Yale Law & Economics Research Paper No. 435; Yale Law School, Public Law Working Paper No. 230. Available at SSRN:
- Kember, S. (2016). *iMedia: The gendering of objects, environments and smart materials*. Palgrave Macmillan Limited.
- Kuschmierz, P., Benierrmann, A., Bergmann, A., Pinxten, R., Aivelo, T., Berniak-Wo ny, J., Bohlin, G., Bugallo-Rodriguez, A., Cardia, P., Cavadas, B. F., Cebesoy, U. B., Cvetkovi , D. D., Demarsy, E., Đor evi , M. S., Drobniak, S. M., Dubchak, L., Dvo áková, R. M., Fančovičová, J., Fortin, C., ... Graf, D. (2021) European first-year university students accept evolution but lack substantial knowledge about it: a standardized European cross-country assessment. *Evolution: Education and Outreach*, 14(1), 1-22.
- Land, R., Meyer, J.H.F., & Flanagan, M.T. (2016). *Threshold concepts in practice*. Rotterdam: Sense Publishers.
- Lederman, N.G., & Lederman, J.S. (2014). Research on teaching the nature of science. . In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of Research on Science Education, Volume II* (pp. 600-620). Routledge.

- Mundkur, N. (2005). Neuroplasticity in children. *Indian Journal of Pediatrics*, 72, 855–857.
- National Research Council. (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*. Committee on a Conceptual Framework for New K-12 Science Education Standards. Board on Science Education, Division of Behavioral and Social Sciences and Education. Washington, DC: The National Academies Press.
- Newton, M., & Zeidler, D.L. (2020). Developing socioscientific perspective taking. *International Journal of Science Education*, 42(8), 1302-1319.
- Oliveira-Martins, G., Gomes, C.A.S., Brocardo, J.M.L., Pedroso, J.V., Carillo, J.L.A., Silva, M.L.U., Encarnação, M.M.G.A., Horta, M.J.V.C., Calçada, M.T.C.S., Nery, R.F.V., & Rodrigues, M.S.C.V (2017). *Perfil dos Alunos à Saída da Escolaridade Obrigatória*. Ministério da Educação.
- Owens, D.C., Sadler, T.D., & Zeidler, D.L. (2017). Controversial issues in the science classroom. *Phi Delta Kappan*, 99(4), 45-49.
- Roberts, D.A., & Bybee, R.W. (2014). Scientific literacy, science literacy, and science education. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of Research on Science Education, Volume II* (pp. 545-558). Routledge.
- Statistics Brain Research Institute. (2017) Statistic Brain Research Institute, publishing as Statistic Brain. July 2, 2016. Retrieved from
- Stevenson, R.B., Brody, M., Dillon, J. & Wals, A.E.J. (2012). *International Handbook of Research on Environmental Education*. Routledge.
- Tabashnik, B. E., Mota-Sanchez, D., Whalon, M. E., Hollingworth, R. M., & Carrière, Y. (2014). Defining terms for proactive management of resistance to Bt crops and pesticides. *Journal of economic entomology*, 107(2), 496-507.
- UNESCO. (2018). Issues and Trends in Education for Sustainable Development. In *UNESCO Publishing*.
- UNESCO (2021). *UNESCO urges making environmental education a core curriculum component in all countries by 2025*.
- World Health Organization. (2014). Antimicrobial resistance: global report on surveillance. *World Health Organization*, 61(3).
- Zeidler, D.L. (2003), *The role of moral reasoning on socioscientific issues and discourse in science education*. Kluwer Academic Press.
- Zeidler, D. L., Herman, B., Ruzek, M., Linder, A., & Lin, S. S. (2013). Cross-cultural epistemological orientations to socioscientific issues. *Journal of Research in Science Teaching*, 50, 251–283.
- Zeidler, D.L. (2014). Socioscientific Issues as a Curriculum Emphasis: Theory, Research and Practice. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of Research on Science Education, Volume II* (pp. 697-726). Routledge.
- Zeidler, D.L. (2016). STEM education: A deficit framework for the 21st century? A sociocultural socioscientific response. *Cultural Studies of Science Education*. 11(1), 11-26.
- Zeidler, D.L., Applebaum, S.M. & Sadler, T.D. (2011). Enacting a socioscientific issues classroom: Transformative transformations. In T. D. Sadler (Ed.), *Socio-scientific issues in science classrooms: Teaching, learning and research* (pp. 277-306). Springer.
- Zeidler, D.L., Herman, B.C., Clough, M.P., Olson, J.K., Kahn, S., & Newton, M. (2016). Humanitas Emptor: Reconsidering recent trends and policy in science teacher education. *Journal of Science Teacher Education*, 25(5), 465-476.
- Zeidler, D.L., Herman, B.C., & Sadler, T.D. (2019). New directions in socioscientific issues research. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(11), 1-9.
- Zeidler, D.L., & Sadler, T.D. (2023). Exploring and expanding the frontiers of socioscientific issues: Crossroads and future directions. In N. G. Lederman, D.L. Zeidler, & J.S. Lederman (Eds.), *Handbook of Research on Science Education, Volume III*. Routledge. (In Press).
- Zeidler, D.L., Walker, K.A., Ackett, W.A., & Simmons, M.L. (2002). Tangled up in views: Beliefs in the nature of science and responses to socioscientific dilemmas. *Science Education*, 86(3), 343-367.



## Capítulo 2.

# Uso de cuestiones sociocientíficas para fomentar la alfabetización científica del alumnado



# Uso de cuestiones sociocientíficas para fomentar la alfabetización científica del alumnado

**Emine Sarıkaya<sup>1</sup>,  
Mustafa Sami Topçu<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Yıldız Technical University

## Resumen:

Las cuestiones sociocientíficas (CSC, o SSIs por sus siglas en inglés), pueden describirse como temas sociales de carácter controvertido que están íntimamente ligadas a la ciencia y que, como resultado de su compleja e inherente dualidad narrativa, carecen de una solución única. Para entender mejor el desarrollo histórico de la investigación sobre cuestiones sociocientíficas como enfoque didáctico, quizás resulte útil investigar el periodo en el que se produce la emergencia de cuestiones sociocientíficas específicas. Si bien el enfoque didáctico de Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS) se centra en los efectos que la Ciencia y la Tecnología tienen en la sociedad, no aborda estas cuestiones desde el punto de vista del desarrollo moral y el conocimiento epistemológico. En cambio, el uso de cuestiones sociocientíficas apuesta por promover el desarrollo moral y conocimiento epistemológico del individuo, así como llamar la atención sobre los aspectos sociales y científicos presentes en los problemas del día a día. El término de razonamiento sociocientífico alude entonces al proceso de negociación que busca dar respuesta a los dilemas planteados por dichas cuestiones sociocientíficas. El nivel de razonamiento sociocientífico está íntimamente ligado al grado de alfabetización científica de cada persona, ya que implica ser capaz de razonar en diferentes contextos sociocientíficos. También está muy relacionado con la definición que hace el Programa para la Evaluación Internacional de los Estudiantes (PISA, por sus siglas en inglés) sobre la alfabetización científica, al establecer que la alfabetización científica se relaciona con la habilidad para usar el conocimiento científico en contextos reales. En este estudio se presentan dos modelos para abordar el tratamiento de las cuestiones sociocientíficas en aula: el modelo educativo de cuestiones socio-científicas (SSI-TI por sus siglas en inglés) y el modelo 5E. Se discute además su grado de compatibilidad a la hora de aplicarlos dentro de una enseñanza basada en el uso de cuestiones sociocientíficas.

### **PALABRAS CLAVE:**

*Razonamiento informal, Razonamiento sociocientífico, Educación CTS, Evolución*

# INTRODUCCIÓN

## 1.1 Definición de ‘cuestión sociocientífica’

Las cuestiones sociocientíficas (CSC, o SSIs por sus siglas en inglés), son temas que tienen sus raíces tanto en la ciencia como en la sociedad (Ramírez Villarin y Fowler, 2019). Dado que una cuestión sociocientífica contiene una narrativa compuesta por múltiples perspectivas y carece de una solución simple y clara, requiere de un proceso de negociación para alcanzar un acuerdo (Romine *et al.*, 2017).

Fowler y Zeidler (2016) describen las cuestiones sociocientíficas usando las palabras “ill-structured controversial”, es decir, controvertidas y de estructura compleja. La clonación, la investigación con células madre, la terapia genética, la biodiversidad (Fowler y Zeidler, 2016), la fracturación hidráulica, el cambio climático o los alimentos genéticamente modificados (Romine *et al.* 2017) son algunos ejemplos de cuestiones sociocientíficas.

## 1.2 Periodo que condujo a la aparición del enfoque basado en cuestiones sociocientíficas

El enfoque SSI surge de la investigación derivada del propio enfoque CTS (Ciencia, Tecnología y Sociedad) (Zeidler *et al.*, 2009). Desde la década de 1970, se ha realizado un esfuerzo desde la Didáctica de las Ciencias para abordar temas con trasfondo social y científico-tecnológico y estudiar sus efectos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias (Zeidler *et al.*, 2005). Existe consenso en que situar un contenido científico en un contexto más amplio, incorporando los componentes social, científico y tecnológico, favorece el aprendizaje significativo (Zeidler *et al.*, 2005).

Este enfoque Ciencia-Tecnología-Sociedad representa un esfuerzo por integrar las diferentes influencias que ejercen entre sí la Tecnología, la Ciencia y la Sociedad (Sadler, 2004). En 1982, la Asociación Nacional de Profesorado de Ciencias de Estados Unidos publicó las características de lo que habría de considerarse una persona científicamente alfabetizada; entre ellas, se hacía hincapié en la necesidad de comprender las intersecciones entre

estas tres áreas (Zeidler *et al.*, 2005). En los años 90, el enfoque CTS, que aboga también por el abordaje de cuestiones ambientales, fue incorporado a la agenda de enseñanza de las ciencias (Topçu, 2017). No obstante, ninguno de estos dos enfoques educativos incide especialmente en el desarrollo del individuo ni en los valores morales y éticos. Igualmente, otra debilidad a destacar es que ni la argumentación ni la Naturaleza de la Ciencia están incluidas en el enfoque CTS ni CTSA (Topçu, 2017).

# MARCO CONCEPTUAL DE LAS CUESTIONES SOCIO-CIENTÍFICAS

## 2.1 Alfabetización científica

Promover la alfabetización científica es un objetivo fundamental para la educación científica (Kolsto, 2001; Yacoubian, 2018). Anteriormente, comprender las conexiones entre ciencia, tecnología y sociedad era considerado, de acuerdo con la National Science Teacher Association, un rasgo de una persona científicamente alfabetizada (Zeidler *et al.*, 2005). En consecuencia, mientras que la idea de un enfoque ciencia-tecnología-sociedad reflejaba la propiedad de ser científicamente alfabetizado (Zeidler *et al.*, 2005), podría decirse que la alfabetización científica puso las bases para la emergencia de las cuestiones sociocientíficas a partir del enfoque CTS.

Roberts y Bybee (2014, citado en Kinslow *et al.* 2019) proponen dos grandes e importantes formas de concebir la alfabetización científica. Así, para Kinslow *et al.*, (2019) existen dos visiones de la educación científica: Visión I y Visión II.

Si bien las definiciones dadas a la Visión I y la Visión II cambian en función de la persona o grupo de personas que las describen, Tan (2016) establece que la Visión I se refiere al conocimiento curricular y la Visión II consiste en la habilidad para entender de forma crítica el impacto que tiene la ciencia en nuestra vida diaria.

En línea con Tan (2016), Romine et al. (2017) identifican la Visión I como conocimiento conceptual. En cambio, la Visión II pone el énfasis en el conocimiento contextual, es decir, la habilidad de usar el conocimiento científico personal en diferentes contextos (Romine et al., 2017).

La perspectiva de alfabetización científica adoptada por el Programa Internacional de Evaluación del Alumnado (PISA, por sus siglas en inglés) también incluye la habilidad de emplear el conocimiento científico en contextos de la vida real (Sadler y Zeidler, 2009). Dado que los SSIs se utilizan como contexto de aprendizaje, puede decirse que coinciden con la visión de alfabetización científica planteada por PISA. Además, en los últimos años se ha desarrollado una nueva definición, una Visión III de

alfabetización científica. Surge precisamente como respuesta a los desafíos y necesidades del siglo XXI, como la injusticia, el creciente odio hacia ciertas minorías y la crisis ambiental (Valladares, 2021).

Esta tercera definición lleva la visión de la alfabetización científica más allá de uso contextual de la información científica, haciendo hincapié en el compromiso social y el impacto ciudadano (Valladares, 2021). Adopta la perspectiva de uso del conocimiento y toda una serie de habilidades en la reconstrucción de las relaciones humanas a nivel planetario (Valladares, 2021).

**Tabla 1**

Competencias asociadas a cada visión de alfabetización científica y su relación con las cuestiones sociocientíficas (CSC)

	<b>Visión I</b> <b>Alfabetización científica</b>	<b>Visión II</b> <b>Alfabetización científica</b>	<b>Visión III</b> <b>Alfabetización científica</b>
<b>Competencias</b>	<b>Aprendizaje de contenido científico (Tan, 2016; Romine et al., 2017)</b>	<b>Aprendizaje de contenido científico y habilidad para utilizar el conocimiento científico en contextos de la vida real (Sadler y Zeidler, 2009).</b>	Aprendizaje de contenido científico, habilidad para usarlo en contexto y desarrollo de un conjunto de capacidades para la participación democrática de la ciudadanía (Valladares, 2021).
<b>Contribución de las CSC</b>	Las narrativas sociocientíficas sirven como un enfoque significativo <b>para el aprendizaje de contenido científico (Sadler, 2009).</b>	Las cuestiones sociocientíficas ofrecen contextos de la vida real con raíces sociales y científicas <b>para el aprendizaje de la ciencia y su aplicación en contexto (Sadler, 2009).</b>	El enfoque CSC ofrece la oportunidad de implicarse en la acción socio-política (Bencze, Pouliot, Pedretti, Simonneaux, Simonneaux and Zeidler, 2020) y de <b>aprender a participar de la vida democrática a través de procesos de toma de decisiones (Ottander y Simon, 2021).</b>

## 2.2 Razonamiento informal

El razonamiento informal es un concepto significativo que hace alusión al proceso de toma de decisiones ante un dilema. Una cuestión sociocientífica (CSC) es justamente una cuestión abierta, multidimensional y de naturaleza dilemática (Romine et al., 2017).

Al considerar los complejos dilemas derivados de la naturaleza de las SSI, los estudiantes ponen en juego el razonamiento informal para tomar decisiones y establecer acuerdos (Sadler y Zeidler, 2004). El proceso de razonamiento cognitivo para negociar esas controversias (p.ej. razonamiento informal, Sadler y Zeidler, 2005) requiere no solo apoyarse en datos científicos, sino también en las implicaciones emocionales del problema. En consecuencia, a medida que los alumnos negocian, discuten, debaten e investigan cuestiones tan complejas y polémicas, se involucran en un discurso profundo y en la construcción conjunta de significados, lo que requiere combinar los procesos cognitivos y afectivos que contribuyen a la resolución del problema en cuestión. En particular, las ISE ofrecen una plataforma adecuada para el uso del razonamiento informal (Sadler, 2004).

## 2.3 Razonamiento sociocientífico

Las CSC contribuyen a los procesos de pensamiento y toma de decisiones, así como a la adopción de posiciones (Zeidler et al., 2019). Para comprender cómo se logran estos objetivos mediante la instrucción basada en las CSC, se ha mencionado la necesidad de disponer de un concepto que capture este proceso de pensamiento (Zeidler et al., 2021).

Para satisfacer esta necesidad, se define el razonamiento sociocientífico (Sadler et al., 2007). El razonamiento sociocientífico incluye prácticas de razonamiento que implican la participación de los estudiantes durante el proceso de negociación de una narrativa sociocientífica (Sadler et al., 2007; Zeidler et al., 2021). De este modo, se describe como un concepto centrado en estas habilidades y prácticas (Romine et al., 2017).

Por otra parte, esta forma de razonamiento es importante tanto por su relación con la alfabetización científica como por las prácticas utilizadas en el proceso de toma de decisiones para la negociación de las CSC (Kinslow et al., 2019). A diferencia del razonamiento informal, este novedoso concepto describe el proceso de razonamiento en el ámbito de las CSC. Sin embargo, Sadler (2004) explicó el razonamiento informal como el proceso de pensamiento implicado en cualquier cuestión complicada y dilemática.

Romine et al. (2017) investigaron el razonamiento sociocientífico y afirmaron que se centra en el conocimiento del contenido, pero también incluye habilidades cognitivas de orden superior, como la comprensión de la naturaleza compleja y polifacética de una cuestión. Así, el concepto de razonamiento sociocientífico se describe a partir de un conjunto de prácticas que se espera que el alumnado ponga en marcha durante el proceso de resolución de una CSC compleja (Kinslow et al., 2019). Estas prácticas incluyen comprender la complejidad del asunto, analizar y expresar la CSC desde múltiples perspectivas, tener en cuenta la investigación en curso acerca de ese tema y mostrarse crítico/a ante la información existente o manipulada (Kinslow et al., 2019; Sadler et al., 2007).

La primera práctica, la “*complejidad*”, sugiere que los estudiantes deben darse cuenta de la naturaleza compleja de las CSC, para las que no existe una solución clara (Cian, 2019; Kinslow et al., 2019; Sadler et al., 2007). La consideración de múltiples perspectivas, que es la segunda práctica del razonamiento sociocientífico, se describe como un proceso de razonamiento necesario para comprender los aspectos negativos, y positivos, de cada CSC implicados en el proceso de toma de decisiones para cada parte interesada (Cian, 2019; Kinslow et al., 2019; Sadler et al., 2007). En esta dimensión del razonamiento sociocientífico deben evaluarse las posibles formas de atender a las particularidades de cada contexto (Sadler et al., 2007).

La tercera práctica puede describirse como una conciencia de cuestionamiento continuo (Cian,

2019; Kinslow *et al.*, 2019; Sadler *et al.*, 2007).

Los estudiantes deben plantear preguntas en sus mentes para futuras indagaciones (Kinslow *et al.*, 2019). Dado que las soluciones alcanzadas no son las únicas soluciones a este problema, pueden reevaluarse y cambiarse (Cian, 2019).

Por otra parte, el alumnado debe tener en cuenta cómo los intereses de los diversos agentes implicados pueden afectar a sus procesos de toma de decisiones, manteniendo, por tanto, una actitud escéptica con respecto a los argumentos producidos (Cian, 2019; Kinslow *et al.*, 2019; Sadler *et al.*, 2007). Así, la dimensión “mostrarse crítico/a” implica ser consciente de que las posturas de las partes interesadas y la información que proporcionan pueden manipularse en función de sus necesidades o beneficios (Cian, 2019).

Además, Zeidler *et al.* (2019) añaden una quinta dimensión al razonamiento sociocientífico, denominada “posibilidades y limitaciones de la ciencia”. Esta dimensión implica valorar las contribuciones del conocimiento y los procesos científicos a la solución de las CSC y reconocer sus limitaciones (Zeidler *et al.*, 2019).

## UN MARCO ÚTIL PARA DESARROLLAR ENSEÑANZA BASADA EN CSC

### 3.1 Modelo educativo de CSC (Modelo SSI-TL por sus siglas en inglés)

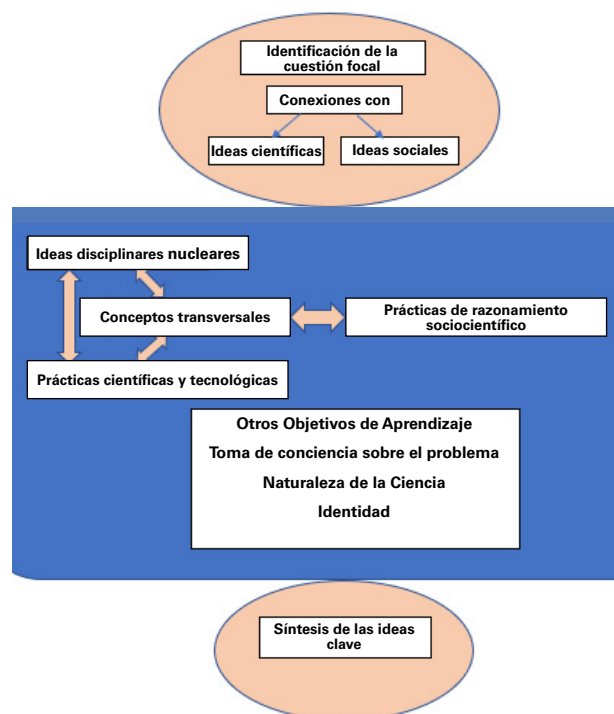
El modelo SSI-TL fue descrito por Friedrichsen *et al.* (2016) y puede utilizarse como guía para que el profesorado desarrolle procesos de enseñanza basados en CSC. La versión más actual de este modelo incluye dos partes: diseño didáctico y resultados de aprendizaje (Friedrichsen *et al.*, 2016).

La parte didáctica se divide en tres subpartes: cuestión focal, cuerpo principal y actividad

culminante (Friedrichsen *et al.*, 2016). En la parte de la cuestión de interés, se presenta la CSC (Friedrichsen *et al.*, 2016). El alumnado debe explorar el contexto proporcionado como una cuestión sociocientífica (Friedrichsen *et al.*, 2016) y, así, darse cuenta de que tiene raíces científicas y sociales (Topçu, 2017). La parte del cuerpo principal incluye actividades para analizar y comprender el tema previsto (Friedrichsen *et al.*, 2016).

La versión actual del modelo SSI-TL está alineada con los *Next Generation Science Standards* (NGSS; NGSS Lead States, 2013) de EE. UU.

**Figura 1**  
Modelo de enseñanza-aprendizaje de cuestiones socio-científicas (figura adaptada con las modificaciones de Sadler *et al.*, 2017).



De hecho, la parte del “cuerpo principal” del modelo es coherente con su política tridimensional (Friedrichsen *et al.*, 2016), que sostiene que la educación científica debe proporcionar a los estudiantes oportunidades para aprender sobre

1) conceptos transversales, 2) ideas principales de cada disciplina y 3) prácticas científicas y de ingeniería (NRC, 2012). Las ideas principales de cada disciplina están relacionadas con el conocimiento del contenido requerido según los estándares NGSS (NGSS, 2013).

Para las ciencias de la vida, hay cuatro ideas disciplinares principales: a) de las moléculas a los organismos: estructuras y procesos; b) ecosistemas: interacciones, energía y dinámica; c) herencia: herencia genética y variación de rasgos; d) evolución biológica: unidad y diversidad (NRC, 2012, p. 142). Las prácticas científicas y de ingeniería abarcan métodos que forman parte de la actividad científica y la ingeniería (NRC, 2012).

El Consejo Nacional de Investigación (2012) ha determinado ocho prácticas científicas: i) formular preguntas (para la ciencia) y definir problemas (para la ingeniería); ii) desarrollar y utilizar modelos; iii) planificar y llevar a cabo investigaciones; iv) analizar e interpretar datos; v) utilizar las matemáticas y el pensamiento computacional; vi) construir explicaciones (para la ciencia) y diseñar soluciones (para la ingeniería); vii) participar en discusiones basadas en pruebas (argumentar); viii) obtener, evaluar y comunicar información (NRC, 2012, p. 49).

La tercera dimensión de las NGSS, los conceptos transversales, permite la combinación de conocimientos científicos y de ingeniería en todas las disciplinas (NRC, 2012). Se establecen siete conceptos transversales de acuerdo con el National Research Council (2012, p. 84): “patrones”, “causa y efecto”, “escala, proporción y cantidad”, “sistemas y modelos de sistemas”, “energía y materia”, “estructura y función” y “estabilidad y cambio” (NRC, 2012, p. 84).

Atendiendo a esta perspectiva, las actividades troncales deben planificarse de manera que los estudiantes puedan aprender las ideas disciplinares principales, las prácticas científicas y de ingeniería y los conceptos transversales, y adquieran una comprensión de la naturaleza de la ciencia (epistemología de la ciencia) y las CSC, al tiempo que desarrollan su propia identidad

(Friedrichsen et al., 2016; Sadler et al., 2017; Topçu, 2017).

El último paso del modelo SSI-TL es la “actividad culminante” (Friedrichsen et al., 2016). Esta actividad debe incluir dinámicas que permitan a los estudiantes reflexionar y sintetizar las ideas y conceptos científicos tratados en el periodo de enseñanza (Sadler et al., 2017).

En este sentido, la enseñanza basada en CSC a través del modelo SSI-TL tiene objetivos didácticos claros (Sadler et al., 2017; Topçu, 2017). Se espera que el alumnado aprenda sobre las CSC, adquiera conocimiento sobre el contenido (ideas disciplinares principales) y/o experimente prácticas científicas y de ingeniería al tiempo que aprende sobre los conceptos transversales (Sadler et al., 2017; Topçu, 2017).

Por otra parte, en la enseñanza basada en la CSC, al utilizar el conocimiento científico para comprender un contexto sociocientífico, también se espera que mejore su nivel de razonamiento sociocientífico (Topçu, 2017). Abordar y debatir los valores éticos y morales contribuye al desarrollo de la personalidad del individuo (Levinson, 2008). En un estudio realizado por Sadler et al. (2016) en el que se facilitó y discutió con el alumnado los resultados de un proceso experimental, a través de la enseñanza basada en CSC, se logró que los estudiantes compartieran y debatieran acerca de los datos experimentales proporcionados como si de una comunidad científica se tratara. Esto les permitió aprender que “la ciencia es colaborativa” (Sadler et al., 2017, p. 84). Este sería un ejemplo de cómo puede abordarse la naturaleza de la ciencia en la enseñanza basada en CSC.

### 3.1 El modelo 5E y el modelo educativo de CSC (SSI-TL, por sus siglas en inglés)

El modelo 5E fue desarrollado por Bybee y se basa en la filosofía de la educación constructivista (Ergin, 2012; Scott et al., 2014). Presenta un marco que puede servir de guía a los/as educadores/as a la hora de diseñar los resultados del aprendizaje de las ciencias (Scott et al., 2014).

El modelo 5E propone que los docentes elaboren actividades educativas estructuradas en cinco etapas, que incluyen el *Enganche* (“engagement”, en inglés), la *Exploración*, la *Explicación*, la *Elaboración* y la *Evaluación* (Bybee et al., 2006). Al aplicar este modelo, el profesorado adopta una posición de supervisión, en la que va controlando y apoyando a los estudiantes con preguntas y materiales (Bybee, 2014; Scott et al., 2014).

El modelo 5E es compatible con el modelo SSI-TL y ayuda al proceso de enseñanza basada en CSC proporcionando un punto de vista constructivista y segmentando las actividades del “cuerpo principal” (Friedrichsen et al., 2016).

El *Enganche* es la fase en la que se despierta la curiosidad y el deseo de aprender de los alumnos y alumnas (Bybee, 2014; Bybee et al., 2006). Formular una pregunta, definir el problema y mostrar un acontecimiento atractivo son ejemplos de prácticas que pueden aplicarse en este paso (Bybee, 2014). Tanto el modelo 5E como el SSI-TL pretenden implicar al alumnado presentándoles el tema de la propuesta didáctica (Friedrichsen et al., 2016).

Cuando los estudiantes se “enganchan”, se preparan y predisponen a descubrir el problema en cuestión (Bybee, 2014). Por ejemplo, en la secuencia didáctica propuesta por Sarıkaya (en prensa), la observación de un vídeo acerca del colapso de las colmenas de abejas sirve para dar pie a la exploración de una narrativa sociocientífica: el uso de pesticidas en la agricultura. A continuación, la lectura de algunos textos relacionados con el uso de pesticidas permite abrir una pequeña discusión sobre esta CSC (Sarıkaya, en prensa).

La *Exploración* implica actividades que permiten a los estudiantes explorar el tema (Bybee et al., 2006; Ergin, 2012). El alumnado

debe realizar experimentos, hacer observaciones y formular conceptos y habilidades (Scott et al., 2014). El modelo 5E fomenta el modelo SSI-TL para que los estudiantes se comprometan con la exploración de temas científicos (Friedrichsen et al., 2016). Utilizando el ejemplo de la actividad descrita anteriormente (Sarıkaya, en prensa), se puede argumentar sobre la cuestión de “*si los pesticidas deben utilizarse o no*” basándose en los textos proporcionados. También puede emplearse un juego de construcción de cadenas alimentarias para aprender el contenido (Sarıkaya, en prensa).

En la fase de *Explicación*, se espera que el alumnado haga explícita su comprensión conceptual de estas experiencias de exploración (Bybee, 2014; Bybee et al., 2006). Es decir, deben hacer inferencias basadas en dichas experiencias (Scott et al., 2014). En este sentido, la *Explicación* permite a los estudiantes describir un concepto o una idea científica (Bybee, 2014; Bybee et al., 2006). Esta etapa también forma parte de las actividades del “cuerpo principal” que tiene lugar en el modelo SSI-TL (Friedrichsen et al., 2016).

En la fase de *Explicación*, el profesorado puede crear además oportunidades para que los alumnos y alumnas expliquen sus argumentos durante una actividad de argumentación (por ejemplo, como hace Sarıkaya, en prensa); eso sí, los alumnos pueden dar explicaciones durante todo el periodo de enseñanza.

La siguiente etapa es la *Elaboración*, que tiene como objetivo transferir la comprensión conceptual y las habilidades adquiridas en fases anteriores a diferentes contextos (Bybee, 2014; Bybee et al., 2006). Se espera que el alumnado realice trabajo colaborativo y se sumerja en un entorno de aprendizaje interactivo, en el que expresen sus ideas y las de otros estudiantes, recibiendo y dando así retroalimentación (Scott et al., 2014). Los objetivos de esta etapa son, por tanto, establecer conexiones entre la vida cotidiana y los contenidos y ampliar sus conocimientos mediante una comprensión más profunda (Bybee, 2014; Bybee et al., 2006).

De este modo, en la etapa de *Elaboración*, se pretende que el alumnado logre una mejor comprensión del contenido científico. Para ello, se ofrece y se conduce a los estudiantes a través de diferentes contextos en los que poder aplicar

conocimientos científicos relevantes (Friedrichsen et al., 2016). En la secuencia desarrollada por Sarıkaya (en prensa) antes mencionada, el alumnado primeramente crea sus redes tróficas y explica los flujos de energía, un conocimiento que deberán aplicar después en la fase de *Elaboración* a un ejemplo de ecosistema marino.

También se discute el “patrón” sobre cómo esas redes tróficas y flujos de energía ocurren de la misma manera en los ecosistemas acuáticos. Esto posibilita a los estudiantes debatir sobre patrones, lo que representa uno de los conceptos transversales (Sarıkaya, en prensa). Igualmente, les permite ir construyendo y emitiendo explicaciones a lo largo del proceso (Sarıkaya, en prensa).


El último paso, la *Evaluación*, requiere diseñar actividades para medir si se alcanzan los objetivos previstos en el proceso de enseñanza-aprendizaje (Bybee, 2014; Bybee et al., 2006). En este paso

pueden utilizarse actividades de rendimiento, ensayos o pruebas (Ergin, 2012).

Brevemente, en esta etapa, los docentes evalúan lo aprendido por los estudiantes a través de la intervención didáctica (Scott et al., 2014). Se corresponde así con la “actividad culminante” del modelo SSI-TL, puesto que ambos pretenden sintetizar lo aprendido por el alumnado durante el proceso de enseñanza-aprendizaje (Friedrichsen et al., 2016). Un buen ejemplo de actividad de evaluación podría ser pedir a los estudiantes que preparen una campaña de sensibilización sobre los efectos de los plaguicidas en las relaciones alimentarias y el medio ambiente, como hizo Sarıkaya (en prensa).

Figura 2

Compatibilidad entre el modelo 5E y el modelo SSI-TL (figura adaptada con las modificaciones de Friedrichsen et al., 2016).

Modelo SSI-TL	Modelo 5E
Cuestión focal	Enganche: Enganchar a los estudiantes a través de la introducción del tema
Conexiones sociales <b>Ideas Científicas</b>	Exploración: Crea un diseño que permita a los estudiantes descubrir un fenómeno
	Explicación: Describir un concepto o idea científica, especialmente basada en las experiencias extraídas de la fase de Exploración
<b>Prácticas Científicas</b> Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC)	Elaboración: transferir el conocimiento a diferentes contextos
Actividad culminante	Evaluación: Evaluación del aprendizaje conseguido

El modelo 5E refuerza el modelo SSI-TL llevándolo a crear actividades desde una perspectiva constructivista, centrada en el/la alumno/a (Friedrichsen et al., 2016). En concreto, el uso

del modelo 5E como marco instruccional de apoyo divide en secciones las actividades del cuerpo principal existentes en el modelo SSI-TL, permitiendo así la organización cualificada de un

plan de estudios basado en CSC (Friedrichsen et al., 2016).

## CONCLUSIÓN

Las CSC tienen una narrativa abierta debido a su naturaleza dilemática, carecen de soluciones claras y requieren procesos de toma de decisiones (Topçu, 2017). Esto hace que sea importante comprender dichos procesos.

El razonamiento informal es un proceso cognitivo que se produce en la mente de un individuo durante su interacción con la CSC (Romine et al., 2017; Sadler y Zeidler, 2004). Podría decirse que, al definir y utilizar este nuevo concepto de “razonamiento sociocientífico”, el objetivo es hacer explícito el pensamiento sobre las prácticas utilizadas por los estudiantes en los procesos de toma de decisiones sobre CSC.

La enseñanza basada en las CSC coincide con los objetivos de la Visión II de la alfabetización científica (Sadler y Zeidler, 2009). Asimismo, la capacidad de negociar CSC controvertidas constituye una de las dimensiones de la alfabetización científica (Sadler y Zeidler, 2004). Así, estas competencias sociocientíficas que el alumnado pone en marcha para resolver las CSC están estrechamente relacionadas con su nivel de alfabetización científica (Romine et al., 2017; Sadler et al., 2007).

Centrarse en las competencias sociocientíficas podría ayudarnos a alcanzar los objetivos de la alfabetización científica. Concretamente, la aplicación de una enseñanza basada en CSC resulta de gran importancia; de hecho, sus resultados de aprendizaje se solapan con los necesarios para fomentar la alfabetización científica (Sadler y Zeidler, 2009).

Al fin y al cabo, la enseñanza basada en CSC ofrece un entorno de aprendizaje que promueve muchas ganancias de aprendizaje (Topçu, 2017). En primer lugar, fomenta la alfabetización científica descrita por la Visión I mediante el andamiaje del conocimiento de los contenidos.

También atiende a la alfabetización científica defendida por la Visión II, al permitir a los estudiantes el empleo del conocimiento adquirido en contextos dilemáticos de la vida real (Sadler y Zeidler, 2009). Finalmente, responde a la Visión III de alfabetización científica al posibilitar a los estudiantes intervenir en el proceso de toma de decisiones, promoviendo así la participación democrática (Bencze et al., 2020; Ottander y Simon, 2021).

También Zeidler et al. (2019) reconocen el importante papel de las CSC en el desarrollo de la alfabetización científica, poniendo de manifiesto cómo esta relevancia ha sido demostrada a lo largo de 20 años de investigación.

En definitiva, en este capítulo se han presentado dos modelos -el modelo educativo de CSC (SSI-TL, por sus siglas en inglés) y el modelo 5E- para apoyar al profesorado en el desarrollo de la enseñanza basada en CSC. También se ha debatido cómo combinar estos dos modelos. En este sentido, pueden servir como marcos que lleven a un docente a determinar cómo puede aplicarse la enseñanza basada en CSC en su aula.

En definitiva, cuando se considera la contribución de las CSC al concepto de alfabetización científica (Bencze et al., 2020; Ottander y Simon, 2021; Sadler, 2009; Sadler y Zeidler, 2009; Topçu, 2017), se puede entender la importancia de la educación basada en CSC y los modelos desarrollados que permiten al profesorado utilizar dichas CSC como herramienta de enseñanza y aprendizaje. Asimismo, el modelo SSI-TL muestra claramente los objetivos de aprendizaje potenciales en una práctica basada en la sociociencia.

## REFERENCIAS

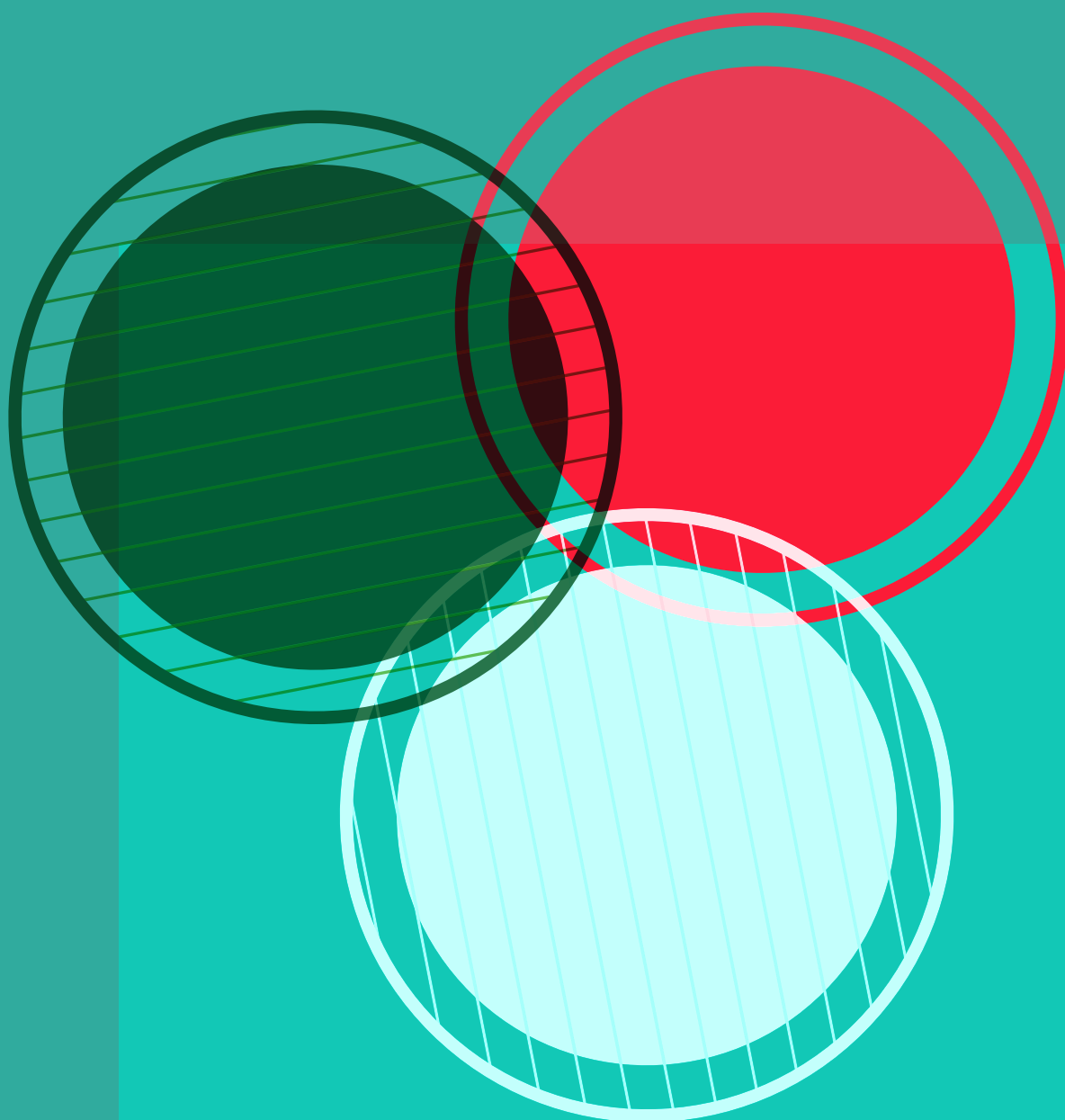
- Bencze, J. L., Pouliot, C., Pedretti, E., Simonneaux, L., Simonneaux, J., & Zeidler, D. L. (2020). SAQ, SSI & STSE education: Defending and extending 'science-in context'. *Cultural Studies in Science Education*, 1(27), 6-28.
- Beniermann, A., Mecklenburg, L., & Upmeier zu Belzen, A. (2021). Reasoning on controversial science issues in science education and science communication. *Education Sciences*, 11(9), 522.
- Bybee, R. W. (2014). The BSCS 5E instructional model: Personal reflections and contemporary implications. *Science and Children*, 51(8), 10,13.
- Bybee, R. W., Taylor, J. A., Gardner, A., Van Scotter, P., Powell, J. C., Westbrook, A., & Landes, N. (2006). *The BSCS 5E instructional model: Origins, effectiveness, and applications*. Colorado Springs BSCS.
- Çalik, M., Turan, B., & Coll, R. K. (2013). A cross-age study of elementary student teachers' scientific habits of mind concerning socioscientific issues *International Journal of Science and Mathematics Education*, 12(2014), 1315–1340.
- Cansiz, N. (2014). Developing preservice science teachers' socioscientific reasoning through socioscientific issues-focused course [Unpublished Doctoral Dissertation, Middle East Technical University].
- Cian, H. (2019). *Influence of student values, knowledge, and experience on socioscientific topic on measures of high-school student socioscientific reasoning* (Publication No. 2338)[Doctoral Dissertation, Clemson University].
- Ergin, I. (2012). Constructivist approach based 5E model and usability instructional physics. *Journal of Physics Education*, 6(1), 14–20.
- Erman, E., & Sari, D. A. P. (2019). Science in a black box: Can teachers address science from socio-scientific issues? *Journal of Physics: Conference Series*, 1417(1), 1–5.
- Feinstein, N. (2011). Salvaging science literacy. *Science Education*, 95(1), 168–185.
- Fowler, S.R. & Zeidler, D.L. The Influence of Students' Acceptance of Evolution on SSI Negotiation. National Association for Research in Science Teaching. March 2012, Indianapolis, Indiana.
- Fowler, S. D., & Zeidler, D. L. (2016). Lack of evolution acceptance inhibits students' negotiation of biology-based socioscientific issues. *Journal of Biological Education*, 50(4), 407–424.
- Friedrichsen, P. J., Sadler, T. D., Graham, K., & Brown, P. (2016). Design of a socio-scientific issue curriculum unit: Antibiotic resistance, natural selection, and modeling. *International Journal of Design for Learning*, 7(1), 1–18.
- Kinslow, A. T., Sadler, T. D., & Nguyen, H. T. (2019). Socio-scientific reasoning and environmental literacy in a field-based ecology class. *Environmental Education Research*, 25(3), 388–410.
- Kolstø, S. (2001). Scientific literacy for citizenship: Tools for dealing with the science dimension of controversial socioscientific issues. *Science Education*, 85(3), 291–310.
- Levinson, R. (2008). Promoting the role of the personal narrative in teaching controversial socio-scientific issues. *Science & Education*, 17(8), 855–871.
- National Research Council. (2012). A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas. The National Academies Press.
- NGSS Lead States. (2013). Next generation science standards: *For states, by states*.
- Norris, S. P., & Phillips, L. M. (2003). How literacy in its fundamental sense is central to scientific literacy. *Science Education*, 87(2), 224–240.
- Ottander, K., & Simon, S. (2021). Learning democratic participation? Meaning-making in discussion of socioscientific issues in science education. *International Journal of Science Education*, 43(12), 1895–1925.
- Ramirez Villarin, L. J., & Fowler, S. R. (2019). Socioscientific issues to promote content knowledge & socioscientific reasoning in Puerto Rican high school students. *The American Biology Teacher*, 81(5), 328–332.
- Relela, M. & Mavuru, L. (2021). Life Sciences teachers' conceptions about socioscientific issues in the topic evolution. A paper presented (virtual) at the International Conference on Education and New Developments (END) 2021, 26-28 June, Porto, Portugal.
- Romine W, L., Sadler, T. D., & Kinslow, A. T. (2017). Assessment of scientific literacy: Development and validation of the quantitative assessment of socioscientific reasoning (QuASSR). *Journal of Research in Science Teaching*, 54(2), 274–295.
- Sadler, T. D. (2004). Informal reasoning regarding socioscientific issues: A critical review of research. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(5), 513–536.
- Sadler, T. D., Barab, S. A., & Scott, B. (2007). What do students gain by engaging socioscientific inquiry? *Research in Science Education*, 37(4), 371– 391.

- Sadler, T. D., Foulk, J. A., & Friedrichsen, P. J. (2017). Evolution of a model for socioscientific issue teaching and learning. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 5(2), 75–87.
- Sadler, T. D., Klosterman, M. L., & Topcu, M. S. (2011). *Learning science content and socioscientific reasoning through classroom explorations of global climate change* (2nd ed.). Springer.
- Sadler, T. D., & Zeidler, D. L. (2004). The significance of content knowledge for informal reasoning regarding socioscientific issues: Applying genetics knowledge to genetic engineering issues. *Science Education*, 89(1), 71–93.
- Sadler, T. D., & Zeidler, D. L. (2009). Scientific literacy, PISA, and socioscientific discourse: Assessment for progressive aims of science education. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(8), 909–921.
- Sarıkaya, E. (In press). *Effects of the computational thinking featured socio-scientific issue curriculum on using CT principles and science concepts in algorithmic explanations*. [Doctoral dissertation, University of Yıldız Teknik].
- Scott, T. P., Schroeder, C., Tolson, H., Huang, T-Y., & Williams, O. M. (2014). A longitudinal study of a 5th grade science curriculum based on the 5E model. *Science Educator*, 23(1), 49–55.
- Silva, G. M., Lahr, D. J. G., & Silva, R. L. F. (2021). The epistemic and pedagogical dimensions of evolutionary thinking in educational resources for zoology designed for preservice teacher education. *Journal of Biological Education*, 1-14.
- Tan, P. (2016). Science education: Defining the scientific literate person. *Simon Fraser University Educational Review*, 9(2016), 1-8.
- Topçu, M. S. (2017). *Sosyobilimsel konular ve öğretimi* (2nd ed.). Pegem Yayınları.
- Topçu, M. S., Yılmaz-Tüzün, Ö., & Sadler, T. D. (2010). Preservice science teachers' informal reasoning about socioscientific issues: The influence of issue context. *Journal of Science Teacher Education*, 22(2011), 313–332.
- Torkar, G., & Sorgo, A. (2020). Evolutionary content knowledge, religiosity and educational background of Slovene preschool and primary school pre-service teachers. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 16(7), 1–13.
- Valladares, L. (2021). Scientific literacy and social transformation. *Sci & Educ*, 30(2021), 557–587.
- Yacoubian, H. A. (2018). Scientific literacy for democratic decision-making. *International Journal of Science Education*, 40(3), 308–327.
- Zeidler, D. L., Herman, B. C., & Sadler, T. D. (2019). New directions in socioscientific issues research. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(1), 11.
- Zeidler, D. L., Sadler, T. D., Applebaum, S., & Callahan, B. E. (2009). Advancing reflective judgment through socioscientific issues. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(1), 74–101.
- Zeidler, D. L., Sadler, T. D., Simmons, M. L., & Howes, E. V. (2005). Beyond STS: A research-based framework for socioscientific issues education. *Science Education*, 89(3), 357–377.



## Capítulo 3.

# Enseñanza de la evolución a través de cuestiones sociocientíficas para el desarrollo sostenible



## Enseñanza de la evolución a través de cuestiones sociocientíficas para el desarrollo sostenible

**Patrícia Pessoa<sup>1,2</sup>,  
J. Bernardino Lopes<sup>2,1</sup>,  
Alexandre Pinto<sup>3</sup>,  
Xana Sá-Pinto<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>CIDTFF – Research Centre on Didactics and Technology  
in the Education of Trainers, University of Aveiro

<sup>2</sup>UTAD – University of Trás-os-Montes e Alto Douro

<sup>3</sup>Polytechnic Institute of Porto - School of Education

### Resumen:

Abordar los complejos y controvertidos problemas a los que nos enfrentamos hoy en día exige dotar a la ciudadanía de competencias en sostenibilidad que les permitan contribuir a crear sociedades más justas y sostenibles. Muchos problemas de sostenibilidad se encuentran estrechamente relacionados con los procesos evolutivos. Cuando estos problemas pueden ser informados por la ciencia, se habla de cuestiones sociocientíficas (CSC). Se ha demostrado que los enfoques educativos que exploran las CSC contribuyen al desarrollo de la alfabetización científica funcional y al desarrollo integral del alumnado. En conjunto, esto sugiere que la enseñanza sobre evolución a través del enfoque CSC puede contribuir al desarrollo de competencias clave en sostenibilidad. Para poner a prueba esta hipótesis y comprender cómo se ha explorado la enseñanza sobre evolución biológica a través de los enfoques CSC, realizamos una revisión sistemática de la literatura para identificar las competencias clave en sostenibilidad desarrolladas en trabajos que abordan la evolución a través de CSC. Nuestros resultados indican que algunos estudios han abordado la enseñanza de la evolución a través de CSC y apoyan el potencial de este enfoque, ya que todas las competencias clave en sostenibilidad se encontraron en estos estudios; sin embargo, algunas de estas competencias (por ejemplo, las competencias estratégicas y anticipatorias) no se observaron con frecuencia. Nuestros resultados también confirman el interés de este enfoque para la formación del alumnado en evolución biológica, ya que se encontraron todas las dimensiones relacionadas con este modelo científico. Sin embargo, los estudios analizados muestran poca diversidad en cuanto a las CSC exploradas, ya que la mayoría están relacionados con la biotecnología. Se discuten las implicaciones de estos resultados y los aspectos más destacados para la práctica educativa.

### **PALABRAS CLAVE:**

*Competencias clave en sostenibilidad, Desarrollo sostenible, Evolución educativa, Cuestiones sociocientíficas, Revisión bibliográfica*

# INTRODUCCIÓN

## Competencias clave en sostenibilidad

Según Wiek et al. (2015), “la sostenibilidad es la voluntad colectiva y la capacidad de una sociedad para alcanzar o mantener su viabilidad, vitalidad e integridad a lo largo de largos períodos de tiempo, permitiendo al mismo tiempo que otras sociedades alcancen o mantengan su propia viabilidad, vitalidad e integridad” (p. 241).

Vivimos un periodo de inmensos desafíos a la sostenibilidad que está afectando gravemente a la supervivencia de muchas sociedades y poniendo en peligro los sistemas biológicos del planeta (Naciones Unidas, 2015).

Algunos ejemplos de estos retos incluyen (pero no se limitan a) las amenazas para la salud mundial, el cambio climático que provoca el aumento de las temperaturas globales y del nivel del mar, la acidificación de los océanos, el aumento de la frecuencia e intensidad de desastres naturales, el agotamiento de los recursos naturales e impactos sobre la degradación del medio ambiente (por ejemplo, la desertificación, la sequía, la degradación del suelo, la escasez de agua dulce y la pérdida de biodiversidad).

Todos estos retos se caracterizan por un alto grado de complejidad, sin una solución óptima evidente, un elevado potencial de daños y una gran urgencia (Wiek et al., 2011). Para hacer frente a estos retos, los ciudadanos y ciudadanas deben ser capaces de tomar decisiones informadas y poner en marcha soluciones innovadoras y eficaces. Esto requiere una transformación educativa a gran escala, que dote de estas competencias no solo a los profesionales de la sostenibilidad, sino también a las nuevas generaciones de cualquier tipo de profesionales (Wiek et al., 2011).

Según Wiek et al. (2011), la educación para el desarrollo sostenible debe permitir a los estudiantes desarrollar las competencias en sostenibilidad, que son “complejos de conocimientos, habilidades y actitudes que permiten afrontar con éxito, a través de la realización de tareas y resolución de problemas, los desafíos y oportunidades que ofrece el mundo real en torno a la sostenibilidad” (p. 204).

Estas competencias son fundamentales

para construir una sociedad más sostenible y justa para todos y todas, y empoderar a las generaciones actuales y futuras para satisfacer sus necesidades, utilizando un enfoque equilibrado e integrado de las dimensiones económica, social y medioambiental del desarrollo sostenible (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2018; Wiek et al., 2011, 2015).

Las competencias de sostenibilidad no están restringidas por límites disciplinarios o conocimientos de contenidos específicos (de Haan, 2006), sino que representan objetivos de aprendizaje transversales, que son necesarios para hacer frente a los complejos desafíos que nos encontramos en nuestra vida cotidiana (UNESCO, 2018; Wiek et al., 2015).

A través de una revisión bibliográfica, Wiek et al. (2011) identificaron cinco competencias clave en sostenibilidad:

- i Competencia de pensamiento sistémico:**  
“Capacidad para analizar colectivamente sistemas complejos en diferentes ámbitos (sociedad, medio ambiente, economía, etc.) y a diferentes escalas (local a global), teniendo en cuenta los efectos en cascada, la inercia, los bucles de retroalimentación y otras características sistémicas relacionadas con las cuestiones de sostenibilidad y los marcos de resolución de problemas de sostenibilidad” (Wiek et al., 2011, p. 207).
- ii Competencia anticipatoria:**  
“Capacidad para, colectivamente, analizar, evaluar y elaborar “imágenes” ricas del futuro acerca de cuestiones de sostenibilidad y marcos de resolución de problemas (Wiek et al., 2011, pp. 208-209);

## iii

**Competencia normativa:**

*“Capacidad para, colectivamente, mapear, especificar, aplicar, reconciliar y negociar valores, principios, metas y objetivos relacionados con la sostenibilidad. Esta capacidad permite, en primer lugar, evaluar colectivamente la (in)sostenibilidad de los estados actuales y/o futuros de los sistemas socioecológicos y, en segundo lugar, crear colectivamente una visión sostenible para estos sistemas. Esta capacidad se basa en los conocimientos normativos adquiridos, incluidos los conceptos de justicia, equidad, integridad socioecológica y ética” (Wiek et al., 2011, p. 209);*

A la luz de estas competencias clave en sostenibilidad y porque la educación para la sostenibilidad *“debe capacitar a los estudiantes para analizar y resolver problemas de sostenibilidad, prever y preparar para futuros retos de sostenibilidad, así como crear y aprovechar oportunidades para la sostenibilidad”* (Wiek et al., 2011, p. 204), estamos convencidos de que el enfoque de las cuestiones sociocientíficas (CSC) contribuye al desarrollo de dichas competencias.

## Las cuestiones sociocientíficas como enfoque

## iv

**Competencia estratégica:**

*“Capacidad para diseñar y aplicar colectivamente intervenciones, transiciones y estrategias de gobernanza transformadora hacia la sostenibilidad. Esta capacidad requiere una comprensión íntima de conceptos estratégicos como intencionalidad, inercia sistémica, rigidez institucional, barreras, agentes, alianzas, etc.; conocimientos sobre la viabilidad, factibilidad, eficacia y eficiencia de las intervenciones sistémicas, así como sobre las posibles consecuencias imprevistas” (Wiek et al., 2011, p. 210);*

A lo largo de las dos últimas décadas, varios autores han defendido el enfoque pedagógico CSC como eficaz para implicar a los estudiantes en las oportunidades de aprendizaje que vinculen las experiencias escolares con los contextos sociales, promoviendo así el aprendizaje significativo y fomentando la alfabetización científica funcional y el desarrollo personal de los ciudadanos y ciudadanas del mundo (Fowler y Zeidler, 2016).

Según Sadler (2005), las CSC *“surgen de la interfaz entre la ciencia y la sociedad, e implican cuestiones sociales con elementos conceptuales, procedimentales o tecnológicas relacionados con la ciencia”* (p. 68).

Estas cuestiones son temas sociales complejos, mal estructurados y controvertidos, sin una solución simple y clara, ya que pueden basarse en diversas ideas y perspectivas, como la económica, la política y la ética (Fowler y Zeidler, 2016; Sadler et al., 2017; Zeidler, 2014).

Algunos ejemplos de CSC son los dilemas relacionados con la biotecnología, los problemas medioambientales, la genética, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la resistencia a los antibióticos. Las CSC también se entienden como un enfoque pedagógico que, según Zeidler y Sadler (en prensa):

## v

**Competencia interpersonal:**

*“Capacidad para motivar, posibilitar y facilitar la investigación y la resolución de problemas relacionados con la sostenibilidad de forma colaborativa y participativa. Esta capacidad incluye destrezas avanzadas de comunicación (...), deliberación y negociación (...), colaboración (...), liderazgo (...), pensamiento pluralista y transcultural (...), y empatía” (Wiek et al., 2011, p. 211).*

1. Utiliza problemas personalmente relevantes, controvertidos y poco estructurados que requieren un razonamiento científico basado en pruebas para fundamentar las decisiones sobre dichos temas;
2. Emplea temas científicos con ramificaciones sociales que exigen al alumnado dialogar, discutir, debatir y argumentar;
3. Integra componentes éticos implícitos y/o explícitos que requieren cierto grado de razonamiento moral;
4. Hace hincapié en la formación ética y el desarrollo personal como objetivos pedagógicos a largo plazo.

En los últimos años, este enfoque ha permitido a los estudiantes implicarse activamente en la construcción del conocimiento a la vez que toman decisiones informadas y analizan, sintetizan y evalúan diversas fuentes de datos e información (Lee et al., 2013; Peel et al., 2019; Zeidler et al., 2019).

Los estudios de investigación han demostrado que este enfoque tiene influencia sobre la i) comprensión de la naturaleza de la ciencia por parte del alumnado (Abd-El-Khalick, 2003; Khishfe y Lederman, 2006), ii) la capacidad de razonamiento (Zeidler et al., 2009) y, más concretamente, de razonamiento informal (Sadler, 2005), iii) las habilidades de argumentación (Kolstø, 2006; Venville y Dawson, 2010; Zohar y Nemet, 2001), iv) la alfabetización científica funcional y el desarrollo personal (Zeidler y Sadler, 2007; Zeidler et al., 2013), v) la sensibilidad y razonamiento moral, ético y social (Clarkeburn, 2002; Lee et al., 2012, 2013; Fowler et al., 2009; Hogan, 2002; Peel et al., 2019; Zeidler et al., 2019), vi) la empatía y la capacidad de adoptar múltiples perspectivas, vii) el sentido de responsabilidad sociocientífica y viii) la comprensión de la complejidad de las conexiones inherentes al aprendizaje contextualizado de las ciencias (Lee et al.,

2013; Peel et al., 2019; Zeidler et al., 2019).

Igualmente, estos estudios respaldan el potencial del enfoque CSC para desarrollar algunas de las competencias necesarias para el desarrollo sostenible. Sin embargo, por lo que sabemos, ningún estudio ha relacionado directamente el enfoque educativo CSC con el desarrollo de las cinco competencias clave en sostenibilidad propuestas por Wiek et al. (2011).

## La enseñanza- aprendizaje de la evolución biológica

Muchos de los retos globales actuales que amenazan la sostenibilidad de nuestro planeta y de las generaciones futuras están relacionados con procesos evolutivos y requieren soluciones basadas en la biología evolutiva (Carroll et al., 2014).

De hecho, la evolución juega un papel crítico en algunos de los retos incluidos en la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2015). Por ejemplo, los problemas de salud humana como la obesidad, la diabetes, el cáncer, los trastornos cardiovasculares y las enfermedades infecciosas. Problemas que derivan en muchas ocasiones de cambios en nuestra dieta, el medio ambiente y nuestros estilos de vida, o, en el caso de las enfermedades, debido a la evolución de nuevos patógenos o patógenos resistentes a los antibióticos, problemas de seguridad alimentaria causados por la disminución de la producción agrícola (debido a la creciente resistencia a los pesticidas) y la reducción de la biodiversidad causada por la extinción de especies (debido a la escasa adaptación al cambio climático y la contaminación) (Carroll et al., 2014; Jørgensen et al., 2019; Matthews et al., 2020). Para abordar estos complejos problemas, necesitamos ciudadanos y ciudadanas capaces de comprender la evolución y utilizar estos conocimientos para tomar decisiones informadas y diseñar soluciones que tengan en cuenta procesos evolutivos importantes.

Aunque la evolución se reconoce como un principio unificador central en biología que

## METODOLOGÍA

### 2.1 Revisión sistemática de la literatura

es esencial para la alfabetización científica necesaria para abordar estos problemas sociales y, en consecuencia, para promover el desarrollo sostenible (Fowler y Zeidler, 2016; National Academy of Sciences, 1998; National Research Council [NRC], 2007, 2012; Sadler, 2005), numerosos estudios internacionales han demostrado que la mayoría de los ciudadanos y ciudadanas no comprenden y/o aceptan la evolución biológica (Athanasίου y Mavrikaki, 2014; Kuschmierz et al., 2020; Nehm et al., 2009; Sickel y Friedrichsen, 2013; To et al., 2017).

Por ello, varias instituciones han propuesto que la evolución se explore en el marco de temas relacionados con la actualidad y la vida cotidiana de los estudiantes (Associação Portuguesa de Biologia Evolutiva [APBE], 2012; National Association of Biology Teachers [NABT], 2008; NRC, 2012; National Science Teaching Association [NSTA], 2003).

Así, aunque algunos estudios han analizado cómo los estudiantes utilizan la evolución para razonar sobre algunas CSC (Fowler y Zeidler, 2016; Sadler, 2005), hasta donde sabemos, ningún estudio ha revisado cómo se ha explorado la evolución a través del enfoque CSC.

Además, no se dispone de información sobre cómo la educación evolutiva a través de un enfoque CSC permite el desarrollo de las competencias clave en sostenibilidad. A través del presente estudio, pretendemos abordar esta falta de conocimiento respondiendo a las siguientes preguntas de investigación:



¿Cómo se explora la evolución con un enfoque CSC?



¿Cómo contribuye la enseñanza-aprendizaje de la evolución biológica a través de un enfoque CSC al desarrollo de las competencias clave en sostenibilidad?

Para responder a nuestras preguntas de investigación, realizamos una revisión sistemática de la literatura (Snyder, 2019). Se eligió la base de datos Scopus como fuente de datos, ya que es una de las bases más extendidas y multidisciplinarias, y contiene una de las mayores fuentes de citas y resúmenes de literatura investigable (Falagas et al., 2008).

Para buscar estudios sobre la enseñanza y aprendizaje de la evolución biológica, además de las variantes de “evolución”, utilizamos un conjunto de palabras clave que se basaban en las dimensiones relacionadas con enseñar y aprender evolución, identificadas en estudios anteriores, recurriendo a aquellas estrictamente relacionadas con la evolución (las categorías y algunas subcategorías fueron definidas por Sá-Pinto et al., 2021) y con los mecanismos evolutivos y la evolución humana.

El resultado fueron los siguientes términos de búsqueda (en inglés), siempre usados en combinación: ‘*evolution*’, ‘*evolutionary*’, ‘*history of life*’, ‘*evidence of evolution*’, ‘*mechanisms of evolution*’, ‘*studying evolution*’, ‘*natural selection*’, ‘*sexual selection*’, ‘*artificial selection*’, ‘*genetic drift*’ and ‘*human evolution*’. La traducción de estos términos al castellano sería: “*evolución*”, “*evolutivo*”, “*historia de la vida*”, “*pruebas de la evolución*”, “*mecanismos de la evolución*”, “*estudio de la evolución*”, “*selección natural*”, “*selección sexual*”, “*selección artificial*”, “*deriva genética*” y “*evolución humana*”.

Para buscar estudios sobre CSC, combinamos las palabras clave “cuestiones sociocientíficas” (*socioscientific issues*, en inglés) y “cuestiones socio-científicas” (*socio-scientific issues*, en inglés), ya que en la bibliografía se utilizan ambas nomenclaturas. Por último, para buscar estudios relacionados con las competencias para la sostenibilidad, utilizamos los términos de búsqueda ‘*sustainability*’, ‘*sustainable*’, ‘*sustainable development*’, ‘*education for sustainability*’ y ‘*competencies for sustainability*’; en castellano: “*sostenibilidad*”, “*sostenible*”, “*desarrollo sostenible*”, “*educación para la sostenibilidad*” y “*competencias para la sostenibilidad*”.

Realizamos dos búsquedas distintas:

#### Búsqueda 1

Para responder a la primera pregunta de la investigación, realizamos una búsqueda utilizando las palabras clave relacionadas con la educación sobre la evolución y las CSC.

## Búsqueda 2

Para responder a la segunda pregunta de investigación, realizamos una búsqueda utilizando palabras clave relacionadas con los tres temas explorados en este estudio.

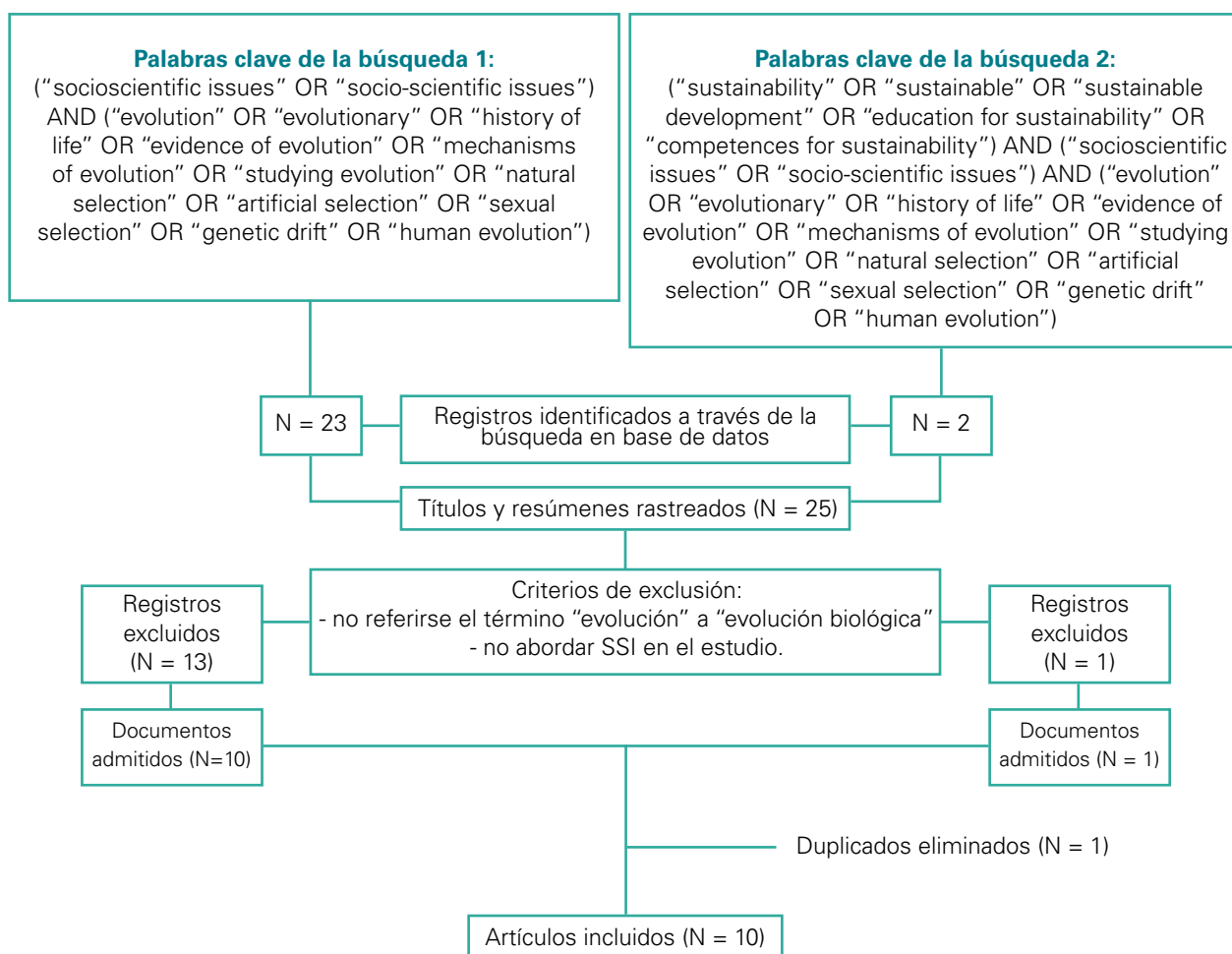
Se buscaron todas las palabras presentes en el título, el resumen o las palabras clave. No se impusieron restricciones temporales al realizar la búsqueda.

Se leyeron todos los resúmenes de todos los resultados de la búsqueda, y se excluyeron de los análisis posteriores todos los artículos que no hacían referencia a la evolución biológica o que no exploraban las CSC a pesar de referirse a ellas.

La figura 1 presenta todas las fases de selección de artículos para las dos búsquedas realizadas.

**Figura 1**

Fases de la revisión sistemática de la literatura



## 2.2 Análisis de los documentos

Para responder a la primera pregunta de la investigación, identificamos las dimensiones de la enseñanza-aprendizaje sobre evolución abordadas en los artículos sobre evolución y CSC. A continuación, se determinó qué CSC se analizaban en esos artículos. Para responder a la segunda pregunta de la investigación, tratamos de determinar qué competencias clave en materia de sostenibilidad se trataban en esos mismos artículos.

Para identificar qué dimensiones de la evolución se exploraban en los trabajos recuperados, utilizamos las categorías FACE (Framework to Assess the Coverage of biological Evolution by school curricula) (Sá-Pinto et al., 2021) como categorías de análisis: i) historia de la vida; ii) evidencias de la evolución; iv) mecanismos

de la evolución; v) estudio de la evolución.

Excluimos la “*naturaleza de la ciencia*” y el “*desarrollo de prácticas científicas*”, ya que estas dimensiones pueden explorarse en diversas disciplinas (NRC, 2012).

Para analizar qué CSC se incluían en los artículos recuperados, establecimos las categorías de análisis de forma inductiva, basándonos en la lectura flotante de los artículos recuperados (Merriam, 2009). Para comprobar cómo los estudios recuperados abordaban las competencias en sostenibilidad, hemos utilizado las competencias clave definidas por Wiek et al. (2011) como categorías de análisis. Para definir mejor estas categorías, utilizamos las características de análisis descritas por Juuti et al. (2021; véase Tabla 1).

**Tabla 1**

Marco de análisis de las competencias clave en sostenibilidad

Competencias clave (categorías)	Características de análisis
1. <b>Competencia de pensamiento sistémico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Reconocer y comprender relaciones;</li> <li>● Analizar sistemas complejos;</li> <li>● Reflexionar sobre la integración de los sistemas en diferentes ámbitos y a diferentes escalas;</li> <li>● Lidar con la incertidumbre.</li> </ul>
2. <b>Competencia anticipatoria</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Comprender y evaluar distintos escenarios futuros (posibles, probables y deseables);</li> <li>● Crear visiones propias del futuro;</li> <li>● Aplicar el principio de precaución;</li> <li>● Evaluar las consecuencias de las acciones;</li> <li>● Afrontar el riesgo y el cambio.</li> </ul>
3. <b>Competencia normativa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Comprender y reflexionar sobre las normas y valores que subyacen a las acciones de las personas;</li> <li>● Negociar valores, principios, propósitos y objetivos de sostenibilidad (en un contexto de conflictos de intereses y concesiones).</li> </ul>
4. <b>Competencia estratégica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Desarrollar y aplicar colectivamente acciones innovadoras que promuevan la sostenibilidad (a escala local y en contextos más amplios).</li> </ul>
5. <b>Competencia interpersonal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ser capaz de aprender de los demás;</li> <li>● Comprender y respetar las necesidades, perspectivas y acciones de los demás (empatía);</li> <li>● Comprender, relacionarse y ser sensible a los demás (liderazgo empático);</li> <li>● Gestionar los conflictos del grupo;</li> <li>● Facilitar la colaboración y la participación en la resolución de problemas.</li> </ul>

Nota: Competencias clave tal y como aparecen definidas en Wiek et al. (2011) y en combinación con las características de análisis descritas por Juuti et al. (2021).

Todos los artículos fueron analizados por dos investigadores/as y caracterizados en base a la presencia o ausencia de las categorías citadas. Se registraron el número y los ejemplos de pruebas encontrados en cada artículo. La fiabilidad entre evaluadores/as se determinó como el porcentaje de acuerdo inicial entre investigadores/as (McHugh, 2012), en cuanto a las competencias clave en sostenibilidad encontradas en cada trabajo.

La fiabilidad entre evaluadores/as fue superior al 90% para todas las competencias clave analizadas, lo que supera con creces el umbral del 70% que se considera aceptable para este tipo de análisis (Stemler, 2004, p. 3). Aquellos casos en que hubo discrepancia entre los dos investigadores/as, se discutieron por separado y, a falta de consenso, se eliminaron de los análisis.

## RESULTADOS

La Búsqueda 1 arrojó un total de 23 resultados. Tras leer todos los resúmenes, se excluyeron del análisis posterior 13 de estos 23 artículos de la Búsqueda 1, por no hacer referencia al término evolución como evolución biológica o por no abordar alguna CSC. La Búsqueda 2 arrojó dos resultados, uno de los cuales se excluyó del análisis posterior porque se observó que en el resumen el término evolución no se utilizaba para referirse a la evolución biológica.

El otro (Fried et al., 2020) también se obtuvo como resultado de la Búsqueda 1. Por lo tanto, en lo sucesivo nos limitaremos a mencionar los resultados obtenidos en la Búsqueda 1. Todos los artículos incluidos en este estudio se enumeran y organizan por orden cronológico en el Apéndice A. (disponible en

De los diez artículos analizados, solo siete describían actividades que tenían lugar en el entorno del aula. De los tres restantes, uno describía enfoques educativos sobre la enseñanza de la evolución y sus implicaciones legales (Hermann, 2013), mientras que dos exploraban cómo los estudiantes utilizaban los conocimientos sobre evolución para argumentar individualmente

sobre algunas CSC (Fowler y Zeidler, 2016; Sadler, 2005).

De las siete actividades descritas que tienen lugar en las aulas, una exploraba las ideas, preocupaciones y enfoques del profesorado en formación para enseñar CSC y ciencia negada por la sociedad (Borgerding y Dagistan, 2018), mientras que tres estudiaban la argumentación de CSC a través de actividades grupales destinadas a educación secundaria (Anisa et al., 2020a; Anisa et al., 2020b; Anisa et al., 2022), dos describían actividades educativas e incluyeron la evolución como una idea central de la biología que puede informar el razonamiento sobre CSC (en secundaria: Peel et al., 2019; en educación universitaria: Yacobucci, 2013), y otro trataba sobre la creación de diseños sostenibles en la enseñanza universitaria (Fried et al., 2020).

Nuestros resultados indican que ocho artículos exploraron el “*estudio de la evolución*”, siete artículos exploraron los “*mecanismos de la evolución*” y las “*pruebas de la evolución*” y seis artículos exploraron la “*historia de la vida*” (véase la Tabla 2 y ejemplos de las pruebas asignadas a cada dimensión de la evolución en el Apéndice B, disponible en

Todos los ejemplos encontrados para la dimensión “estudiar la evolución” estaban relacionados con la aplicación de la biología evolutiva en la vida cotidiana. Los procesos evolutivos explorados en los trabajos incluían la selección natural (cuatro trabajos), la selección artificial (cuatro trabajos), la generación de diversidad intraespecífica (es decir, mutaciones; cinco trabajos) y la herencia de rasgos (cuatro artículos).

Tabla 2

Dimensiones de la enseñanza-aprendizaje de la evolución encontradas en cada artículo

Artículos	Dimensiones de la enseñanza-aprendizaje de la evolución			
	Historia de la vida	Pruebas de la evolución	Mecanismos de la evolución	Estudio de la evolución
Sadler (2005)	—	●	●	—
Yacobucci (2013)	●	—	●	●
Hermann (2013)	—	—	—	—
Fowler & Zeidler (2016)	—	—	●	●
Borgerding & Dagistan (2018)	—	●	—	—
Peel et al. (2019)	●	●	●	●
Fried et al. (2020)	●	●	●	●
Anisa et al. (2020a)	●	●	●	●
Anisa et al. (2020b)	●	●	●	●
Anisa et al. (2022)	●	●	●	●

Nota:



Representa que se ha encontrado dicha dimensión en el artículo



Representa que esa dimensión NO se ha encontrado en el artículo.

En cuanto a las CSC abordadas, la más frecuente son los organismos modificados genéticamente (tres artículos: Anisa et al., 2020a; Anisa et al., 2020b; Anisa et al., 2022), seguido de la clonación (Fowler y Zeidler, 2016; Sadler, 2005), la terapia génica (Fowler y Zeidler, 2016; Sadler, 2005), el uso de antibióticos (Fowler y Zeidler, 2016; Peel et al., 2019) y la evolución (Hermann, 2013; Yacobucci, 2013) con la misma frecuencia (dos artículos cada uno).

La enseñanza de la evolución fue la CSC menos

mencionada (un artículo: Borgerding y Dagistan, 2018). Destacamos el hecho de que algunos autores consideran la evolución en sí misma como CSC, mientras que otros hacen hincapié en que es la *enseñanza* de la evolución la que representa una CSC. La existencia de posiciones encontradas en la sociedad sobre si debe enseñarse o no la evolución y las objeciones religiosas de los estudiantes y sus familias, puede crear conflictos en el aula (Borgerding y Dagistan, 2018).

Por lo que respecta a las competencias clave en sostenibilidad, nuestros resultados indican que se encontraron con frecuencia las competencias normativas e interpersonales en los documentos analizados, mientras que la competencia estratégica se abordó raramente (Tabla 3; véanse ejemplos de las pruebas asignadas a cada una de las competencias clave en el Apéndice B disponible en [el Apéndice B](#)). El número medio de competencias clave abordadas en cada documento fue de 1,8 (véase la figura 2) y la moda, una única competencia (cuatro trabajos). En dos de los trabajos que no describían una actividad en el

aula como tal (Herman, 2013; y Sadler, 2005), no se abordaba ninguna competencia. Además, en otros documentos (Yacobucci, 2013; y Anisa et al., 2022) se identificaron hasta cuatro competencias. La competencia estratégica sólo se encontró en el único documento obtenido en la búsqueda 2, que incluía los tres temas abordados en este estudio (sostenibilidad, CSC y evolución). De hecho, también fue la única competencia identificada en este estudio (Fried et al., 2020).

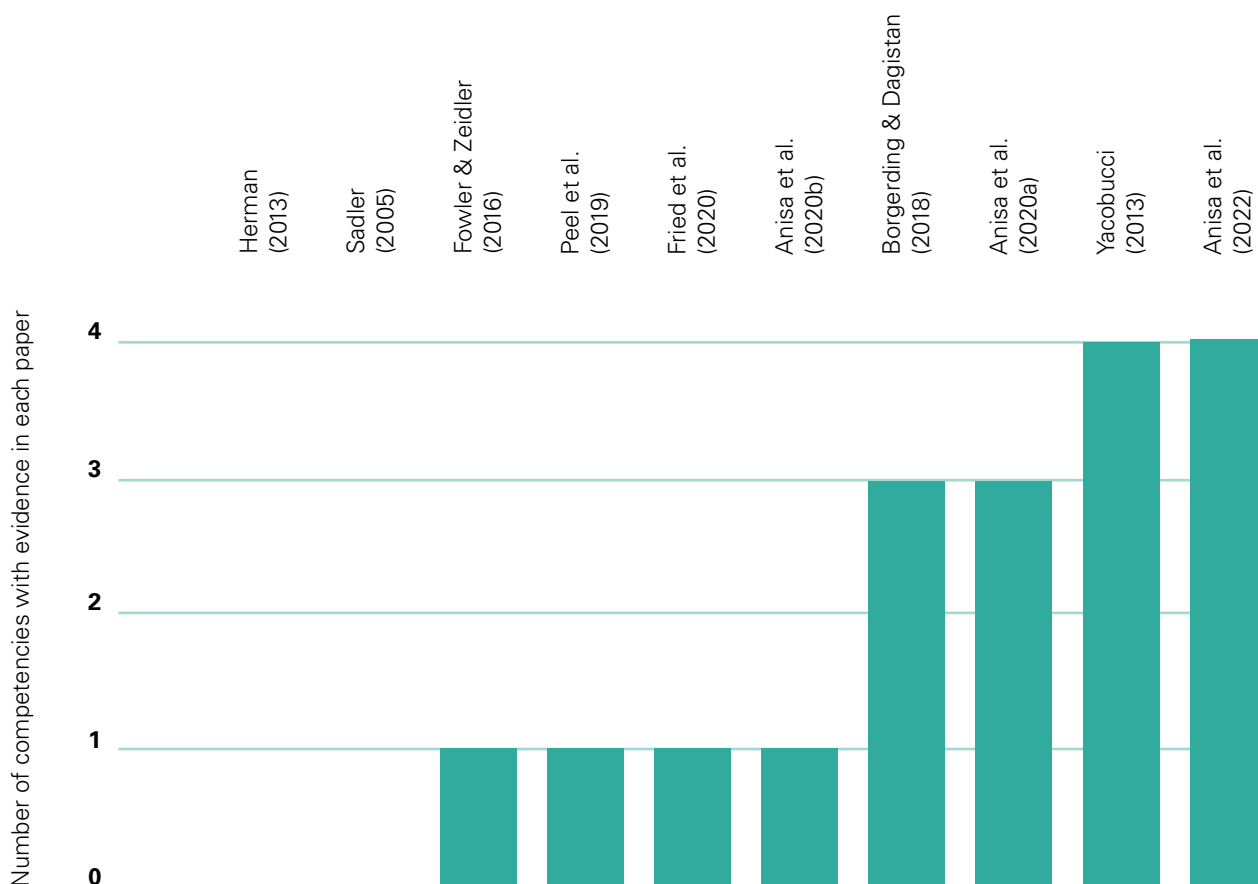
**Tabla 3**  
Número de artículos con pruebas para cada competencia clave en sostenibilidad y número total de pruebas encontradas.

Competencias clave	Número de artículos (N=10)	Número total de referencias encontradas	Interfiabilidad
1. Competencia en pensamiento sistémico	5	8	0.92
2. Competencia anticipatoria	3	3	0.97
3. Competencia normativa	4	11	0.90
4. Competencia estratégica	1	3	0.97
5. Competencia interpersonal	5	15	0.97

Nota: N representa el número total de artículos analizados

**Figura 2**

Número de competencias en sostenibilidad identificadas en cada artículo de los 10 artículos analizados



## DISCUSIÓN

Uno de los resultados más sorprendentes de nuestra revisión bibliográfica fue el escaso número de artículos encontrados, especialmente cuando buscamos estudios que mencionen simultáneamente la educación para la sostenibilidad, las CSC y la enseñanza-aprendizaje de la evolución biológica.

Estos resultados ponen de manifiesto el vacío de conocimientos que existe en torno a este tema y la importancia de realizar más estudios sobre cómo promover la educación para la sostenibilidad explorando las CSC desde una

perspectiva evolutiva.

En cuanto a nuestra primera pregunta de investigación, a pesar de nuestra sobrerrepresentación de palabras clave relacionadas con los mecanismos de la evolución, encontramos pruebas de todas las dimensiones importantes para la formación sobre evolución biológica (como se describe en Sá-Pinto et al., 2021).

Curiosamente, ocho artículos abordaban el “estudio de la evolución”, que se relacionaba más precisamente con la aplicación de la

biología evolutiva en la vida cotidiana. Este resultado concuerda con las conclusiones y la recomendación de Sadler (2005) de que la enseñanza de la evolución debe incluir una atención explícita a cómo puede o no puede utilizarse en el contexto de cuestiones sociales relevantes y/o controvertidas, ya que la comprensión de la evolución por parte de los estudiantes influye mucho en su toma de decisiones relacionadas con CSC. Por otra parte, la mitad de los trabajos parecen haber explorado todas las dimensiones de la enseñanza-aprendizaje de la evolución, lo que respalda el potencial de las CSC en la educación sobre la evolución.

Nuestros resultados también revelan una diversidad muy baja entre las CSC que se abordaron para explorar la evolución. Así, aunque la evolución está relacionada con muchos de los complejos problemas de sostenibilidad actuales (por ejemplo, la salud humana, la conservación de la biodiversidad y la seguridad alimentaria) (Carroll et al., 2014), la mayoría de los temas se centraban en el ámbito de la biotecnología.

Según Nehm y Rigdway (2011), el alumnado es sensible a las características superficiales de una situación/problema. Dependiendo de la situación o ser vivo que se presente, los estudiantes pueden activar diferentes ideas acerca de la evolución. En línea con lo anterior, el estudio de Peel et al. (2019) sobre la resistencia a los antibióticos y la selección natural, también reveló que los alumnos y alumnas podían explicar correctamente la resistencia a los antibióticos, o bien la selección natural, pero tenían dificultades para aplicar esa comprensión del proceso a otros contextos. En consecuencia, si no exploramos diversas CSC desde una perspectiva evolutiva, corremos el riesgo de fracasar en nuestra misión de facilitar a los estudiantes su comprensión y uso de estrategias informadas por la evolución para hacer frente a este tipo de problemas.

Una gran diversidad de CSC exploradas para estudiar la evolución beneficiaría la comprensión de los estudiantes y la posterior generalización de sus conceptos a otros contextos (Nehm y Rigdway,

2011) y fomentar su capacidad para utilizar estos conocimientos en la construcción de soluciones a largo plazo para estos problemas (Carroll et al., 2014). En este sentido, las propuestas educativas recogidas en este libro representan una importante contribución, pues aumentan considerablemente la diversidad de CSC a abordar, incluyendo nuevos problemas como los relacionados con la salud humana y la evolución (capítulos 7 y 11), la gestión de los recursos de uso común (capítulo 8) y el declive de los polinizadores (capítulo 10).

En cuanto a nuestra segunda pregunta de investigación, a pesar del escaso número de artículos disponibles que describen actividades educativas que tienen lugar en las aulas, nuestros resultados apoyan que explorar la evolución a través de CSC puede de hecho promover el desarrollo de competencias clave en sostenibilidad. Lo que es más, en los trabajos analizados se encontraron pruebas de la exploración pedagógica de todas las competencias clave en sostenibilidad, tal y como las definen Wiek et al. (2011); si bien es verdad que algunas se encontraron con más frecuencia que otras.

La elevada frecuencia observada de las competencias normativas e interpersonales era de esperar, ya que el enfoque CSC requiere que los estudiantes participen en diálogos, discusiones, debates y argumentaciones, e integra componentes éticos implícitos y/o explícitos que exigen cierto grado de razonamiento moral (Zeidler y Sadler, en prensa).

Estas características incrementan las oportunidades para que el alumnado comprenda y reflexione sobre las normas y los valores que guían las acciones de las personas, proporcionando así oportunidades que promueven la comprensión y el respeto por las perspectivas, las necesidades y las acciones de otras personas. Además, el enfoque CSC hace hincapié en la formación ética y el desarrollo personal como objetivo pedagógico a largo plazo (Zeidler y Sadler, en prensa), y que consideramos muy alineadas con estas competencias.

En particular, la competencia estratégica

sólo se observó en la actividad descrita por Fried et al. (2020), que combinaba el enfoque CSC con el aprendizaje basado en el diseño (ABD). Para desarrollar esta competencia, los estudiantes deben diseñar y aplicar colectivamente intervenciones, estrategias y acciones que fomenten la sostenibilidad. De hecho, se espera que la combinación de CSC con enfoques educativos en los que se espera que los estudiantes desarrollen un producto o una solución (por ejemplo, ABD, aprendizaje basado en proyectos, o aprendizaje basado en problemas) mejore aún más el desarrollo de esta competencia.

Para algunas de las competencias clave, los documentos analizados describían actividades que, a pesar de representar oportunidades claras para desarrollar competencias clave en sostenibilidad, no se consideraron pruebas de las mismas, ya que el trabajo no se realizaba colectivamente, que es un requisito para la mayoría de las competencias clave (Wiek et al., 2011). Un ejemplo puede verse en el trabajo de Fowler y Zeidler (2016), que preguntaron individualmente, a cada alumno/a participante *“identifique individualmente las posibles consecuencias de cada [hipótesis] y determine la probabilidad de que se produzca cada una de ellas antes de elegir la opción más razonable”*.

Aunque esta tarea muestra un gran potencial para desarrollar la competencia anticipatoria, esta requiere de un enfoque colectivo para construirse (Wiek et al., 2011). Una situación similar se observó en el trabajo de Peel et al. (2019), en el que *“cada estudiante desarrolló una política para abordar la resistencia a los antibióticos a nivel local, nacional, o internacional”*. Una vez más, aunque esta actividad tiene un gran potencial para desarrollar la competencia estratégica, no hemos podido considerarla porque no se ha realizado de forma grupal.

Estos ejemplos ponen de manifiesto la importancia de fomentar el trabajo colaborativo para lograr y desarrollar competencias clave en materia de sostenibilidad. Estas observaciones también plantean la cuestión de hasta qué punto

estas definiciones deberían incluir la dimensión del trabajo en colaboración. En concreto, en la (2018) redefinición de las competencias en sostenibilidad de Wiek et al. (2011), se eliminó la necesidad de una dimensión colaborativa en la mayoría de estas competencias.

Sin embargo, se incluyó la colaboración como una competencia clave nueva e independiente en materia de sostenibilidad, reforzando así su importancia.

Según la UNESCO (2018), esta competencia se define como *“la capacidad de aprender de los demás; comprender y respetar las necesidades, perspectivas y acciones de los demás (empatía); comprender, relacionarse ser sensible a los demás (liderazgo empático), abordar los conflictos en un grupo y facilitar la resolución de problemas de forma colaborativa y participativa”* (p. 44). Asimismo, al tratarse de uno de los métodos para la educación para el desarrollo sostenible, la UNESCO propone la participación en proyectos colaborativos del mundo real, a través de proyectos de aprendizaje-servicio o campañas sobre diversos temas de sostenibilidad.

Esta división entre la competencia colaborativa y las demás competencias también se observa en el marco de aprendizaje basado en la experiencia para desarrollar competencias de sostenibilidad, propuesto por Caniglia et al. (2016). En este estudio, centrado en estudiantes universitarios, la competencia clave del trabajo colaborativo tiene un papel destacado y objetivos de aprendizaje específicos. Tanto si el trabajo colaborativo se incluye en las competencias clave en sostenibilidad como si se define como una competencia independiente, parece existir un acuerdo general sobre la importancia de fomentar la colaboración en la educación para el desarrollo sostenible.

Por lo tanto, hacemos hincapié en su relevancia para las futuras prácticas docentes.

Nuestro trabajo tiene varias limitaciones que pueden haber impedido la identificación del potencial de explorar CSC a través de una perspectiva evolutiva para promover la educación

para la sostenibilidad. En este estudio se identificó un número muy reducido de estudios, lo que probablemente se deba a que la revisión bibliográfica se realizó utilizando una base de datos académica que no se espera que abarque todas las publicaciones sobre prácticas educativas escritas para profesionales no académicos (por ejemplo, educadores formales y no formales).

Por tanto, se sugiere que en próximos estudios destinados a ampliar el presente trabajo deberían abarcar otras bases de datos, incluidas las bases de datos de recursos utilizadas por el profesorado y otros profesionales de la educación, formal o no. Por otra parte, al recurrir a las competencias clave en sostenibilidad definidas por Wiek et al. (2011) -que incluyen una dimensión de trabajo colaborativo en la definición de casi todas las competencias-, como marco de análisis, es posible que hayamos subestimado su presencia y frecuencia en los trabajos estudiados.

## ASPECTOS A DESTACAR DE CARA A LA PRÁCTICA DOCENTE Y LA INVESTIGACIÓN

En este estudio, hemos comprobado que la enseñanza de la evolución a través del enfoque CSC podría contribuir a fomentar el desarrollo de competencias clave en materia de sostenibilidad.

Sin embargo, en lo que respecta a la enseñanza de la evolución, nuestros resultados refuerzan la necesidad de diversificar las CSC exploradas desde una perspectiva evolutiva, para permitir a los estudiantes lograr una mejor comprensión de la evolución, tomar decisiones con conocimiento de causa y desarrollar soluciones innovadoras y eficaces para los problemas de la vida cotidiana.

También encontramos una falta de estudios

científicos que exploren cómo la evolución, cuando se explora a través de un enfoque CSC, puede contribuir al desarrollo de competencias clave en sostenibilidad, ya que muy pocos trabajos mencionan simultáneamente la educación para la sostenibilidad, CSC y el aprendizaje de la evolución.

Estos resultados sugieren que esta línea de investigación sigue estando poco explorada, lo que respalda la importancia de desarrollar futuras investigaciones y actividades educativas en torno a estos temas.

También es crucial seguir desarrollando todas las competencias clave en materia de sostenibilidad, prestando especial atención a aquellos aspectos menos desarrollados y que solo se encontraron cuando se combinaron otros enfoques pedagógicos (por ejemplo, la competencia anticipatoria y la competencia estratégica). En concreto, la competencia anticipatoria puede desarrollarse mediante debates y predicciones fundamentadas de los resultados evolutivos esperados en determinados contextos biológicos.

Esto puede lograrse debatiendo CSC como el uso de antibióticos, la gestión de plagas y brotes de enfermedades, la conservación de especies y los problemas de seguridad alimentaria. Además, tanto esta competencia como la competencia estratégica pueden abordarse en el marco del aprendizaje basado en proyectos o problemas, proponiendo y evaluando soluciones para estos problemas.

Igualmente, este estudio reveló la importancia de fomentar el trabajo colaborativo para promover el desarrollo de competencias en sostenibilidad. Aunque este aspecto puede no ser esencial para desarrollar todas las competencias, es sin duda un elemento clave para alcanzar plenamente los objetivos relacionados con la sostenibilidad que debería tenerse en cuenta en el diseño de futuras actividades educativas.

El trabajo en colaboración puede ampliarse fuera del aula. Para ello, proponemos que los docentes involucren a la comunidad investigadora

y a otras partes interesadas externas a las escuelas en sus actividades educativas, para promover un aprendizaje colaborativo, significativo y contextualizado en la resolución de problemas reales.

Por otro lado, también reconocemos que el enfoque CSC puede no ser el único que permita el desarrollo de competencias clave en sostenibilidad. Así pues, también se requieren estudios futuros que exploren cómo otros enfoques pueden mejorar simultáneamente la enseñanza y el aprendizaje de la evolución y el desarrollo de las competencias pertinentes.

## REFERENCIAS

- Abd-El-Khalick, F. (2003). Socioscientific issues in pre-college science classrooms. In Zeidler, D.L. (Eds), *The role of moral reasoning on socioscientific issues and discourse in science education* (pp. 41–61). Springer.
- Anisa, A., Widodo, A., Riandi, R., & Muslim, M. (2020a). Exploring the rebuttal argument complexity of genetics in students through socio scientific issues using scientific writing heuristic (SWH). *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(5), 3660–3669.
- Anisa, A., Widodo, A., Riandi, R., & Muslim, M. (2020b). Analyzing socio scientific issues through algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, 1469(1), 012084.
- Anisa, A., Widodo, A., Riandi, R., & Muslim, M. (2022). Students' argumentation in science lessons. *Science & Education*.
- Associação Portuguesa de Biologia Evolutiva. (2012). APBE. Retrieved September 14, 2022, from
- Athanasiou, K., & Mavrikaki, E. (2014). Conceptual inventory of natural selection as a tool for measuring Greek University Students' evolution knowledge: Differences between novice and advanced students. *International Journal of Science Education*, 36(8), 1262–1285.
- Borgerding, L. A., & Dagistan, M. (2018). Preservice science teachers' concerns and approaches for teaching socioscientific and controversial issues. *Journal of Science Teacher Education*, 29(4), 283–306.
- Caniglia, G., John, B., Kohler, M., Bellina, L., Wiek, A., Rojas, C., Laubichler, M. D., & Lang, D. (2016). An experience-based learning framework. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 17(6), 827–852.
- Carroll, S. P., Jørgensen, P. S., Kinnison, M. T., Bergstrom, C. T., Denison, R. F., Gluckman, P., Smith, T. B., Strauss, S. Y., & Tabashnik, B. E. (2014). Applying evolutionary biology to address global challenges. *Science*, 346(6207).
- Clarkeburn, H. (2002). A test for ethical sensitivity in science. *Journal of Moral Education*, 31(4), 439–453.
- Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2002). *Research methods in education*. Routledge.
- De Haan, G. (2006). The BLK '21' programme in Germany: A 'Gestaltungskompetenz'-based model for education for sustainable development. *Environmental Education Research*, 12(1), 19–32.
- Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A., & Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses. *The FASEB Journal*, 22(2), 338–342.
- Fowler, S. R., & Zeidler, D. L. (2016). Lack of evolution acceptance inhibits students' negotiation of biology-based socioscientific issues. *Journal of Biological Education*, 50(4), 407–424.
- Fowler, S. R., Zeidler, D. L., & Sadler, T. D. (2009). Moral sensitivity in the context of socioscientific issues in high school science students. *International Journal of Science Education*, 31(2), 279–296.
- Fried, E., Martin, A., Esler, A., Tran, A., & Corwin, L. (2020). Design-based learning for a sustainable future: Student outcomes resulting from a biomimicry curriculum in an evolution course. *Evolution: Education and Outreach*, 13(1), 1–22.
- Friedrichsen, P. J., Sadler, T. D., Graham, K., & Brown, P. (2016). Design of a socio-scientific issue curriculum unit: Antibiotic resistance, natural selection, and modeling. *International Journal of Designs for Learning*, 7(1), 1–18.
- Hermann, R. S. (2013). On the legal issues of teaching evolution in public schools. *The American Biology Teacher*, 75(8), 539–543.
- Hogan, K. (2002). Small groups' ecological reasoning while making an environmental management decision. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 39(4), 341–368.
- Hsieh, H. F., & Shannon, S. E. (2005). Three approaches to qualitative content analysis. *Qualitative Health Research*, 15(9), 1277–1288.
- Jørgensen, P. S., Folke, C., & Carroll, S. P. (2019). Evolution in the Anthropocene: Informing governance and policy. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50(1), 527–546.
- Juuti, K., Andrade, A. I., Araújo e Sá, M. H., Batista, B., Carlos, V., Caruana, V., Costa, N., Dauksienė, E., François, D., Gonçalves, M., Häkkinen, M., Lavonen, J., Lebouvier, B., Lopes, B., Loukomies, A., Lourenço, M., Machado, J., Martins, F., Mendes, A., ... Voisin, C. (2021). *Framework for education for sustainability: enhancing competences in education*. UA Editora.
- Khishfe, R., & Lederman, N. (2006). Teaching nature of science within a controversial topic: *Integrated versus non integrated*. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 43(4), 395–418.
- Kolstø, S. D. (2006). Patterns in students' argumentation confronted with a risk-focused socio-scientific issue. *International Journal of Science Education*, 28(14), 1689–1716.
- Krippendorff, K. (2018). *Content analysis: An introduction to its methodology*. Sage Publications.

- Kuschmierz, P., Meneganzin, A., Pinxten, R., Pievani, T., Cvetković, D., Mavrikaki, E., Graf, D., & Beniermann, A. (2020). Towards common ground in measuring acceptance of evolution and knowledge about evolution across Europe: A systematic review of the state of research. *Evolution: Education and Outreach*, 13(1).
- Lee, H., Chang, H., Choi, K., Kim, S. W., & Zeidler, D. L. (2012). Developing character and values for global citizens: Analysis of pre-service science teachers' moral reasoning on socioscientific issues. *International Journal of Science Education*, 34(6), 925–953.
- Lee, H., Yoo, J., Choi, K., Kim, S. W., Krajcik, J., Herman, B. C., & Zeidler, D. L. (2013). Socioscientific issues as a vehicle for promoting character and values for global citizens. *International Journal of Science Education*, 35(12), 2079–2113.
- Matthews, B., Jokela, J., Narwani, A., Räsänen, K., Pomati, F., Altermatt, F., Spaak, P., Robinson, C. T., & Vorburger, C. (2020). On Biological Evolution and Environmental Solutions. *Science of The Total Environment*, 724, 138194.
- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: The kappa statistic. *Biochemia Medica*, 22(3), 276–282.
- Merriam, S. B. (2009). *Qualitative research. A guide to design and implementation*. Jossey-Bass.
- National Academy of Sciences (US) Working Group on Teaching Evolution. (1998). *Teaching about evolution and the nature of science*. Joseph Henry Press.
- National Association of Biology Teachers. (2008). *Welcome to NABT*. National Association of Biology Teachers. Retrieved September 29, 2022, from <https://nabt.org/>
- National Research Council. (2012). *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, DC: The National Academies Press.
- National Science Teachers Association [NSTA]. (2003). *The teaching of evolution*. NSTA. Retrieved September 29, 2022, from
- Nehm, R. H., & Ridgway, J. (2011). What do experts and novices "see" in evolutionary problems? *Evolution: Education and Outreach*, 4(4), 666–679.
- Nehm, R. H., Kim, S. Y., & Sheppard, K. (2009). Academic preparation in biology and advocacy for teaching evolution: Biology versus non-biology teachers. *Science Education*, 93(6), 1122–1146.
- Peel, A., Zangori, L., Friedrichsen, P., Hayes, E., & Sadler, T. (2019). Students' model-based explanations about natural selection and antibiotic resistance through socio-scientific issues-based learning. *International Journal of Science Education*, 41(4), 510–532.
- Sadler, T. D. (2005). Evolutionary theory as a guide to socioscientific decision-making. *Journal of Biological Education*, 39(2), 68–72.
- Sadler, T. D., Foulk, J. A., & Friedrichsen, P. J. (2017). Evolution of a model for socio-scientific issue teaching and learning. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 5(2), 75–87.
- Sá-Pinto, X., Realdon, G., Torkar, G., Sousa, B., Georgiou, M., Jeffries, A., Korfiatis, K., Paolucci, S., Pessoa, P., Rocha, J., Stasinakis, P. K., Cavadas, B., Crottini, A., Gnidovec, T., Nogueira, T., Papadopoulou, P., Piccoli, C., Barstad, J., Dufour, H. D., ... Mavrikaki, E. (2021). Development and validation of a framework for the assessment of school curricula on the presence of evolutionary concepts (face). *Evolution: Education and Outreach*, 14(1).
- Sickel, A. J., & Friedrichsen, P. (2013). Examining the evolution education literature with a focus on teachers: Major findings, goals for teacher preparation, and directions for future research. *Evolution: Education and Outreach*, 6(1), 1–15.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.
- Stemler, S. E. (2004). A comparison of consensus, consistency, and measurement approaches to estimating interrater reliability. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 9(1), 4.
- To, C., Tenenbaum, H. R., & Hogh, H. (2017). Secondary school students' reasoning about evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(2), 247–273.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development | department of economic and social affairs*. United Nations. Retrieved September 14, 2022, from
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO]. (2018). *Issues and Trends in Education for Sustainable Development*. In *UNESCO Publishing*.
- Venville, G. J., & Dawson, V. M. (2010). The impact of a classroom intervention on grade 10 students' argumentation skills, informal reasoning, and conceptual understanding of science. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(8), 952–977.

- Wang, H. H., Hong, Z. R., Liu, S. C., & Lin, H. S. (2018). The impact of socio-scientific issue discussions on student environmentalism. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 14(12), em1624.
- Wiek, A., J. Bernstein, M., W. Foley, R., Cohen, M., Forrest, N., Kuzdas, C., Kay, B., & Withycombe Keeler, L. (2015). Operationalising competencies in higher education for sustainable development. In Barth, M., Michelsen, G., Rieckmann, M., Thomas, I., (Eds.), *Routledge Handbook of Higher Education for Sustainable Development* (pp. 241–260). essay, Routledge, Taylor & Francis Group.
- Wiek, A., Withycombe, L., & Redman, C. L. (2011). Key competencies in sustainability: A reference framework for academic program development. *Sustainability Science*, 6(2), 203–218.
- Yacobucci, M. M. (2013). Integrating critical thinking about values into an introductory geoscience course. *Journal of Geoscience Education*, 61(4), 351–363.
- Zeidler, D. L. (2014). Socioscientific issues as a curriculum emphasis: Theory, research, and practice. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of research on science education, Volume II* (p. 697–726). Routledge.
- Zeidler, D. L., & Sadler, T. D. (2007). The role of moral reasoning in argumentation: Conscience, character, and care. *Argumentation in Science Education*, 201–216.
- Zeidler, D. L., Berkowitz, M. W., & Bennett, K. (2013). Thinking (scientifically) responsibly: The cultivation of character in a global science education community. *Contemporary Trends and Issues in Science Education*, 83–99.
- Zeidler, D. L., Herman, B. C., & Sadler, T. D. (2019). New directions in socioscientific issues research. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(1), 1–9.
- Zeidler, D. L., & Sadler, T. D. (in press). Exploring and expanding the frontiers of socioscientific issues: Crossroads and future directions. In N. G. Lederman, D. L. Zeidler, & J. S. Lederman (Eds.), *Handbook of Research on Science Education, Volume III*. Routledge.
- Zeidler, D. L., Sadler, T. D., Applebaum, S., & Callahan, B. E. (2009). Advancing reflective judgment through socioscientific issues. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(1), 74–101.
- Zohar, A., & Nemet, F. (2001). Fostering students' knowledge and argumentation skills through dilemmas in human genetics. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(1), 35–62.

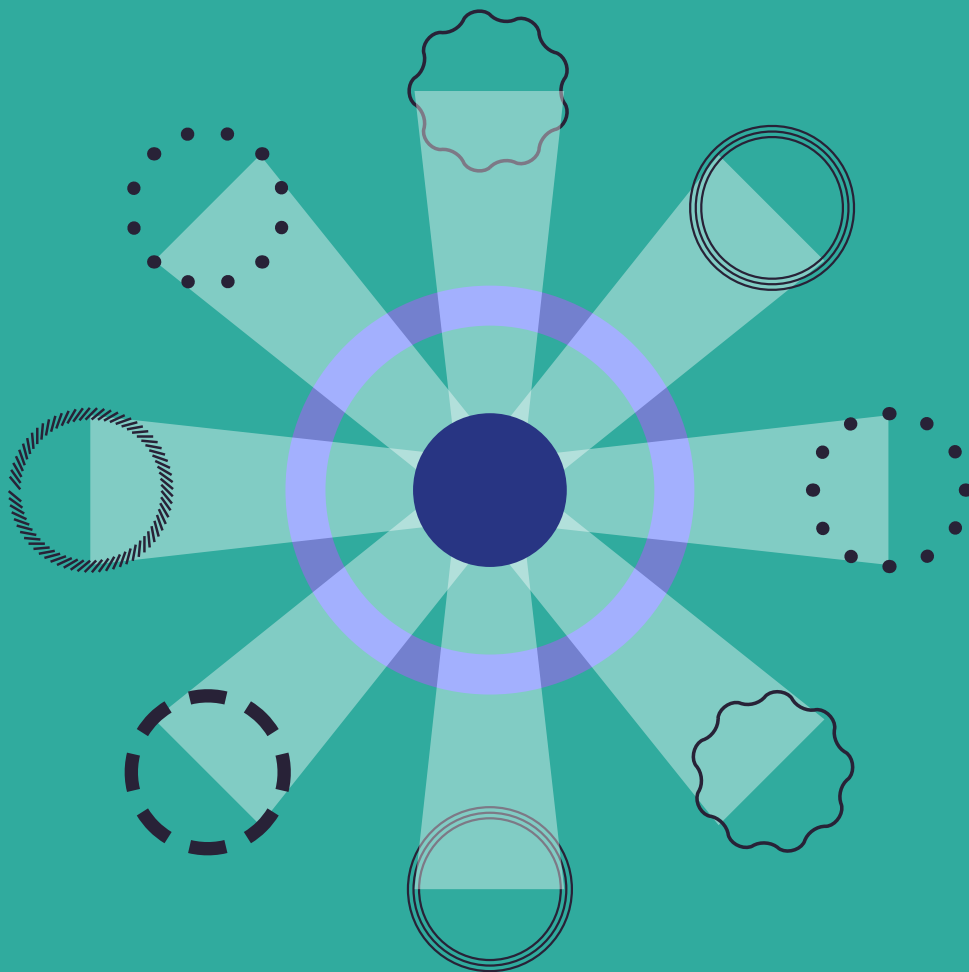
## AGRADECIMIENTOS

Patrícia Pessoa y Xana Sá-Pinto, autoras del capítulo 3, están financiadas por fondos nacionales portugueses (OE), a través de FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., en el ámbito de la beca de doctorado I.P.2020.05634 y del contrato marco previsto en los números 4, 5 y 6 del artículo 23, del Decreto-Ley 57/2016, de 29 de agosto, modificado por la Ley 57/2017, de 19 de julio, respectivamente. El trabajo también fue financiado por Fondos Nacionales a través de FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., en el marco del proyecto UIDB/00194/2020.



## Capítulo 4

# Enfoque CSC fuera de las escuelas: ¿Cómo pueden utilizarse estos enfoques en los museos de ciencia y otros contextos educativos no formales?



## Enfoque CSC fuera de las escuelas: ¿Cómo pueden utilizarse estos enfoques en los museos de ciencia y otros contextos educativos no formales?

**Martha Georgiou<sup>1</sup>,**  
**Maria João Fonseca<sup>2</sup>,**  
**Corinne Fortin<sup>3</sup>,**  
**Sébastien Turpin<sup>4</sup>,**  
**Camille Roux-Goupille<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Department of Biology, National and Kapodistrian University of Athens, *martgeor@biol.uoa.gr*

<sup>2</sup>Natural History and Science Museum of the University of Porto (MHNC-UP), *mjfonseca@mhnc.up.pt*

<sup>3</sup>Université Paris-Est Créteil, Laboratoire de didactique André Revuz Paris-Cité, *corinne.fortin@u-pec.fr*

<sup>4</sup>Muséum National d' Histoire Naturelle, Département Homme et Environnement - Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation, *sebastien.turpin@mnhn.fr*

<sup>5</sup>Université Paris-Est Créteil, Laboratoire de didactique André Revuz Paris-Cité, *croux@u-pec.fr*

### Resumen

En los últimos años, la investigación educativa ha demostrado que abordar la ciencia dentro de un contexto sociocientífico tiene múltiples beneficios para el alumnado tanto a nivel cognitivo como en términos de desarrollo personal y de las competencias. Se han realizado numerosas investigaciones sobre esta temática en la educación formal, sin embargo, pocas han sido realizadas en el ámbito de la educación no formal. En este capítulo, pretendemos proporcionar ejemplos de la aplicación de cuestiones sociocientíficas (CSC) en contextos de educación no formal, especialmente en museos. Se presentan actividades del Museo de Historia Natural de Porto, el Museo Nacional de Historia Natural de París y el Museo Zoológico de Atenas. Estas actividades se centran en un aspecto de la evolución que se está volviendo cada vez más evidente en la vida de las personas contemporáneas: la biodiversidad. La biodiversidad no es sólo un concepto biológico que las personas de todas las edades deberían conocer, sino un componente esencial de la vida. También se hace referencia a la integración de las actividades de cuestiones sociocientíficas en otros entornos de educación no formal. Finalmente, se concluye con una reflexión crítica sobre la contribución dichos entornos a la educación de CSC.

#### **PALABRAS CLAVE:**

*cuestiones sociocientíficas (CSC), educación en los museos, biodiversidad.*

## INTRODUCCIÓN

Las cuestiones sociocientíficas (CSC) ocupan un lugar central en la enseñanza de las ciencias (Sadler et al., 2016). Por esta razón, muchos investigadores de la educación contemporánea tratan de crear oportunidades de aprendizaje a través de CSC y analizar los resultados correspondientes (Evagorou et al., 2009; Ke et al., 2021).

En otras palabras, se están realizando esfuerzos para implicar al alumnado a través de cuestiones sociocientíficas de la vida real, utilizando el conocimiento escolar para formular sus opiniones, participar en diálogos y tomar decisiones informadas. La enseñanza a través de cuestiones sociocientíficas a menudo se asocia con el fortalecimiento de las habilidades de argumentación, requisito y característica integral del alumnado de hoy y de una futura ciudadanía activa (Dawson y Venville, 2010; Georgiou y Mavrikaki, 2013; Georgiou et al., 2020; Maniatakou et al., 2020).

Por las razones mencionadas anteriormente, se están realizando esfuerzos para integrar las CSC tanto en la educación formal como en la no formal. Los museos son excelentes entornos para la educación no formal, dado que ofrecen la oportunidad de desarrollar diferentes CSC para mejorar el aprendizaje. Aunque la mayoría de los museos aún no han integrado entre sus funciones la oferta de programas educativos que utilicen CSC, algunos ya lo han hecho.

En este capítulo, utilizaremos el concepto de biodiversidad directamente relacionado con la evolución como ejemplo para presentar diferentes casos de ambientes de educación no formal, especialmente museos, que han desarrollado actividades en torno a las CSC enfocadas en la biodiversidad.

## ENFOQUES CSC EN LAS CIENCIAS NATURALES: FOMENTAR ACCIONES PARA LA PRESERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD

La pérdida (y preservación) de biodiversidad es un tema complejo que se aborda desde la ciencia, pero que, al implicar dimensiones sociales, éticas y morales se convierte en una cuestión sociocientífica relevante y necesaria. El cambio climático, la contaminación, la degradación de los hábitats, la introducción de especies invasoras y la sobreexplotación de los recursos naturales son algunas de las principales causas del rápido declive de la biodiversidad (Djoghla y Dodds, 2011).

Los seres humanos somos una de las especies más ingeniosas a la hora de adaptar el entorno a nuestra voluntad - o, al menos, a nuestras necesidades -. Aunque nuestra presencia en la Tierra, desde una perspectiva geológica, es reciente, hemos logrado expandirnos por todo el planeta, creando redes culturales intrincadas y diversas, y haciendo el mundo a nuestra medida.

Nuestra existencia ha sido (altamente) azarosa y nuestra población global sigue creciendo. Actualmente los seres humanos tenemos una vida más saludable y más longeva, a pesar de existir asimetrías geográficas documentadas. Sin embargo, la acomodación de nuestro “Planeta Humano” - como describen perspicazmente Lewis y Maslin (2018) - ha tenido un gran coste. Al domesticar la naturaleza, desplazar/(re) distribuir especies por todo el mundo y agotar todos los recursos disponibles para satisfacer nuestros acelerados hábitos de consumo, hemos degradado/deforestado zonas verdes, diezmado la vida salvaje, generado océanos llenos de residuos/deshechos, liberado carbono y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera a un ritmo vergonzoso y alterado los ciclos naturales.

Todas estas acciones interfieren con las prácticas y estilos de vida de las comunidades en todo el mundo y añaden presión a los sistemas asociados. La comunidad científica considera que los efectos acumulativos de nuestras acciones han alcanzado un nivel que se equipara a otros eventos geológicos a escala planetaria en la historia de nuestro planeta, lo que respalda la definición de una nueva época impulsada por el ser humano: el

Antropoceno (Lewis y Maslin, 2018; Steffen et al., 2015).

El primer paso para revertir lo que podría describirse como nuestro camino hacia la extinción, es reconocer los efectos de nuestras acciones, elecciones y necesidades diarias. A partir de este punto, podemos prever varias soluciones, donde las más inmediatas y potencialmente efectivas requieren conocimientos técnicos y la intervención de agentes especializados. Estas soluciones incluyen la reducción de la contaminación (especialmente de las emisiones de carbono), la restauración de los ecosistemas, la recuperación de los hábitats y la aplicación de programas de reintroducción de ejemplares y conservación (Dinerstein et al., 2020; Science Task Force for the UN Decade on Ecosystem Restoration, 2021). Sin embargo, también es fundamental movilizar a la sociedad civil para que participe activamente en el proceso de cambio, en lugar de limitarse a su sensibilización. Esto requiere enfoques educativos específicos en contextos formales, no formales e informales.

Según la UNESCO<sup>1</sup> (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), “la educación es esencial para el uso sostenible y equitativo de la biodiversidad y su conservación”. Sólo promoviendo “la acción colectiva global de una sociedad educada, incluyendo los esfuerzos para promover el conocimiento local e indígena de la biodiversidad” y adoptando “un enfoque inclusivo que incluya e involucre a todas las personas” podremos asegurar un futuro para la vida en nuestro planeta.

A estas alturas, todos estamos bastante familiarizados con algunos términos en boga como biodiversidad y sostenibilidad (Eurobarómetro Especial 481, 2019). Pero, ¿estamos realmente preparados/as para tomar medidas? ¿Tenemos el conocimiento necesario y la predisposición emocional para hacerlo? Para comprender plenamente el significado de biodiversidad y entender las amenazas que enfrenta, es necesario dominar nociones abstractas y conceptos científicos, como la evolución y sus mecanismos,

la diversidad genética, el tiempo y el azar. Al igual que sucede con cualquier otra cuestión sociocientífica, es necesario recabar información de diversos campos y fuentes, y valorar la trascendencia de las posibles implicaciones de acuerdo a una amplia gama de variables derivadas de cada contexto (Sadler, 2004).

En definitiva, una cuestión sociocientífica es un tema controvertido que no tiene una única solución, sino muchas perspectivas diferentes desde las que se podrían evaluar los pros y los contras en cada caso (Sadler, 2004).

Entonces, ¿cómo podemos motivar y empoderar a personas de todos los orígenes y edades para proteger la biodiversidad? En concreto, ¿cómo pueden contribuir los espacios de aprendizaje no formal e informal (por ejemplo, museos y centros científicos), en donde la naturaleza de las interacciones es episódica y los perfiles de los visitantes son diversos?

En este capítulo presentamos el trabajo, de tres museos europeos y otros contextos extraescolares, sobre la biodiversidad a través de cuestiones sociocientíficas. Para ello, presentamos los ejemplos de:

1. El Museo de Historia Natural y Ciencias de la Universidad de Oporto (MHNC-UP) y el Salón de la Biodiversidad, un centro dedicado deliberada y completamente a la biodiversidad que ha estado abierto al público desde 2017 y en el que se emplea la museografía para fomentar el pensamiento crítico y enfoques experimentales de cuestiones sociocientíficas clave.

2. El Museo Nacional de Historia Natural de Francia, que inició el programa “Vigie-Nature” de ciencia ciudadana que incorpora cuestiones sociocientíficas. Este programa anima a todos/todas a participar en el proceso de investigación científica para adquirir nuevos conocimientos y actuar racionalmente para proteger la biodiversidad.
3. El Museo Zoológico de Atenas (museo zoológico más antiguo y rico de Grecia, fundado hace 150 años) con su programa educativo “Echa un vistazo al museo para encontrar a un/una amigo/a” diseñado en torno a una cuestión sociocientífica relacionada con la biodiversidad y ofertado desde 2019.
4. Otros contextos extraescolares que pueden permitir al alumnado acercarse a la biodiversidad desde el enfoque CSC.

## 1. El Museo de Historia Natural y Ciencias de la Universidad de Oporto: Salón de la Biodiversidad - Un viaje por la vida

Los museos de historia natural desarrollan un papel ampliamente reconocido en la documentación de la biodiversidad, el fomento de su estudio y su conservación.

Las colecciones que albergan son depósitos de datos que nos cuentan la historia de cómo ha evolucionado la vida. Sin embargo, aunque la comunidad científica y académica son muy conscientes del potencial de las colecciones de historia natural, ¿cómo puede familiarizarse con ellas el público general? ¿Cómo podemos desentrañar su historia, su significado, su valor simbólico, cultural y ambiental y su potencial, a la vez que concientizamos sobre la pérdida de la

biodiversidad y movilizamos a los/las visitantes sobre la apreciación y protección activa de la naturaleza y toda su diversidad?

Cada vez un mayor número de voces argumenta que una forma de lograr esto es despertando o reavivando la curiosidad que naturalmente tenemos sobre el mundo que nos rodea y aceptando las emociones que la biodiversidad despierta como una variable clave que influye en la calidad del aprendizaje y experiencias culturales (Mazzanti y Sani, 2021; Thomas, 2016). Además, estudios sobre enfoques transdisciplinares para promover la implicación hacia la ciencia han demostrado el papel que desempeñan las artes en la transmisión de mensajes científicos complejos con dimensiones sociales y culturales (Rossi-Linnemann y Martini, 2019).

A partir de estas premisas se concibió el Salón de Biodiversidad, una unidad del MHNC- UP que forma parte de la red nacional del centro científico Ciencia Viva, que está situada en el corazón del Jardín Botánico de la Universidad de Oporto. El Salón de la Biodiversidad se diseñó combinando arquitectura, arte y literatura, conectándolos con la biología y la historia natural. Junto con el Jardín Botánico y su colección viva, es un lugar de inspiración que insta a los visitantes a celebrar y nutrir la diversidad de la vida al tiempo que se familiarizan con el patrimonio natural y cultural.

En línea con la filosofía museográfica que guió su desarrollo -acuñada por Jorge Wagensberg (Terradas y Wagensberg, 2006)-, su exposición permanente reúne objetos reales, aforismos y metáforas, que preparan el ambiente para interacciones emocionalmente cargadas entre los/las visitantes y los propios objetos, los fenómenos abordados, y las explicaciones presentes en el espacio (Wagensberg, 2005).

El objetivo de la exposición es permitir a los/las visitantes vivir una experiencia memorable y que estén más receptivos al aprendizaje que pueda tener lugar a continuación. Y lo más importante, permitir a los/las visitantes desarrollar una opinión informada<sup>2</sup>. En palabras de Wagensberg (2015), “la

relevancia de un museo no se mide por el número de visitantes que recibe, sino por el peso de la conversación que genera antes, durante y después de la visita” (p. 116).

Dado que la exposición se estructura en torno a una cuestión socio-científica importante, tiene sentido fomentar el debate y la reflexión siempre que sea posible. Nunca se ofrecen respuestas definitivas, siendo el objetivo final que los/las visitantes salgan del museo con más preguntas de las que tenían cuando entraron (Wagensberg, 2005, 2015). Esto también crea oportunidades auténticas para abordar la naturaleza de la ciencia y el modo en que se construye el conocimiento científico.

Aunque se abordan problemáticas importantes, se mantiene una perspectiva positiva en cada sala, exposición o muestra, ya que el objetivo es presentar una llamada a la acción que nos recuerde lo extraordinaria que es la naturaleza y, al mismo tiempo, nos haga pensar en lo que podemos perder si no la cuidamos.

En el Salón de la Biodiversidad, los/las visitantes pueden encontrar un conjunto de 49 módulos de exposición e instalaciones de elevada carga estética y organizadas en 15 grandes temas que abarcan todos los aspectos clave de la diversidad biológica y cultural, al tiempo que ofrece una amplia gama de experiencias sensoriales.

Se exponen los principales fenómenos naturales subyacentes a la diversidad de la vida como la conocemos, desafiando a los visitantes a experimentar un sentimiento, a menudo olvidado/desatendido, de asombro hacia la belleza de la naturaleza, a la vez de valorar el goce intelectual que supone comprender conceptos científicos abstractos y complejos.

La tecnología se emplea de forma instrumental para evitar reemplazar la experiencia sensorial y desviar la atención de los mensajes transmitidos (Wagensberg, 2015). Esto incluye una amplia gama de soluciones, desde modelos mecánicos hasta recursos multimedia y audiovisuales. La información proporcionada en cada exposición

se mantiene al mínimo, aunque se detallan los aspectos clave para fomentar el compromiso cognitivo y la interacción.

El lenguaje utilizado, aunque es científicamente válido y preciso, descarta todo tipo de jerga científica. El uso de metáforas museográficas impregna la comunicación establecida con los visitantes, confrontándolos con detalles inesperados y pensamientos desafiantes, al tiempo que se les proporciona información fundamental que estructura todo el proceso (Simon, 2016; Wagensberg, 2015).

Un hilo argumental flexible que combina elementos literarios con la ciencia (Ferrand de Almeida et al., 2019a) supera la mera interactividad física, elevándola a niveles cognitivos y afectivos, transportando a los/las visitantes por un viaje por la vida en el que ellos/ellas son los agentes centrales y activos del proceso de aprendizaje.

Aunque la biodiversidad puede considerarse algo externo para nosotros como seres humanos y que debemos proteger, también se puede considerar algo exógeno sobre lo que debemos actuar. En el Salón de la Biodiversidad, se pone de manifiesto el doble papel de los seres humanos como agentes y receptores del cambio.

El objetivo es proporcionar evidencias de las repercusiones medioambientales, sociales y culturales de nuestras acciones, teniendo especialmente en cuenta la importancia de fomentar sentimientos de responsabilidad (Lee et al., 2013). La descripción detallada de todos los objetos expuestos en el Salón de la Biodiversidad se escapa al alcance de este capítulo; no obstante, en los párrafos siguientes se describirá brevemente una selección de algunos ejemplos emblemáticos.

El viaje comienza fuera del edificio, con una invitación abierta a que aceptemos nuestro lugar en el portentosamente diverso árbol de la vida, y

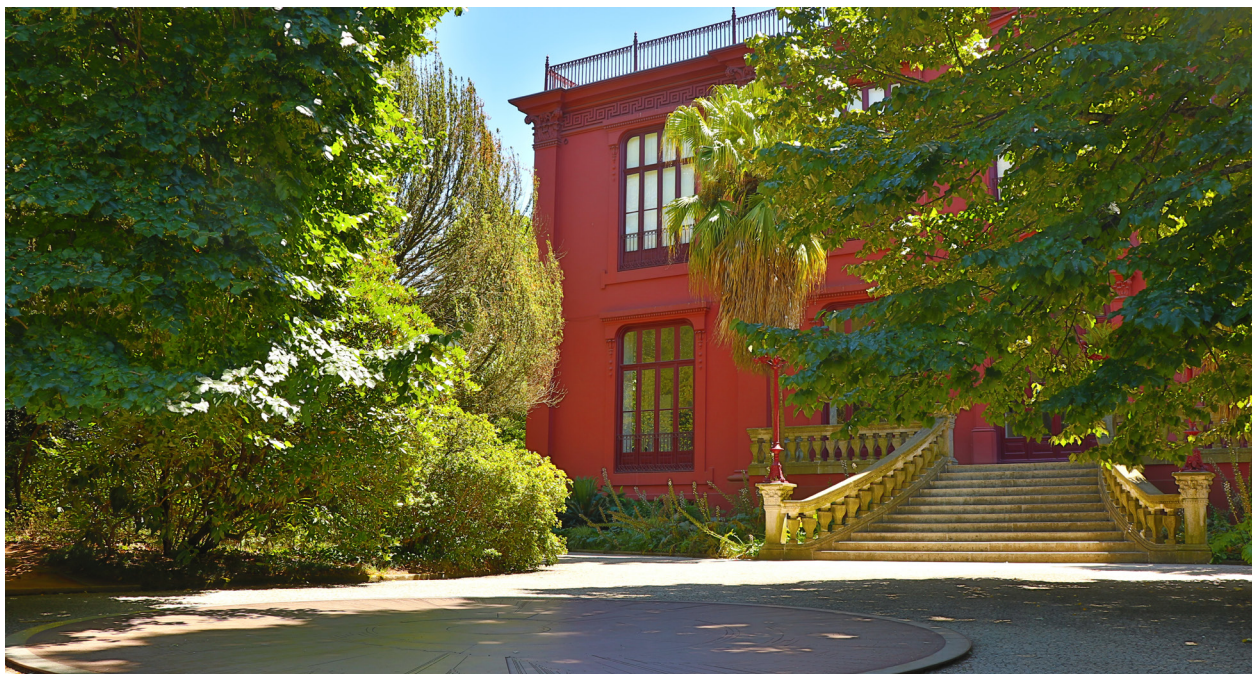
reconozcamos cómo nosotros/as y todos los seres vivos con los que compartimos nuestro planeta estamos relacionados (Figura 1).

Una vez que entramos en el edificio, nos encontramos cara a cara con un gigantesco esqueleto de ballena, que ocupa gran parte del vestíbulo principal (Figura 2). Sacado directamente de las páginas de una novela escrita por una de las poetisas más queridas de Portugal, que solía pasar sus vacaciones de verano en esta misma casa cuando era niña (por aquel entonces era la casa de sus abuelos), este objeto único del museo transmite un poderoso mensaje.

Un faro de esperanza que nos recuerda, al mismo tiempo, todos los efectos perjudiciales de nuestras acciones sobre los océanos, desde la intensificación de la explotación de los recursos naturales hasta el aumento de la contaminación y la degradación de los ecosistemas.

**Figura 1**

El “Árbol de la Vida” nos da la bienvenida en la entrada del Salón de la Biodiversidad. Fotografía: Anabela Magalhães.



**Figura 2**

Esqueleto de una ballena azul (*Balaenoptera musculus*) de la colección zoológica del Museo de Historia Natural y Ciencias de la Universidad de Oporto. Crédito: João Ferrand.



La poeta es Sophia de Mello Breyner Andresen (06.11.1919 – 02.07.2004). Para saber más sobre esta historia, véase Ferrand et al. 2019

Posteriormente, nada más subir la escalera helicoidal, se nos pide que respondamos a la pregunta clave: ¿por qué deberíamos preservar la (bio)diversidad? El abanico de argumentos que nos permite responder a esta pregunta se organiza en torno a cuatro principios esenciales:

- a) Principio estético: la naturaleza es bella y merece la pena salvarla simplemente por ello.
- b) Principio ético: si una especie ha llegado hasta nuestros días, ¿quiénes somos nosotros para impedir su existencia?
- c) Principio económico: por difícil que resulte poner precio a la biodiversidad, en ella se asientan los cimientos de nuestros mercados globales.
- d) Principio científico: al destruir la biodiversidad, estamos desechando una gran cantidad de recursos con propiedades terapéuticas que pueden ayudarnos a tratar problemas que ni siquiera podemos prever.

Cada uno de estos principios se ilustra mediante lo que Wagensberg (2009) definió como una exhibición hipercúbica de comprensión repentina: una nueva forma de organizar objetos según criterios específicos que permiten la transmisión de una metáfora museográfica. Al hacer visible lo invisible convierte las nociones científicas complejas, que los/las científicos/as a menudo no pueden explicar utilizando hechos y argumentos, en realidades próximas e inteligibles (Ferrand de Almeida et al., 2019b; Wagensberg, 2009).

Estas cuatro exposiciones incluyen: una colección de huevos de todos los colores, tamaños y formas, que se organizan según gradientes de estas tres características; una colección de todas las razas de perros del mundo que surgen de un único lobo (es decir, la especie original antes de su domesticación); una colección de semillas de plantas clavadas encima de su lugar de origen en un globo terráqueo; una colección de todas las píldoras de las que disponemos para tratar todo

tipo de enfermedades cuyos compuestos activos proceden de la naturaleza (Figura 3).

Cada exposición va acompañada de un módulo interactivo que amplía la experiencia de los/las visitantes. Las oportunidades para participar en investigaciones centradas en los innumerables temas dignos de debate y discusión que surgen de la interacción con estas exhibiciones, son infinitas.

La principal cuestión sociocientífica, la pérdida de biodiversidad, se aborda en sus múltiples dimensiones, cada una de ellas desencadenando un debate en torno a cuestiones sociocientíficas específicas. Entre los temas frecuentemente abordados encontramos el respeto y aprecio por la diversidad, el equilibrio entre las actividades humanas y la preservación de la vida salvaje, el proceso de domesticación y sus repercusiones ecológicas y económicas, la evolución y movilidad humana, la introducción de especies invasoras, la salud pública y la investigación farmacéutica, y las prácticas tradicionales y locales frente a las de producción en masa, entre muchos otros.



**Figura 3**  
Una colección de huevos  
organizada por tamaño, forma y  
color en una exhibición hipercúbica  
de comprensión repentina. Crédito:  
João Ferrand.

La aventura continúa cuando se nos presentan los principales mecanismos de la evolución y la selección (selección natural, sexual y artificial), así como las diversas formas posibles en que un organismo puede variar (por ejemplo, en su perfil genético, tamaño, forma, color, percepción, técnicas de supervivencia y configuración genética). Para abordar uno de los fenómenos más relevantes y centrales de la evolución, el Salón de la Biodiversidad revisa el conocido ejemplo de la variación fenotípica de la mariposa de los abedules (*Biston betularia*) en el Reino Unido durante la revolución industrial.

Un panel interactivo ilustrado a tamaño real que representa el bosque de abedules y la población residente de *B. betularia* nos lleva a viajar en el tiempo y ser testigos de los efectos de la contaminación atmosférica sobre estos animales. Esta exposición cargada de estética nos deja pensando en cómo un simple cambio en las condiciones ambientales en un momento y lugar determinados (en este caso, introducido por la mano del ser humano) puede dictar el destino de una población. Así, es muy fácil empezar a plantearse la siguiente pregunta: ¿qué significa ser el más apto?

A su vez, la selección artificial -un tema recurrente en la Sala de la Biodiversidad- encuentra su punto álgido en una pantalla de 3 x 4 m que alberga una impresionante “cortina de maíz” (Figura 4). En ella se muestran visualmente las distintas etapas de la domesticación del maíz utilizando mazorcas reales. Comenzamos con una columna de mazorcas silvestres (teosinte), a la que sigue una columna extraordinariamente diversa de mazorcas de todos los colores, tamaños y formas, que representan cultivares que aún podemos encontrar en América Central y del Sur. A continuación, sigue una columna mucho menos diversa de mazorcas de cultivares locales portugueses. Por último, llegamos a una columna de clones: mazorcas de variedades transgénicas que son todas idénticas, perfectamente adaptadas a un entorno específico y totalmente incapaces de adaptarse.

Al observar esta pantalla, comprendemos de inmediato cómo esta planta ha sido modificada

a través de prácticas agrícolas para responder a nuestras necesidades en periodos concretos a lo largo de la historia. Esto se hace utilizando primero técnicas tradicionales e intentando desentrañar todas las posibles combinaciones que conducen a la mayor diversidad posible.

Luego, al pasar a técnicas más específicas (y finalmente a la ingeniería genética) impulsadas por la intención de mejorar los cultivos producidos, el maíz se hizo más eficiente y homogéneo, sacrificando la diversidad por el camino. Esta metáfora, aparentemente sencilla pero muy poderosa, acaba por incitarnos a reflexionar sobre las repercusiones económicas, culturales, sociales y medioambientales de la tecnología, incluidas todas sus dimensiones altamente controvertidas.

**Figura 4**

La selección artificial: La domesticación del maíz.  
Crédito: João Ferrand.



Evocando la historia de las colecciones de historia natural, la Sala de la Biodiversidad es un gabinete de curiosidades. Aquí, una densa y ordenada matriz de objetos, fotografías, ilustraciones y mapas que representan el origen de los museos de historia natural se reúne con un esquema visual de algunas de las rutas geológicas, ecológicas y culturales más relevantes proyectadas sobre un globo terráqueo gigante que emula nuestro planeta y que ocupa el centro de la sala. Este súbito viaje del pasado al futuro estimula la reflexión sobre nuestra curiosidad natural hacia lo desconocido e incide en el sentido de la responsabilidad que debemos asumir al interactuar con la naturaleza y otras culturas.

Por último, cerrando el círculo, la diversidad humana -uno de nuestros rasgos más valiosos- se regocija recordando lo que nos hace especiales y únicos, tanto como individuos y como especie, tanto desde el punto de vista biológico como cultural. Nuestra evolución cultural, expresada en el lenguaje, la música, las artes, la literatura y muchas otras actividades, se ha visto impulsada por nuestra capacidad de movernos y comunicarnos.

La acción se desarrolla en dos salas contiguas. En la primera sala, se nos desafía a buscar patrones que perturben el continuo en el que se distribuye la variación de nuestros rasgos. Aquí podemos encontrar el pantone humano, una muestra del Proyecto Humanae<sup>3</sup> de la artista Angélica Dass.

En la segunda sala, la literatura nos trae una oda a nuestra condición de ciudadanos del mundo plenamente capaces y naturalmente deseosos de interactuar con culturas diferentes, al tiempo que fomenta la conciencia del intercambio que surge de estas conversaciones y que mejora nuestra capacidad para dar sentido a la realidad y al mundo que nos rodea.

Sin embargo, la historia no termina aquí. Además de su exhibición permanente, el Salón de la Biodiversidad apoya exhibiciones temporales, dinámicas y transdisciplinarias, así como programas culturales y educativos.

Notablemente, estos últimos siempre favorecen métodos de aprendizaje activo. Aunque se centran en una amplia gama de temas, la preservación de la biodiversidad y el desarrollo sostenible están siempre presentes, de forma explícita o implícita. El programa educativo del Salón de la Biodiversidad incluye actividades específicamente destinadas a la comunidad escolar (todos los niveles de enseñanza, así como formación previa y continua del profesorado), lo que facilita la profundización del trabajo en torno a determinados contenidos en el contexto de proyectos a medio y largo plazo.

En línea con este objetivo de lograr un compromiso duradero de la audiencia, incluso los programas dirigidos a segmentos de audiencia distintos de la comunidad escolar están estructurados para MHNC-UP y sus distintos equipos (servicios educativos, comunicación y colecciones), así como socios externos de diversos ámbitos.

## **2. De la ciencia ciudadana al empoderamiento sociocientífico de los estudiantes: El impulso del Museo Nacional de Historia Natural de Francia.**

La protección de la biodiversidad requiere elecciones sociales basadas en la gestión sostenible de los ecosistemas. Para una acción efectiva, es necesario proteger no solo la biodiversidad actual, sino también el proceso evolutivo en su procedencia. En otras palabras, es

importante saber que la humanidad forma parte de esa biodiversidad y que puede contribuir a su evolución.

En Europa, los museos de historia natural desempeñan un papel fundamental en la puesta en práctica de la ciencia ciudadana junto a la Asociación Europea de Ciencia Ciudadana (Sforzi et al., 2018). La ciudadanía voluntariamente puede recopilar datos que podrán ser analizados por la comunidad científica para elaborar indicadores que ayuden a describir el impacto de las actividades humanas en la biodiversidad (por ejemplo, cambio climático, urbanización, contaminación), además de abrir perspectivas educativas sobre temas sociocientíficos.

En 2006, el Museo Nacional de Historia Natural de Francia (Muséum national d'histoire naturelle - MNHN) creó un proyecto de ciencia ciudadana llamado 'Vigie-Nature' (Couvét et al., 2008) para elaborar un catálogo de la biodiversidad del territorio francés. Para ello, investigadores/as del museo diseñaron unos protocolos científicos para recoger datos sobre diversas especies que podían ser fácilmente aplicados por ciudadanos/as voluntarios/as. En 2012, "Vigie-Nature" modificó y adaptó este proyecto a los centros escolares, siendo conocido como "Vigie-Nature École" (VNE).

Este proyecto, de colaboración voluntaria, está dirigido a profesorado y alumnado de primaria, secundaria o bachillerato que quieran contribuir a un proyecto de investigación real con el objetivo de sensibilizar a la población sobre la pérdida de la biodiversidad. Hay un total de 10 protocolos que permiten el monitoreo de una amplia variedad de grupos (por ejemplo, aves, caracoles, plantas silvestres, insectos polinizadores, etc.) disponibles y adaptados a los centros educativos. Con estos protocolos, el alumnado puede observar directamente las especies que viven en su entorno inmediato. Durante el curso académico 2021-2022, 460 aulas desde primaria hasta bachillerato (10,898 estudiantes) participaron en el proyecto. En total, desde la puesta en marcha de este proyecto, el alumnado ha realizado 12,672 sesiones de observación que les ha permitido contar más de 43,000 aves y 10,500 caracoles.

Los datos recogidos por los diferentes

centros se envían a los/las investigadores/as del museo a través de la página web del proyecto VNE para ser analizados y obtener indicadores de los niveles de biodiversidad en el territorio francés. En este aspecto, el VNE es un proyecto de ciencia ciudadana, que Bonney (2009) define como "participación pública en la investigación científica" (PPSR por sus siglas en inglés), por recopilar datos a gran escala espacial y temporal del territorio francés. Los resultados obtenidos, es decir, los indicadores del nivel de biodiversidad y otros resultados relevantes se envían a los/las participantes a través de boletines explicativos. Además, el alumnado participante también se puede reunir con los/las investigadores/as durante conferencias en donde pueden hacer preguntas sobre sus observaciones.

La VNE contribuye al currículo francés de biología haciendo que el alumnado movilice procedimientos y conocimientos científicos (Bosdeveix et al., 2018; Conversy et al., 2019) pero también al abordar CSC (Sadler et al., 2016) a través del impacto antropogénico en la pérdida o mantenimiento de la biodiversidad. En este aspecto, el profesorado puede ir más allá de la recogida de datos e involucrar a su alumnado en la conservación de la biodiversidad local. Para ello, el/la docente puede trabajar con los resultados obtenidos de la recogida de datos del VNE en relación a conocimientos científicos de ecología y, al mismo tiempo, apoyarse en consideraciones socioambientales relacionadas con las implicaciones sociales de la protección de la biodiversidad (Mueller et al., 2011). Al combinar estos dos enfoques educativos, el alumnado podrá participar en la toma de decisiones para tomar acciones concretas para proteger la biodiversidad (Philipps et al., 2020).

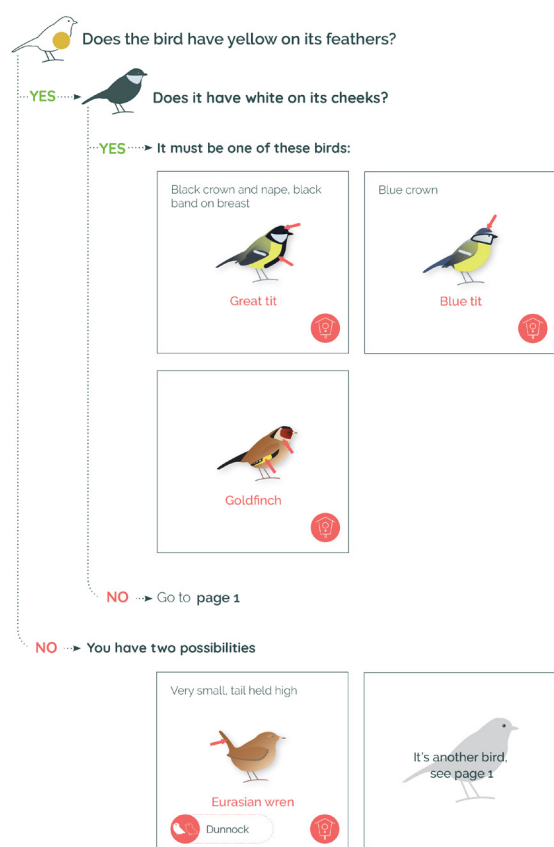
A continuación, presentamos una CSC centrada en la ecología que integra un proceso de toma de decisiones relacionado con la conservación de la biodiversidad en un contexto local: la destrucción del hábitat de las aves urbanas ligada al proyecto VNE de ciencia ciudadana. El protocolo "Garden Birds" (Aves de jardín) ilustra la relación del proyecto VNE de ciencia ciudadana y la cuestión sociocientífica de

la pérdida de la biodiversidad de las aves en áreas urbanas.

El primer paso del protocolo “Garden Birds”, que es sencillo pero preciso y efectivo, consiste en identificar y contar los pájaros que hay en el patio de un colegio, en un parque público o en un jardín de los alrededores. Las observaciones de las aves se pueden realizar con prismáticos y/o comederos para aves y se deben llevar a cabo en intervalos de 15 minutos (si el tiempo de observación no es el mismo, los datos no se pueden comparar). En este protocolo, el alumnado participante debe contar el número máximo de individuos de cada especie observados simultáneamente. La observación se puede realizar en el mismo lugar, pero en fechas y horas diferentes para comprender cuándo y por qué las aves visitan el lugar. Para ayudar al alumnado y profesorado a identificar las aves observadas, se proporciona una clave

de identificación (Figura 5). En ella, a través de símbolos, se muestran algunas características específicas de la especie observada.

También existe una aplicación llamada “BirdLab”, que puede descargarse fácilmente en teléfonos o tabletas. A través de “BirdLab” los/las investigadores/as analizan las interacciones entre las aves en los comederos. Para ello, los/las participantes tienen que reproducir la actividad de las distintas especies en los comederos en tiempo real durante 5 minutos mediante la sencilla acción de “arrastrar y soltar”. Las observaciones se deben realizar en dos comederos idénticos con la misma cantidad de alimento, separados de 1 a 2 metros entre sí. La propia geolocalización automática permite determinar el tipo de entorno (por ejemplo, urbano, periurbano, rural). Al participar en “BirdLab” el alumnado podrá darse cuenta de que los mirlos acuden a los comederos



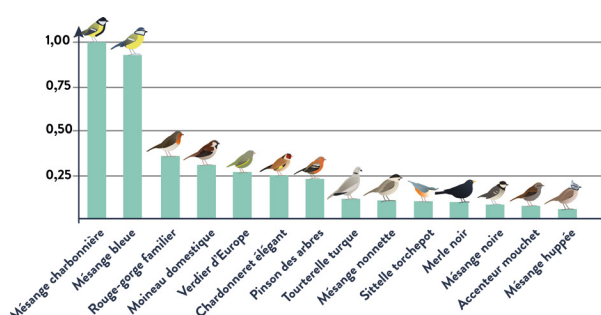
	This symbol indicates that the bird frequents feeders.
	This symbol indicates that the bird is present in France only in winter.
	This symbol indicates that the bird is present in France only in summer.
	This symbol indicates that the bird could be easily confused with other species.
	This symbol means that the bird has the colour represented in the bubble on at least part of its plumage.
	Some pictograms only refer to one or more areas of the bird: these are the characteristics to observe most closely, with the arrows indicating the most important criterion.

**Figura 5**

Ejemplo de clave de identificación para ayudar a determinar las especies de aves. © Vigie-Nature - MNHN.

frecuentemente (van y vienen), mientras que otras aves prefieren permanecer durante más tiempo en el comedero (Figura 6).

En el segundo paso, el proyecto VNE puede involucrar al alumnado en un proceso de toma de decisiones para proteger la biodiversidad a nivel local basándose en los datos recogidos. Por ejemplo, a partir del análisis de los datos recogidos el alumnado puede comparar la biodiversidad (abundancia y diversidad) de las aves en un erial y en un césped recién cortado (Figura 7), y darse cuenta de que hay cuatro especies en el descampado y sólo dos en el césped segado.

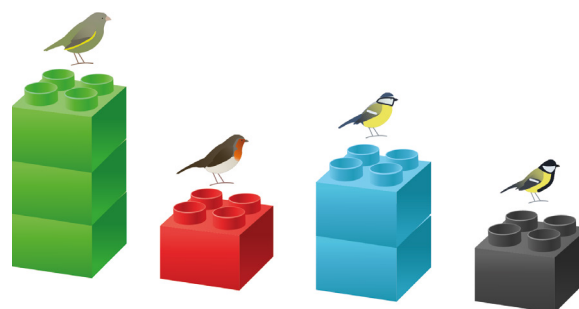


**Figura 6**

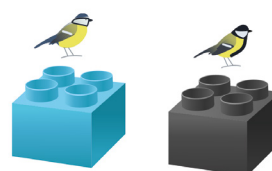
Ejemplo de la APP BirdLab: Gráfico de la frecuencia relativa de las 14 especies más presentes (en comparación con el herrerillo común). El herrerillo común y el carbonero común son las especies más frecuentemente observadas en los comederos. © Sébastien TURPIN - MNHN.

Con esta situación, el alumnado relaciona los resultados obtenidos de los dos entornos con la cuestión sociocientífica local de la pérdida de biodiversidad en las zonas urbanas.

De ahí que sugirieran no segar algunas zonas de jardines y parques públicos para favorecer el crecimiento de las plantas que producen las semillas consumidas por las aves. Esta propuesta por parte del alumnado se puede trasladar a la escuela, al vecindario e incluso a las autoridades municipales. Esta sugerencia aparentemente simple no es muy conocida porque no es



Birds in a wasteland



Birds in a mowed land

**Figura 7**

Resultados de los datos recogidos (abundancia y diversidad de especies de aves) en dos medios (erial y césped segado/cortado). © Sébastien TURPIN - MNHN.

demasiado evidente. De hecho, la ciudadanía y las autoridades, consideramos no segar el césped como un signo de descuido por parte de los propietarios de jardines o de los servicios de jardinería de los parques públicos de la ciudad.

Por lo tanto, depende de los/las estudiantes que participaron en el proyecto VNE de ciencia ciudadana proporcionar, a las autoridades municipales y a la población local, los datos recopilados para mostrar la importancia ecológica de dejar áreas de la ciudad sin cultivar – eriales - para luchar contra la pérdida de biodiversidad.

Por lo tanto, si empleamos los datos científicos del proyecto VNE generados gracias a la participación del alumnado, se puede desarrollar

una dinámica de toma de decisiones colectiva e informada en favor de la conservación de la biodiversidad de las aves – cuestión sociocientífica -. Así, el alumnado ejercerá una participación ciudadana activa implementando actividades humanas positivas en su entorno inmediato, en este caso, contribuyendo a la transformación de las prácticas de jardinería en la ciudad. Además, este proyecto contribuye al aprendizaje científico ya que las CSC son contextos excelentes para el desarrollo de la argumentación (Duschl y Osborne, 2002; Zeidler y Nichols, 2009).

En conclusión, a partir de este simple resultado, el alumnado puede emplear y generar recursos para pensar en acciones para la protección de la biodiversidad, ya que son a la vez miembros de la comunidad escolar y miembros de la comunidad científica del proyecto VNE de ciencia ciudadana. Por lo tanto, además del objetivo científico de evaluar la biodiversidad, este proyecto también puede producir un impacto social basado no en opiniones, sino en datos científicos. Además, también representa una oportunidad para trabajar con el alumnado el vínculo entre la ecología, la evolución, el cambio climático y el papel de la selección natural y la deriva genética en el proceso de extinción de especies. Por lo tanto, Vigie-Nature y VNE son redes ciudadanas que promueven la ecología científica, además de abordar la cuestión sociocientífica de la conservación de la biodiversidad, con el fin de cambiar nuestras actitudes individuales y colectivas en un contexto social, y destacar la contribución de los museos a este fin.

### **3. El Museo Zoológico del Departamento de Biología de la Universidad de Atenas: En busca de la biodiversidad**

Como se mencionó anteriormente, la biodiversidad no es sólo un concepto biológico que deberían conocer las personas de todas las edades, sino un componente esencial de la vida. Por ello, el museo de zoología más grande de Grecia no podía dejar de lado esta dimensión científica con tal impacto social. Con este fin, el Museo de Zoología del Departamento de Biología de la Universidad de Atenas ha iniciado, recientemente, la propuesta y diseño de programas educativos que pueden servir como complemento al currículo educativo de ciencias en la escuela (y específicamente de biología) o funcionar independientemente en el propio museo.

A continuación, se va a presentar el programa titulado 'Encuentra un amigo recorriendo el museo' que trata la biodiversidad a través de cuestiones sociocientíficas para estudiantes de secundaria, concretamente, para los primeros años de educación secundaria (7º-8º grado; 13-14 años). El programa tiene como objetivo presentar, lúdicamente, diferentes especies animales (endémicas y no endémicas) que viven en Grecia - manteniendo objetivos específicos vinculados a contenidos técnicos relativos a la biodiversidad (por ejemplo, nombrar especies animales en peligro en Grecia, distinguir animales según el riesgo, comparar diferentes categorías de animales y relacionarlas con las causas de riesgo, etc.).

Así, cuando el alumnado abandone el museo, no solo habrá recorrido sus instalaciones, sino que también habrá adquirido conocimiento. El objetivo final de este programa es que el alumnado pueda tomar decisiones sobre un escenario hipotético de deforestación. A continuación, se resumen tanto los objetivos del proyecto como la metodología implementada, y se exponen algunas de las impresiones iniciales de los grupos de estudiantes que visitaron el museo y participaron en el proyecto de biodiversidad. No obstante, la presentación y el análisis de los resultados de aprendizaje del alumnado tras el proyecto quedan

fuera del alcance de este capítulo.

‘Encuentra un amigo recorriendo el museo’

Como se explicó anteriormente, el programa se ha diseñado en torno a la biodiversidad. Pone el énfasis en el lugar que ocupa el ser humano entre los demás organismos vivos, haciendo hincapié en que el ser humano es uno de entre los muchos que existen. El conocimiento sobre la biodiversidad no se aborda solamente como una constante ecológica, sino como una forma de entender la importancia que tiene el respeto de la naturaleza y sus elementos para cada organismo vivo (en este caso, especialmente para los humanos).

Grecia presenta una biodiversidad particularmente rica como resultado de la variedad de hábitats debido a su particular topografía, áreas terrestres y numerosas islas. Al igual que otros países, Grecia tiene especies endémicas y no endémicas que pueden clasificarse en diferentes categorías según su estado de amenaza. Las causas de amenaza pueden señalarse, incluidos los efectos antropogénicos.

Por lo tanto, el objetivo clave de este proyecto es familiarizar a los estudiantes con las categorías de amenaza de las especies definidas por la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). En el proyecto se seleccionaron especies no amenazadas, amenazadas, en peligro crítico y vulnerables, de modo que el alumnado pueda entrar en contacto y observar cómo difieren estos términos y qué casos de cada categoría de riesgo se pueden encontrar en Grecia.

Así pues, uno de los objetivos clave de este proyecto es familiarizar a los estudiantes con las categorías de amenaza de las especies definidas por la UICN. Para este proyecto se han elegido especies no amenazadas, amenazadas, en peligro crítico y vulnerables, de modo que los alumnos y alumnas entren en contacto con dichas categorías, identifiquen sus diferencias y conozcan ejemplos que pueden encontrar en Grecia para cada categoría.

Otro de los objetivos del proyecto es que el alumnado identifique las causas que conducen a la extinción de las especies amenazadas y cómo reducir o eliminar dichas causas. Ya que, según la categorización de la UICN mencionada

anteriormente, se sabe que no todas las especies amenazadas desaparecen aún cuando su población disminuye. Por lo tanto, es importante entender cómo ocurren cada uno de los casos.

Además de la clasificación de la UICN, un objetivo primordial fue correlacionar la conservación (o no) de las especies (como dimensión clave de la biodiversidad) con el impacto de las actividades antropogénicas. Así, el proyecto pretendía fomentar una actitud de respeto por el medio ambiente y concientizar al alumnado sobre las consecuencias de sus acciones presentes en situaciones futuras. Además, como se ha mencionado anteriormente, la cuestión sociocientífica con la que concluyó el programa pretendía que el alumnado deliberara sobre una intervención humana en el medio natural (deforestación) teniendo en cuenta el mayor número posible de parámetros. Esta actividad se describirá posteriormente.

Para implementar este proyecto, se diseñó material complementario para el alumnado. Se crearon guías turísticas del museo, códigos QR y un formulario de registro de información. Concretamente, se dividió el museo en torno a cuatro recorridos con una guía específica – en forma de un pequeño libro de rompecabezas/enigmas – para cada uno de los recorridos.

Al resolver un rompecabezas/enigma el alumnado averiguaba al punto del museo al que debían dirigirse (que es diferente para cada rompecabezas) y en donde los esperaba un código QR. Una vez escaneado, con ayuda de unas tabletas (que se entregaron al alumnado a su llegada al museo), el código QR revelaba información sobre el animal objeto de estudio. En otras palabras, cada código QR proporcionaba información adicional sobre el animal que se encontraba en el rompecabezas resuelto.

Posteriormente, el alumnado debía resolver el siguiente rompecabezas para poder llegar a la siguiente exhibición de animales. Toda la información recopilada debía ser registrada en unas tablas del formulario de registro de información (nombre del animal, hábitat, amenaza, etc.). Se pidió a cada grupo de estudiantes que cubriera las columnas del formulario a medida que

acudía a cada una de las exhibiciones del recorrido hasta que completasen la información de todos los animales.

Para finalizar el proyecto, se llevó a cabo un debate con un miembro del personal del museo en el que el alumnado pudo sintetizar sus principales conclusiones y se realizó la actividad final que consistía en la elaboración de un “cómic” sobre la deforestación. Para ello, al alumnado se les proporcionaron dos imágenes (Figuras 9 y 10) con una breve historia. Los protagonistas eran unos animales del bosque que tenían que decidir cómo y si debían actuar en el hipotético caso de enfrentarse a una intervención humana en su entorno natural. El alumnado debía completar los diálogos de los animales, y a través de ellos, llegar a una decisión con respecto a esta cuestión sociocientífica en particular. Los diálogos desarrollados por el alumnado permiten determinar si son conscientes del peligro de extinción y para qué animales (basándose en las imágenes proporcionadas en las que están representados animales de todas las categorías de la UICN). Esta actividad final puede mostrar si el alumnado es capaz de tomar decisiones analizando la problemática desde diversos ángulos

– ya que las CSC son problemáticas multifacéticas -. Para ello, les puede resultar útil emplear la información que recopilaron previamente – el formulario realizado durante el recorrido -, así como por el debate final realizado con un miembro del personal del museo.

Aunque los resultados de aprendizaje no son el tema central de este capítulo, es importante destacar que, al final de todo el proceso, el alumnado completó un breve cuestionario para expresar sus impresiones sobre el proyecto y evaluar los conocimientos que adquirieron durante el programa. Se constató que el alumnado respondió correctamente a la mayoría de las preguntas de evaluación.

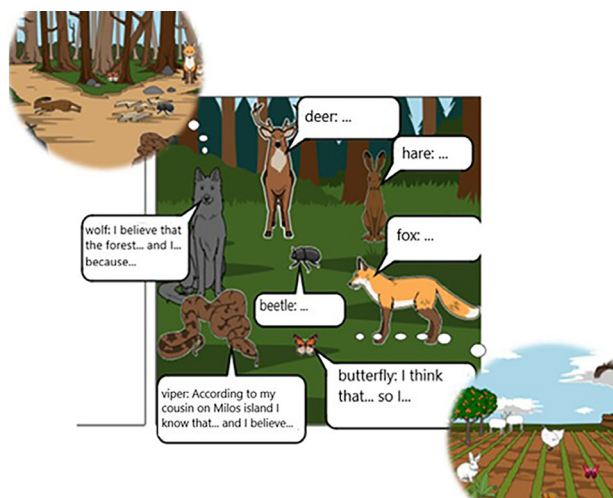
Sin embargo, lo más llamativo han sido los resultados de las respuestas relativas a las impresiones del alumnado. Los alumnos y las alumnas afirmaron no tener dificultades para seguir el programa, y el 95% del alumnado subrayó no preferir ningún otro formato de participación en el programa (por ejemplo, un recorrido tradicional). De hecho, varios/as señalaron que les gustaba tener que “pensar” en vez de caminar simplemente por el museo.

Además, el mismo porcentaje de estudiantes



**Figura 9**

La vida en el bosque y la llegada del “forastero” (primera parte del cuento).



**Figura 10**

El consejo de animales del bosque se reúne para tomar decisiones (segunda parte de la historia corta).

señaló que les gustaría asistir nuevamente a programas similares en el futuro. Es particularmente alentador que el alumnado haya respondido positivamente a las preguntas metacognitivas, señalando, por ejemplo, que este programa les ayudó a aprender sobre la biodiversidad y los riesgos que enfrenta.

En general, el alumnado parece disfrutar con esta forma de abordar conceptos biológicos, y el diseño y la integración del programa en torno a una problemática sociocientífica parece haber impulsado el aprendizaje de temas relacionados con la biodiversidad, todo ello dentro de las posibilidades y oportunidades que puede ofrecer un museo.

#### **4. Las cuestiones sociocientíficas en otros contextos extracurriculares.**

No cabe duda de que los museos son entornos formidables para abordar las CSC. Además de su contenido específico, y las actividades y proyectos que promueven, su potencial se debe en cierta medida al interés situacional que pueden suscitar.

La investigación ha demostrado que la educación “basada en el lugar” puede proporcionar resultados relevantes debido a la autenticidad de los entornos en los que se producen las interacciones (Wattchow, 2021). Esta característica es común a otros contextos extracurriculares, como parques naturales, jardines botánicos (que a menudo se perciben y presentan como museos vivos), zoológicos y acuarios, que también han demostrado crear oportunidades fructíferas para abordar problemas sociales urgentes con una base científica y tecnológica (Dean, 2022; Papoulias, 2022; Reyes, 2020). Estos contextos parecen ser especialmente adecuados para abordar cuestiones medioambientales dada la interacción (más o menos) directa que se puede fomentar con la naturaleza.

La investigación ha señalado que experimentar el mundo natural en entornos más o menos controlados, es decir, explorar lugares con los que uno está familiarizado y que están disponibles fácilmente, permite a las personas comprender la complejidad de las variables en juego cuando se debaten desafíos medioambientales reales, especialmente aquellos relacionados con la preservación de la biodiversidad y la sostenibilidad (Austin, 2021; Herman et al., 2019).

Al sumergirse en la naturaleza, uno puede abrazar la compleja red de elementos en los que se basa el delicado equilibrio de los fenómenos naturales, en lugar de tener que lidiar con ellos como conceptos abstractos (Austin, 2021). Esto, sin duda, facilita la comprensión de las dimensiones principales que suelen caracterizar a las CSC.

Un estudio reciente (Herman et al., 2020), sobre el razonamiento emotivo de los estudiantes sobre una cuestión sociocientífica medioambiental durante su visita al Área del Gran Yellowstone, ha demostrado que la enseñanza de las CSC basada en la realidad local puede modular tanto las respuestas emocionales y afectivas hacia un problema, como los agentes involucrados y afectados por ella, ya que puede actuar como un desencadenante de comportamientos prosociales y proambientales. Además, se ha demostrado que el bioblitz, una herramienta cada vez más popular en la educación ambiental (y especialmente en la biodiversidad), promueve el aprendizaje práctico y conceptual de conceptos científicos relacionados con la naturaleza de una forma más auténtica e inmersiva. Asimismo, los/las estudiantes declaran tener un mayor sentimiento de aprecio por la naturaleza y una mejor disposición a actuar a favor de la preservación del medio ambiente (Gass et al., 2021).

El potencial de estos otros contextos extracurriculares se puede impulsar, aún más, a través de estrategias de aprendizaje activas que se han puesto a prueba en museos, centros de ciencias y escuelas.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Existen diversas formas de abordar las diferentes CSC, a través de exposiciones o actividades, en los museos y/o centros de ciencia. Los ejemplos que hemos presentado sólo representan algunas de las soluciones disponibles, pero que acogen este compromiso en sus entrañas. En general, las ventajas del enfoque educativo basado en las cuestiones sociocientíficas son ampliamente conocidas (Zeidler y Nichols, 2009). La combinación del uso de enfoques educativos basados en las CSC y los entornos de educación no formal, podría ofrecer más oportunidades para que el alumnado y la futura ciudadanía se involucre en una amplia gama de temas, entre los que se incluye la biodiversidad.

La preservación de la biodiversidad, más allá de presentarse como un problema ecológico grave, exige un esfuerzo concertado de múltiples actores en campos sociales, culturales, económicos, políticos y científicos. Según datos científicos recientes, se estima que alrededor de 2.4 millones de especies se enfrentarán al riesgo de extinción en cuestión de años debido a las actividades humanas (Raven, 2020).

En un momento en el que nuestro conocimiento del mundo y nuestro impacto en él son más profundos que nunca, - y cuando controlamos la tecnología más que nunca - todos los esfuerzos deben centrarse en evitar la destrucción de la naturaleza y construir un futuro del cual podamos sentirnos orgullosos. Cada uno/a de nosotros/nosotras, como individuos y como comunidad, tiene un papel que desempeñar a este respecto, ya sea adoptando medidas inmediatas y directas o creando las condiciones necesarias para fomentar un cambio positivo. De ahí que estas tres actividades de museo se hayan diseñado en torno a la biodiversidad como cuestión sociocientífica y no solo como un problema exclusivamente científico. En la interfaz entre el mundo científico y social, estas actividades contribuyen a replantear el aporte educativo de los museos, y ofrecen la posibilidad de ir más allá de la perspectiva informativa y divulgativa del conocimiento científico, introduciendo la perspectiva crítica a través de la interacción entre la actividad y el

alumnado. Además, en cierta medida, podría decirse que es cuestión de proponer al alumnado un ‘experimento mental’ en el que se convierta en actor de un proceso de toma de decisiones que involucra tanto el conocimiento científico como los valores. Estos ejemplos, situados lejos de la perspectiva del especialista que impone desde arriba y prescribe la ‘decisión correcta’ que se debe tomar, ponen de manifiesto y en juego la capacidad de los estudiantes para expresar argumentos. No obstante, lo más importante, es sin duda su contribución a ‘hacer ciencia en la sociedad’. De hecho, el objetivo de los programas no consiste en contar historias evolutivas y ecológicas como un gran relato científico sobre los peligros que amenazan la biodiversidad, sino de proponer actividades que vayan más allá de la sensibilización o mejora de la comprensión de los productos científicos.

De hecho, las tres actividades de los museos de Oporto, París y Atenas incluyen una propuesta diferente para abordar la biodiversidad a través de las CSC. En el primer caso, se ha descrito un enfoque novedoso basado en una filosofía museográfica que aúna arte y ciencia aprovechando el poder universal de la estética, a la vez que favorece las emociones, el compromiso afectivo y, en última instancia, el disfrute intelectual, según han comprobado los expertos del museo de Oporto.

En el segundo caso, se mostró un nuevo proyecto de ciencia ciudadana (el VNE), en combinación con una cuestión sociocientífica, en donde los estudiantes participaban en los procesos de recogida y análisis de resultados actuando como jóvenes científicos dispuestos a contribuir a la investigación científica y, en última instancia, realizaban sugerencias para mejorar sus comunidades locales en el contexto de la conservación y mejora de la biodiversidad.

En el último caso se muestra, a través de una visita al Museo Zoológico de Atenas, cómo se puede abordar una cuestión sociocientífica centrada en la biodiversidad desde el entrenamiento y la aventura. A través de rompecabezas y ‘cómic’, los/las estudiantes

participaron en una toma de decisiones, y salieron del museo no solo emocionados tras de una visita atípica, sino habiendo adquirido conocimientos al haber interactuado con una CSC.

Estas tres actividades reflejan nuevas orientaciones educativas comprometidas con una educación científica para los/las futuros/as ciudadanos/as. Este es un desafío importante que implica nuevas responsabilidades para la 'acción científica en la sociedad' e invita a los/las estudiantes a participar en procesos democráticos de toma de decisiones, especialmente en lo que respecta a la protección y conservación de la biodiversidad frente a los cambios globales causados por las actividades antropogénicas que la amenazan (cambio climático, urbanización, contaminación, etc.).

Sin embargo, la pérdida de biodiversidad es uno de los desafíos ambientales y sociales más urgentes tanto a escala local como global. Nos concierne a cada uno/a de nosotros/as en cada etapa de nuestras vidas y, de hecho, ha estado en

el primer plano de las agendas de las Naciones Unidas para el desarrollo sostenible (Roe et al., 2019). Aunque está explícitamente contemplada en el Objetivo de Desarrollo Sostenible n°15, 'proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de forma sostenible los bosques, luchar contra la desertificación, y detener e invertir la degradación de la tierra y la pérdida de biodiversidad', sin lugar a dudas se presenta como una preocupación subyacente al intentar alcanzar la mayoría de los otros 16 ODS.

En consecuencia, junto a la educación formal, estas actividades de museos y otras propuestas similares al aire libre (por ejemplo, en zoológicos, jardines botánicos, exposiciones y festivales) podrían convertirse a corto plazo en un paso inevitable, más que en un paso opcional, ya que contribuyen al desarrollo del pensamiento crítico y al empoderamiento del alumnado para la protección de la biodiversidad desde una óptica tanto individual como colectiva.

## REFERENCIAS

- Austin, S. (2021). Education about, through and for the environment. In A. M. Kavanagh, F. Waldron, & B. Mallon (Eds.), *Teaching for social justice and sustainable development across the primary curriculum* (pp. 54–68). Routledge. ISBN: 1000360237, 9781000360233.
- Bosdeveix, R., Crépin-Obert, P., Fortin, C., Leininger-Frézal, C., Regad, L., & Turpin, S. (2018). Étude des pratiques enseignantes déclarées concernant le program de sciences citoyennes Vigie-Nature École. RDST. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, 18, 79–102.
- Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V., & Shirk, J. (2009). Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, 59(11), 977–984.
- Brulle R. J., & Norgaardb, K. M. (2019). Avoiding cultural trauma: Climate change and social inertia. *Environmental Politics*, 28(5), 886–908.
- Conversy, P., Dozières, A., & Turpin, S. (2019). Du naturaliste expert à l'élève: Enjeux de la diversification des objectifs d'un program de sciences participatives en France. *Éducation Relative à l'Environnement. Regards-Recherches-Réflexions*, 15(1), 261–283.
- Couvet, D., Jiguet, F., Julliard, R., Levrel, H., & Teyssedre, A. (2008). Enhancing citizen contributions to biodiversity science and public policy. *Interdisciplinary Science Reviews*, 33(1), 95–103.
- Dawson, V. M., & Venville, G. (2010). Teaching strategies for developing students' argumentation skills about socioscientific issues in high school genetics. *Research in Science Education*, 40(2), 133–148.
- Dear, S. N. (2021). National park interpretation and place-based education: An integrative literature review. *Journal of Experiential Education*, 44(4), 363–377.
- Dean, D. C. (2022). Are ashes all that is left? Grace Jantzen's aesthetics and the beauty of biodiversity. *Religions*, 13(5), 407.
- Derounger, ML (2022) Non formal education in the museum: educational programme on conservation biology based on the use of innovative exploration and evaluation tools. Master thesis. (in greek)
- Dinerstein, E., Joshi, A. R., Vynne, C., Lee, A. T. L., Phairand-Deschênes, F., França, M., Fernando, S., Birch, T., Burkart, K., Asner, G. P., & Olson, D. (2020). A "global safety net" to reverse biodiversity loss and stabilize Earth's climate. *Science Advances*, 6(36), eabb2824.
- Djoghla, A., & Dodds, F. (2011). *Biodiversity and ecosystem insecurity: A planet in peril*. Earthscan. ISBN: 978-1-84971-220-0
- Duschl, R. A., & Osborne, J. (2002). Supporting and promoting argumentation discourse in science education. *Studies in Science Education*, 38(1), 39–72.
- Evagorou, M., Korfiatis, K., Nicolaou, C., & Constantinou, C. (2009). An investigation of the potential of interactive simulations for developing system thinking skills in elementary school: A case study with fifth-graders and sixth-graders. *International Journal of Science Education*, 31(5), 655–674.
- Ferrand de Almeida, N., Valentim, N., Mendonça, L., Mendonça, R., & Fonseca, M. J. (2019a). Sophia's whale and the hypercubic showcase of sudden understanding. In C. Rossi-Linnemann, & G. Martini (Eds.), *Art in science museums*. Routledge.
- Ferrand de Almeida, N., Valentim, N., Mendonça, L., Mendonça, R., & Fonseca, M. J. (2019b). The power of art-infused science museum design. The Hall of Biodiversity, Porto (Portugal). In C. Rossi-Linnemann & G. Martini (Eds.), *Art in science museums*. Routledge.
- Gass, S., Mui, A., Manning, P., Cray, H., & Gibson, L. (2021). Exploring the value of a BioBlitz as a biodiversity education tool in a post-secondary environment. *Environmental Education Research*, 27(10), 1538–1556.
- Georgiou, M., & Mavrikaki, E. (2014). Greek students' ability in argumentation and informal reasoning about socioscientific issues related to biotechnology. In C. P. Constantinou, N. Papadouris & A. Hadjigeorgiou (Eds.), *E-Book Proceedings of the ESERA 2013 Conference: Science Education Research For Evidence-based Teaching and Coherence in Learning. Part 7*, (pp.1158-1166) Nicosia, Cyprus: European Science Education Research Association. ISBN: 978-9963-700-77-6
- Georgiou, M., Mavrikaki, E., Halkia, K., & Papassideri, I. (2020). Investigating the impact of the duration of engagement in socioscientific issues in developing Greek students' argumentation and informal reasoning skills. *American Journal of Educational Research*, 8(1), 16–23.
- Herman, B. C., Owens, D. C., Oertli, R. T., Zangori, L. A., & Newton, M. H. (2019). Exploring the complexity of students' scientific explanations and associated nature

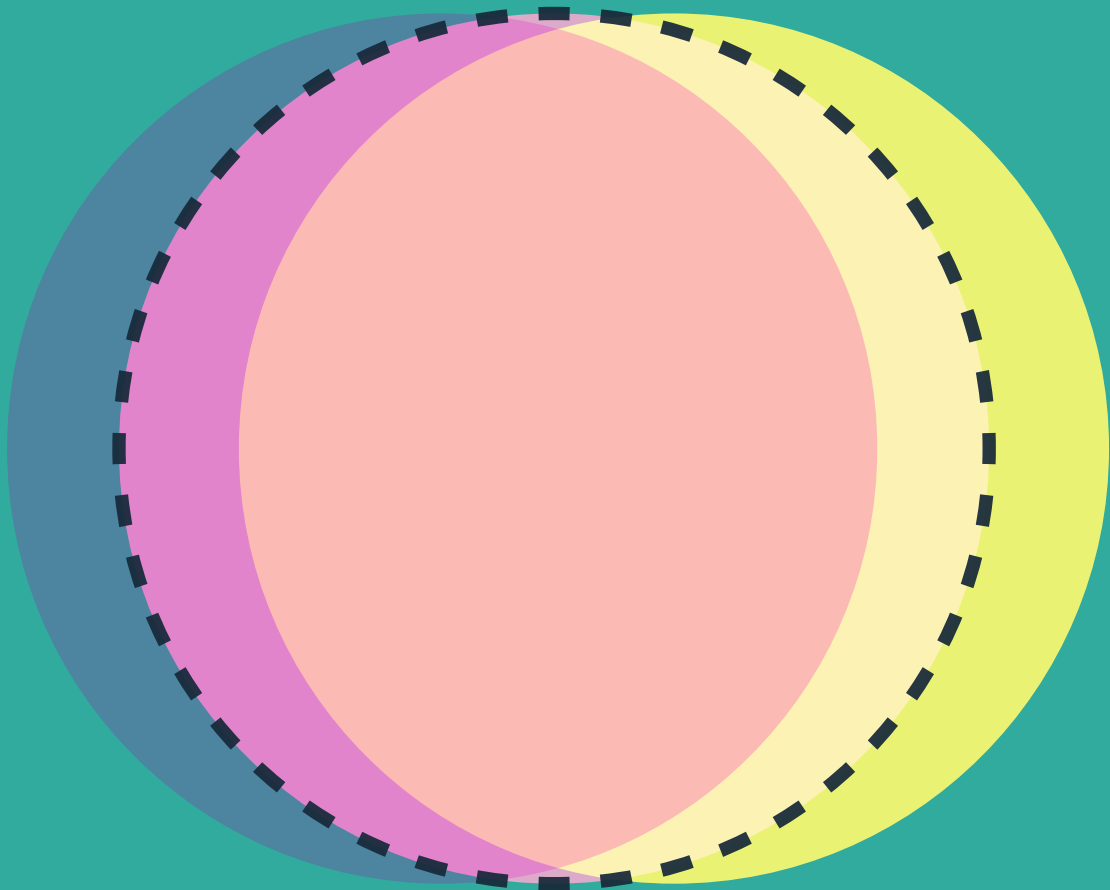
- of science views within a place-based socioscientific issue context. *Science & Education*, 28(3), 329–366.
- Herman, B. C., Zeidler, D. L., & Newton, M. (2020). Students' emotive reasoning through place-based environmental socioscientific issues. *Research in Science Education*, 50(5), 2081–2109.
- Ke, L., Sadler, T. D., Zangori, L., & Friedrichsen, P. J. (2021). Developing and using multiple models to promote scientific literacy in the context of socio-scientific issues. *Science & Education*, 30(3), 589–607.
- Lee, H., Kyunghee, C., Kim, S., Jungsook, Y., Krajcik, J. S., Herman, B. C., & Zeidler, D. L. (2013). Socioscientific issues as a vehicle for promoting character and values as global citizens. *International Journal of Science Education*, 35(12), 2079–2113.
- Lewis, S. L., & Maslin, M. A. (2018). *The human planet: Earth at the dawn of the Anthropocene*. Penguin Random House. ISBN: 978–0–241–28088–1
- Maniatakou, A., Papassideri, I., & Georgiou, M. (2020). Role-play activities as a framework for developing argumentation skills on biological issues in secondary education. *American Journal of Educational Research*, 8(1), 7–15.
- Mazzanti, P., & Sani, M. (Eds.). (2021). *Emotions and learning in museums*. NEMO - Network of European Museum Organisations. ISBN: 978-3-9822232-1-6. Available online at:
- Mueller, M. P., Tippins, D., & Bryan, L. A. (2011). The future of citizen science. *Democracy and Education*, 20(1), 2.
- Panu, P. (2020). Anxiety and the ecological crisis: An analysis of eco-anxiety and climate anxiety. *Sustainability* 2020, 12(19), 7836.
- Papoulias, K. P. (2022). *A rising tide: Climate change programming for teens in aquariums and zoos* [Unpublished doctoral dissertation]. San Francisco State University.
- Phillips, T. B., Ballard, H. L., Lewenstein, B. V., & Bonney, R. (2019). Engagement in science through citizen science: Moving beyond data collection. *Science Education*, 103(3), 665–690.
- Raven, P. H. (2020). Biological extinction and climate change. In W. K. Al-Delaimy, V. Ramanathan, & M. Sánchez Sorondo (Eds.), *Health of people, health of planet and our responsibility*. (pp.11-20) Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-31125-4
- Reyes, V. J. (2020). *Family Interpretations of Conservation Messaging in an Aquarium* [Unpublished doctoral dissertation]. Texas State University.
- Roe, D., Seddon, N., & Elliot, N. (2019). *Biodiversity loss is a development issue*. International Institute for Environment and Development. ISBN 978-1-78431-688-4. Available online at:
- Rossi-Linnemann, C., & Martini, G. (Eds.). (2019). *Art in science museums*. Routledge. DOI: 10.4324/9780429491597
- Sadler, T. D. (2004). Informal reasoning regarding socioscientific issues: A critical review of research. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(5), 513–536.
- Sadler, T. D., Romine, W. L., & Topçu, M. S. (2016). Learning science content through socio-scientific issues-based instruction: A multi-level assessment study. *International Journal of Science Education*, 38(10), 1622–1635
- Science Task Force for the UN Decade on Ecosystem Restoration. (2021). *Science-based ecosystem restoration for the 2020s and beyond*. IUCN. Available online at:
- Sforzi, A., Tweddle, J., Vogel, J., Lois, G., Wägele, W., Lakeman-Fraser, P., & Vohland, K. (2018). Citizen science and the role of natural history museums. In Hecker, S., Haklay, M., Bowser, A., Makuch, Z., Vogel, J. & Bonn, A. 2018. *Citizen Science: Innovation in Open Science, Society and Policy*. (pp.429-444) UCL Press.
- Simon, N. (2016). *The art of relevance*. Museum 2.0.
- Special Eurobarometer 481. (2019). *Attitudes of Europeans towards Biodiversity Report*. European Commission. Available online at:
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81–98.
- Terradas, A., & Wagensberg, J. (2006). *Cosmocaixa: The total museum: Through conversation between architects and museologists*. Sacyr Sal.
- Thomas, N. (2016). The return of curiosity: *What museums are good for in the 21st century*. Reaktion Books Ltd.

- Wagensberg, J. (2005). Wagensberg, J. (2005). The "total" museum, a tool for social change. *História, Ciências, Saúde-Manguinhos*, 12, 309-321.
- Wagensberg, J. (2009). The hypercubic showcase of sudden understanding (opinion). *Museum Practice*, 47, 11.
- Wagensberg, J. (2015). La revolución de lenguaje museográfico. *THEMA, La revue des Musées de la Civilisation*, 2, 118-127.
- Wattchow, B. (2021). Place-responsiveness in outdoor environmental education. In G. Thomas, J. Dymont, & H. Prince (Eds.), *Outdoor environmental education in higher education. International explorations in outdoor and environmental education* (Vol. 9). (pp. 101-110) Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-75980-3\_9.
- Zeidler, D. L., & Nichols, B. H. (2009). Socioscientific issues: Theory and practice. *Journal of Elementary Science Education*, 21(2), 49-58.



## Capítulo 5

# ¿Qué impacto tiene la evolución en nuestras vidas?



# ¿Qué impacto tiene la evolución en nuestras vidas?

Alex Jeffries<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Life Sciences, Milner Centre for Evolution, University of Bath, Claverton Down, Bath, BA2 7AY, UK

## Resumen:

La enseñanza de la evolución puede ser un desafío porque muchas veces parece carecer de contexto o relevancia en el mundo real. Por consiguiente, un problema en educación para la evolución está en identificar y en mantener el interés en la materia, lo que puede facilitar y reforzar el compromiso con la enseñanza. Existe una amplia gama de “ganchos” potenciales para la educación evolutiva, y este capítulo presenta algunos de ellos en un intento de proporcionar inspiración. Se presenta una discusión sobre cómo tener una comprensión adecuada de la filogenética puede proporcionar una perspectiva ética sobre el lugar de la humanidad en la naturaleza. Se expone, además, una discusión sobre cómo la investigación evolutiva nos ayuda a predecir los cambios en la biodiversidad que ocurren como resultado del cambio climático. A continuación, se discute la medicina evolutiva utilizando el cáncer y los nuevos métodos de tratamiento como enfoque. Finalmente, se presenta una discusión sobre los fundamentos evolutivos de la COVID-19, en el contexto de la responsabilidad de un individuo hacia la sociedad.

### PALABRAS CLAVE

*Ética, Filogenia, Alteraciones climáticas, Biodiversidad, Cáncer, COVID-19.*

## 1. ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE EXPLORAR LA EVOLUCIÓN EN CONTEXTOS REALES?

Todos los/as educadores/as saben, aunque solo sea por experiencia personal, que los/as estudiantes están más comprometidos cuando tienen interés en un tema (ver Silvia, 2006 y Silvia, 2008 para revisiones de la psicología del interés). “Cuando están interesados, los estudiantes persisten más en las tareas de aprendizaje, pasan más tiempo estudiando, leen más profundamente, recuerdan más de lo que leen y obtienen mejores calificaciones en sus clases” (Silvia, 2008). El interés a menudo se desencadena y/o se mantiene al tener un marco de referencia para una disciplina (es decir, cómo encaja en un contexto más amplio).

Los temas que son directamente relevantes para los/as estudiantes, o que tienen una relación tangible con la vida diaria de los/as estudiantes, son susceptibles de generar más interés (Silvia, 2006). Aunque la curiosidad es también una fuerza que genera interés, es frágil y muchas veces bloqueada por la arbitrariedad subjetiva y las limitaciones de los currículos escolares y las presiones de la evaluación (Silvia, 2006, 2008). Cabe destacar que la resolución de problemas está estrechamente relacionada con el interés y la curiosidad.

Los seres humanos parecen sentirse naturalmente atraídos por los problemas como fuente de interés, siempre que parezca probable que los problemas sean abordables (Silvia, 2006). Si un tema se plantea como un problema a resolver o involucra la resolución de problemas, a menudo hay un aumento en la motivación del estudiante para aprender y apoya los enfoques pedagógicos del “aprendizaje basado en problemas” (Harackiewicz et al., 2016).

Por lo tanto, es natural que, en un intento de maximizar la participación del alumnado, los/as docentes hagan un esfuerzo significativo para encontrar “puntos de interés” o “ganchos” para los temas, proporcionando ejemplos comprensibles, diseñando el contexto, planteando problemas relevantes, apelando a la curiosidad, etc. Este es un tema de investigación profundo y amplio en psicología cognitiva, pedagogía y

andragogía en general (para una revisión muy accesible, ver Willingham, 2009).

Desafortunadamente, para muchos, la evolución es un tema que puede parecer muy alejado de la vida cotidiana y, por lo tanto, se considera abstracto e incomprensible, o incluso aburrido. Los/as educadores pueden apelar a la curiosidad y la novedad para captar la atención de los estudiantes. La paleontología es una entrada natural y efectiva en la evolución debido a la novedad de los organismos desconocidos.

Esto a menudo se basa en gran medida en los dinosaurios (Salmi et al., 2016) debido a sus apariencias inusuales, mientras que también se basa en la violencia con la esperanza de atraer la atención de los/as estudiantes (con *Tyrannosaurus rex* y *Velociraptor* ocupando un lugar destacado en este sentido). Asimismo, dado que los fósiles son objetos difíciles de interpretar e imaginar como seres vivos, a menudo se confía mucho en las representaciones artísticas especulativas, algo en lo que la animación digital ha sobresalido.

A esta escala, la evolución humana, que incluye a nuestras especies hermanas extintas como los Neandertales y los Denisovanos (Callaway, 2016), es otro tema con el que los/as estudiantes suelen relacionarse, por razones obvias. Sin embargo, existen limitaciones para ubicar la paleontología, y por lo tanto la evolución, en contexto, ya que los objetos de estudio se encuentran figurativa y literalmente alejados de la vida del alumnado.

Además, los plazos previstos son típicamente de millones o cientos de miles de años, por lo tanto, más allá de la comprensión intuitiva (Cately y Novick, 2009), dándole al tema un aire algo esotérico y sensación irrelevante. Como puerta de entrada a la evolución, esto puede resultar contraproducente si los/as estudiantes obtienen la impresión de que el tema se trata de cosas muertas hace mucho tiempo que solo hacen sangrientas apariciones en películas. Lo que se necesita son ejemplos, contextos y problemas para la evolución que sean más fácilmente relacionables con los/as estudiantes. Algo en el

## 2. EVOLUCIÓN Y ÉTICA

“aquí y ahora” que se pueda reconocer como relevante o útil para el individuo. El problema de encontrar tales “ganchos” está lejos de ser resuelto, en parte porque el interés es muy subjetivo e idiosincrásico, lo que hace es difícil encontrar ejemplos, o principios, universales y claros (Borgerding y Kaya, 2022; Jördens y Hamman, 2019).

Otro desafío es que, aunque la evolución es la causa subyacente o principio explicativo de las entidades biológicas y fenómenos, este vínculo a menudo se esconde debajo de la superficie, es sutil para apreciar y no es obligatoriamente necesario para una comprensión funcional del tema. El título del influyente ensayo de Theodosius Dobzhansky, *“Nada en biología tiene sentido excepto a la luz de la evolución”*, es a menudo presentado por aquellos que ya tienen conocimientos sobre el área como una especie de argumento para estudiar la evolución.

Sin embargo, rara vez ocurre que conocimiento y comprensión de un sistema biológico requieran necesariamente una perspectiva evolutiva. Por ejemplo, se puede aprender anatomía con bastante eficacia sin saber nada sobre la evolución de las formas homólogas.

Por lo tanto, el desafío para el/la educador/a es encontrar y presentar ejemplos de evolución a partir de diferentes perspectivas, que la sitúen en contextos donde tenga un impacto en nuestras vidas en el presente, con la esperanza de que esto despierte el interés suficiente en los estudiantes y permita que se involucren más con el tema.

Con base en la discusión anterior, puede parecer extraño comenzar con el tema de la evolución y la ética. Sin embargo, debemos tener en cuenta que los conceptos de ética, moralidad, justicia y equidad, entre otros, suelen ser una gran preocupación para las personas, especialmente los/as niños/as y adolescentes en edad escolar, incluso si no conocen la semántica o carecen de un conocimiento desarrollado de los conceptos (Malti et al., 2021). La forma en que la evolución intersecciona/se cruza e informa a la ética es un área global con una larga historia de pensamiento que se remonta a Darwin (para revisiones, véase Oldroyd, 1983; Ruse y Richards, 2017).

La teoría evolutiva se ha utilizado como un principio explicativo para una amplia gama de comportamientos humanos, desde la forma en que funcionan las economías de mercado hasta la forma en que hombres y mujeres se relacionan entre sí y la dinámica familiar. Tales explicaciones se han resumido típicamente como *“darwinismo social”* o *“psicología darwiniana”*.

Como era de esperar, estas investigaciones filosóficas, sociológicas y psicológicas suelen ser muy controvertidas y litigiosas. Esto se debe principalmente al hecho de que se originan en estudios observacionales por necesidad. Es imposible, o al menos extremadamente difícil, diseñar experimentos de intervención robustos para investigar estas hipótesis de la misma manera que se podría hacer para un sistema biológico en el laboratorio.

En lugar de meterse en *las camisas de once varas* del darwinismo social, un ejemplo menos controvertido de la intersección de la teoría evolutiva y la ética trata de la perspectiva filosófica sobre el lugar de la humanidad en el mundo natural. Cada vez somos más conscientes y estamos informados formalmente sobre el cambio climático, la invasión de hábitats y ecosistemas, y las amenazas a la biodiversidad, entre otros desafíos. Como herederos del mundo, hay mucho interés propio entre las personas en estos temas, lo que contribuye en gran medida a que se involucren en su estudio. Por lo tanto,

dar a los/as jóvenes un sentido de perspectiva sobre su lugar en el mundo natural es un tema de vital importancia que probablemente resuene favorablemente, ya que los/as jóvenes generalmente quieren dar lo mejor de sí mismos/as como ciudadanos/as del mundo (p. ej., Kuo y Jordan, 2019).

Las llamadas para cambiar nuestra perspectiva sobre el lugar y el papel de la humanidad en el mundo natural están aumentando (ej., Hulme, 2020). Cambiar la perspectiva de la humanidad como la *"parte superior de la escalera"* evolutiva (antropocentrismo), mediante la corrección de una interpretación común pero errónea de la evolución, podría ayudar en parte a abordar nuestra arrogancia.

La adaptación evolutiva a menudo se describe incorrectamente como una progresión lineal de criaturas desde formas ancestrales "primitivas" a formas más "avanzadas". La mayoría habrá visto *memes* evolutivos basados en una serie de imágenes (generalmente mostradas de izquierda a derecha) de figuras cada vez más erguidas, comenzando con un simio y terminando con un humano de aspecto moderno.

Ocasionalmente, una versión humorística de esta imagen agrega una figura humana final, encorvada sobre una computadora, lo que sugiere una "regresión" a una forma más primitiva. Desafortunadamente, estas imágenes son completamente inexactas en su descripción del cambio evolutivo, ya que lo presentan como una cadena lineal de eventos y como una progresión de lo primitivo a lo avanzado. Esta progresión lineal también es común en muchas otras representaciones de la evolución y, a veces, es realizada incluso por biólogos/as (Schramm y Schmiemann, 2019).

En cambio, el camino de la adaptación y diversificación evolutiva sigue un patrón similar a un árbol ramificado, técnicamente llamado árbol filogenético o simplemente filogenia. Esta estructuración jerárquica de la historia evolutiva es uno de los entendimientos fundamentales que

surgieron del estudio de la evolución (Gregory, 2008).

Aunque el concepto es anterior a Darwin, fue el naturalista quien lo transformó en un concepto coherente y fue inmediatamente apreciado por su poder explicativo (Ragan, 2009). El concepto de árbol filogenético ha resistido la prueba del tiempo, siendo ampliamente respaldado por múltiples fuentes de pruebas en la era de la biología molecular (Page y Holmes, 1998).

A pesar de ser un concepto relativamente simple y elegante, un árbol filogenético tiene una profundidad sutil cuando se trata de interpretación (Gregory, 2008; Schramm y Schmiemann, 2019). Nuevamente, a menudo surge un sesgo engañoso cuando se presenta un árbol. Muy a menudo, especialmente para árboles simplificados utilizados en educación, una filogenia se organiza desde formas aparentemente más primitivas en el lado izquierdo de una página/pantalla hasta formas aparentemente más avanzadas en el lado derecho de la página/pantalla.

Esta sutileza en la presentación incorpora subconscientemente la idea de que las formas ancestrales "*primitivas*" evolucionan hacia formas más "*avanzadas*" y que hay una jerarquía progresiva en los organismos, encontrando algo "*en la parte superior*" o en el "*abajo*". El "*líder*" generalmente es un ser humano (o al menos un animal u organismo multicelular), lo que refuerza un sesgo antropocéntrico (Baum et al., 2005; Baum y Smith, 2012; Sandvik, 2009). Esta presentación sesgada y su mala interpretación es tan perniciosa, incluso entre muchos científicos/as, que la "*organización*" Tree Thinking ([tree-thinking.org](http://tree-thinking.org)) se formó en un intento de educar y contrarrestar dicha visión (Baum et al., 2005; Meisel, 2010).

Para aquellos que deseen profundizar en esta reflexión, el libro de Baum y Smith (2012) proporciona una excelente y extensa descripción de la filogenética, al tiempo que enfatiza el "*pensamiento de árbol*" adecuado. Una filogenia se puede comparar con un *móvil* colgante que es sacudido por la brisa. Si bien todos los cables

mantienen las mismas conexiones, los elementos móviles pueden moverse uno encima del otro para presentar múltiples apariencias diferentes. Así, una filogenia con humanos en el medio o en el lado izquierdo o derecho puede ser equivalente y estas pueden ser representaciones perfectamente válidas de la relación evolutiva (para ejemplos, ver las figuras en Baum et al., 2005).

El conocimiento evolutivo y la interpretación correcta de los árboles filogenéticos son importantes para el aprendizaje de los estudiantes, de modo que puedan apreciar que no hay un “líder” en el mundo natural. Todos los organismos existentes están igualmente clasificados, y cada individuo, incluido el lector, tiene una línea de descendencia independiente e ininterrumpida que se remonta a unos 4 mil millones de años (Javaux, 2019; Krishnamurthy, 2020).

Desde esta perspectiva evolutiva, los humanos no tienen más “derecho” o lugar en el mundo natural que cualquier otro organismo. Esta debería ser una perspectiva humilde y puede ayudar a las generaciones futuras a adoptar un enfoque más equilibrado del mundo natural y su lugar en él.

### 3. CAMBIO(S) EN LA BIODIVERSIDAD

Como se discutió en el punto anterior, algunas de las preocupaciones mundiales más apremiantes en la actualidad incluyen los cambios en el clima, los *hábitats* y los ecosistemas y los muchos y variados impactos que estas formas de cambio tendrán en nuestras vidas a través de sus efectos en la biosfera. A medida que aumentan las temperaturas promedio regionales y globales, se produce un efecto colateral en el paisaje que puede tener un impacto significativo en la biodiversidad, desde la escala individual hasta la escala de todo el ecosistema y desde los organismos unicelulares microscópicos hasta los organismos multicelulares más grandes. Si

el entorno cambia demasiado rápido sin tiempo suficiente para que los organismos se adapten o se trasladen a entornos más adecuados, existe un riesgo real de extinción (Carroll et al., 2014).

Suficientes eventos de extinción, o incluso la extinción de ciertas especies clave, pueden resultar en el colapso de un ecosistema a gran escala e implicaciones impredecibles, pero muy probablemente negativas, para la humanidad (Ceballos et al., 2015). El informe periódico sobre la biodiversidad global y los servicios de los ecosistemas publicado por la *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (<https://ipbes.net>) proporciona información tan voluminosa que se vuelve deprimente sobre la escala y el ritmo acelerado de las extinciones. Por lo tanto, no debería haber ninguna discusión de que este es un problema urgente para todos/as.

La evaluación de la biodiversidad en beneficio del conocimiento básico y como medio para monitorear los impactos del cambio climático y otros cambios en *hábitats* se ha convertido en un elemento básico de la investigación evolutiva (Lankau et al., 2010). El poder del monitoreo de la biodiversidad se ha incrementado considerablemente con el desarrollo de métodos genéticos de “código de barras”, que se han ampliado considerablemente utilizando tecnologías de secuenciación de próxima generación para convertirse en métodos de “metacodificación” (Taberlet et al., 2012). El gran aumento en la especificidad y sensibilidad de los métodos moleculares ha ayudado en los estudios taxonómicos y filogenéticos para aumentar la comprensión más detallada de la composición de la biodiversidad, monitorearla en tiempo real y aumentar el conocimiento evolutivo en general (Waldvogel et al., 2020).

Por ejemplo, utilizando técnicas de reacción en cadena de la polimerasa (PCR), hoy en día sabemos que la biodiversidad microbiana es mucho mayor que la que podemos cultivar en el laboratorio. Estos microbios no cultivables se conocieron como la “*materia oscura microbiana*”

inexplorada, que probablemente constituye el 99% de las especies microbianas (Jiao et al., 2020). Aunque esta biodiversidad sin explotar tiene un gran potencial para aplicaciones biotecnológicas (Alam et al., 2021), sigue siendo incierto cómo responderá al cambio climático.

En este ámbito, hubo un paradigma de gradualismo en la evolución que se originó con Darwin, quien se inspiró en el libro de Lyell sobre geología, que a su vez contribuyó a establecer la edad del planeta y su tasa de cambio (es decir, la escala geológica). En muchos aspectos, el gradualismo de la evolución ha sido aceptado y no ha sido cuestionado fuertemente hasta tiempos recientes. Curiosamente, el ejemplo de libro de texto de la selección natural de la polilla *Biston betularia* como resultado de la contaminación cambiante en el paisaje demuestra la adaptación relativamente rápida de los fenotipos (Cook y Saccheri, 2013).

Más recientemente, se han observado otros ejemplos de adaptación de especies en sincronía con los cambios ecológicos (Hairston et al., 2005; Hoffmann y Flatt, 2022; Holt, 1990), incluido el icónico pinzón de Darwin (Lamichhaney et al., 2018). Si bien es probable que los cambios graduales sostenidos durante largos períodos de tiempo sean el ritmo normal de evolución, los casos de cambio rápido quizás hayan sido subestimados y podrían ofrecer una comprensión más matizada de la evolución biológica en su conjunto (Bonnet et al., 2022).

La tasa y el patrón de adaptación de las especies en respuesta al cambio climático se ha convertido en un área importante de investigación evolutiva porque puede ayudarnos a evaluar los riesgos para la dinámica de la biodiversidad y anticipar estrategias preventivas y/o de mitigación. Aunque investigaciones recientes han demostrado que la selección natural y la adaptación en algunos casos pueden ocurrir mucho más rápido de lo que se pensaba, la magnitud de este fenómeno sigue sin estar clara. Por lo tanto, la investigación continúa desde el pasado paleontológico profundo (p. ej., Benton, 2009; Cohen et al., 2022; Tang et al.,

2018) hasta el presente y el futuro inmediato (p. ej., Thuiller et al., 2011) y las escalas local y global.

Este tipo de investigación nos proporciona una mayor comprensión de cómo la biodiversidad puede responder al cambio climático. Si bien es tentador esperar que la biodiversidad “sobreviva” de una forma u otra debido a la rápida adaptación y, junto con ella, también mejore la suerte de la humanidad, continúa habiendo incertidumbre acerca de si esto será suficiente.

## 4. CÁNCER

Una de las áreas de más rápido crecimiento donde la evolución está teniendo un impacto directo en la sociedad es la medicina evolutiva, que ahora se acerca a una disciplina de estudio coherente por derecho propio (Perry, 2021). Cada vez más, la comprensión de las causas y la progresión de las enfermedades infecciosas y no transmisibles, junto con su prevención y tratamiento, está siendo significativamente informada por el conocimiento evolutivo.

Se pueden establecer vínculos directos entre la enfermedad y la evolución, porque estos sistemas son el resultado de procesos evolutivos. Alternativamente, dicho vínculo puede ser indirecto o análogo cuando se utiliza una perspectiva evolutiva como marco conceptual para el estudio y tratamiento de una enfermedad.

La medicina evolutiva utiliza ambos enfoques y es rica en oportunidades para generar el interés de los/as estudiantes en la evolución, ya que tanto la enfermedad como la medicina pueden provocar una participación personal directa. Asimismo, existen muchos problemas prácticos y desafíos que se deben resolver para mejorar la atención de la salud. El proceso por el cual las células normales se transforman en células cancerosas (oncogénesis) ha sido caracterizado y organizado por científicos utilizando un conjunto

de “*marcadores*” (Hanahan y Weinberg, 2011). La característica principal es que las células cancerosas pierden el control sobre el ciclo celular y la proliferación, lo que lleva a un crecimiento descontrolado.

Este es el resultado de la acumulación de mutaciones en el ADN de las células que componen los órganos y los “*conducen*” al cáncer (Stratton, 2011). Las células cancerosas ignoran las señales normales que controlan la replicación y la división y, por lo tanto, se dividen cuando no deberían hacerlo. Además, ignoran las señales que deberían impedir la replicación. Por lo general, asimismo, cuando algo sale mal con una célula, existen sistemas que lo eliminan (es decir, muerte celular programada, también conocida como apoptosis). Estos sistemas de autoeliminación son ignorados en gran parte por las células cancerosas. El resultado de la división celular descontrolada conduce a la formación de grandes grupos de células (tumores) dentro de los tejidos, que luego pueden alterar el funcionamiento normal de los órganos relevantes.

Asimismo, las células cancerosas pueden desprenderse de un tumor y diseminarse por todo el cuerpo a numerosos sitios distantes (metástasis) donde forman más tumores, otra característica del cáncer. Dado que las células cancerosas se originan dentro del propio huésped, las respuestas inmunitarias normales que protegen nuestros cuerpos de los invasores externos tienen dificultades para reconocer las células cancerosas como extrañas; por lo tanto, continúa la proliferación descontrolada. A medida que la enfermedad avanza, aumenta el riesgo de insuficiencia orgánica y, como resultado, la muerte.

El cáncer es necesariamente un fenómeno de los organismos multicelulares, pero no afecta a todos los organismos por igual. Se ha utilizado una perspectiva evolutiva para investigar la prevalencia del cáncer entre diferentes animales, con la esperanza de que los conocimientos obtenidos de esto puedan informar los tratamientos en humanos (Merlo et al., 2006). Desde una perspectiva no evolutiva, uno podría predecir que los animales más grandes y

longevos tienen más probabilidades de desarrollar cáncer simplemente como una inevitabilidad probabilística de la cantidad de células que los componen.

Si bien esto es cierto para los individuos dentro de una especie (p. ej., Albanes, 1998), se ha encontrado que casi no hay correlación entre el tamaño corporal o la longevidad y la susceptibilidad al cáncer cuando se comparan diferentes especies de animales (es decir, lo que se denominó *Paradoja de Peto* (Caulin y Maley, 2011)). Esta paradoja se ha explicado utilizando una perspectiva evolutiva. Si la predicción anterior fuera cierta, los animales grandes probablemente desarrollarían cáncer con frecuencia e incluso podrían morir antes de que puedan llegar a la edad reproductiva. Esto tendría un efecto negativo o incluso tóxico sobre la cepa y, por lo tanto, sería seleccionado desfavorablemente.

Por lo tanto, si la selección natural es la explicación de la paradoja de Peto, uno esperaría que los organismos más grandes y de vida más larga contengan mecanismos desarrollados para prevenir el desarrollo del cáncer en primer lugar, o mecanismos efectivos para tratar los cánceres una vez que surjan. Dichos mecanismos deberían proporcionar conocimiento útil para la oncología humana (Kattner et al., 2021).

Esta perspectiva evolutiva sobre el cáncer está comenzando a proporcionar ideas tentadoras. Por ejemplo, parece haber una correlación positiva entre el número de genes supresores de tumores y el tamaño del animal. Los supresores de tumores generalmente actúan sobre las células para prevenir la oncogénesis; por ejemplo, a menudo son proteínas reparadoras del ADN.

Por lo tanto, cuando un gen supresor de tumores muta y se vuelve disfuncional, su función protectora se ve comprometida, lo que lleva a una mayor probabilidad de oncogénesis. Tener múltiples copias de estos genes proporciona redundancia contra la mutación (Lynch y Conery, 2000), lo que parece conferir una mayor protección contra el cáncer. La redundancia mediante el uso de múltiples copias de genes es un concepto conocido como *robustez evolutiva o mutacional* y es una estrategia evolucionada de muchos organismos (Masel & Siegal, 2009).

Se observó una aparente redundancia genética correlacionada con el tamaño corporal y la longevidad con el principal gen supresor de tumores, TP53. El producto proteico de este gen, p53, ayuda a controlar la reparación del ADN, la regulación del ciclo celular y la apoptosis (Lindström et al., 2022).

Los grandes organismos, como los elefantes, tienen un mayor número del gen TP53 en comparación con los humanos, lo que puede explicar por qué no tienen altas tasas de cáncer como sugiere su tamaño (Nuwer, 2022). Esta percepción, entre otras, ha llevado a una mayor investigación sobre el papel del p53 y su potencial como diana terapéutica para el cáncer. Algunos organismos parecen ser curiosas excepciones a la paradoja de Peto. El ejemplo más célebre es la rata topo desnuda (*Heterocephalus glaber*), que tiene la esperanza de vida más larga de los roedores (hasta 30 años de vida) y no parece sufrir cáncer, enfermedades neurodegenerativas y una amplia gama de otras enfermedades (Pamenter y Chen, 2022).

Debido a estas características, se han convertido rápidamente en un sistema modelo popular para los/as investigadores/as (¡y se benefician del “atractivo” de su apariencia inusual para propósitos de enseñanza!). Dado que el uso de este nuevo organismo modelo está en sus inicios, no está claro qué descubrimientos útiles surgirán de estos estudios. Sin embargo, su capacidad inesperada para resistir el estrés oxidativo ya se ha sugerido como una dirección de investigación potencialmente útil (Saldmann et al., 2019).

La teoría evolutiva también puede tener un impacto significativo en nuestra comprensión de los sistemas biológicos que no son, estrictamente hablando, las unidades de evolución normales o familiares (es decir, individuos, poblaciones de individuos, especies, etc.). La progresión del cáncer en el cuerpo a escala celular tiene similitudes con la evolución en que las mutaciones oncogénicas se transmiten a las células de la descendencia. Asimismo, las características fenotípicas de una célula cancerosa están determinadas por el conjunto particular de

mutaciones en el genoma (es decir, el genotipo) (Stratton, 2011).

Aunque este hecho se ha complicado con el descubrimiento de modificaciones epigenéticas (Kanwal y Gupta, 2012), el panorama de las variaciones hereditarias sigue siendo el mismo. Finalmente, el destino de las células descendientes depende de qué tan bien sobrevivan y transmitan sus mutaciones (fitness). Por lo tanto, se cree que en los tumores ocurre un proceso con sorprendentes similitudes con la selección natural de organismos.

Por lo tanto, las células cancerosas pueden verse como linajes genéticos distintos con historias complejas de subpoblaciones dentro de un tumor, similar a una filogenia (Stadler et al., 2021). Esta visión evolutiva del cáncer ha llevado a una comprensión más sofisticada de su progresión y de las características distintivas de determinados tipos de tumores. Las células cancerosas ya no se consideran como un todo uniforme de principio a fin, sino como linajes anidados que acumulan diferentes conjuntos de mutaciones y, por lo tanto, características a medida que el cáncer progresa.

Uno de los principales tratamientos contra el cáncer implica el uso de medicamentos contra el cáncer (quimioterapia). Típicamente, estos fármacos interrumpen la replicación celular y, por lo tanto, trata de prevenir el descontrolado crecimiento tumoral y/o prevenir la metástasis. Por lo tanto, la quimioterapia representa una amenaza para el linaje de células cancerosas y, como en un proceso evolutivo normal, esta presión de selección elimina a las menos aptas, lo que a menudo da como resultado la selección de nuevos mutantes que pueden resistir los fármacos en cuestión (Hanahan y Weinberg, 2011). En este sentido, las células cancerosas se benefician de tener genomas hipermutables que conducen a una alta heterogeneidad genómica dentro de un tumor (Stratton, 2011).

Asimismo, la vida útil de un tumor en términos de división celular (análoga a generaciones de organismos enteros) es equivalente a cientos de miles de años o la vida útil de una especie completa, lo que permite muchas oportunidades de novedades y que sean seleccionadas favorablemente (Fortunato et al., 2017;

## 5. COVID-19 Y CIUDADANÍA INFORMADA

Johnson, 2021; Merlo et al., 2006). Además, una subpoblación pequeña pero importante (menos del 2 %) de células tumorales son células madre cancerosas, que se desconocían hasta 1994. Estas células tienen características que les permiten sobrevivir a la quimioterapia y luego renovar el crecimiento del cáncer (recaída del cáncer) cuando se detuvo la quimioterapia (Nguyen et al., 2012).

Una perspectiva evolutiva sobre la progresión del cáncer ha llevado a estrategias quimioterapéuticas innovadoras que intentan equilibrar la presión selectiva sobre las células cancerosas y la prevención de la evolución de la resistencia a los medicamentos (Aktipis, 2020). En lugar del enfoque tradicional que busca eliminar todas las células cancerosas lo más rápido posible, la terapia adaptativa tiene como objetivo, de una manera un tanto contraintuitiva, controlar el cáncer evitando la selección de células más agresivas o tipos de células resistentes a los medicamentos (Labrie et al., 2022).

La oncología es solo un ejemplo de un área donde la comprensión evolutiva está teniendo un impacto directo en la vida médica cotidiana y solo aumentará sus efectos con el tiempo.

El cáncer es un buen ejemplo de una enfermedad no transmisible cuyo origen, progresión y tratamiento se están investigando amplia y productivamente desde la perspectiva de la biología evolutiva. Más digno, aunque discutible, desde una perspectiva evolutiva es la amplia gama de enfermedades infecciosas. Una perspectiva evolutiva es directamente relevante para los/as médicos, ya que les permite comprender fácilmente el origen, la progresión y los tratamientos de las enfermedades infecciosas.

Sin embargo, con los agentes infecciosos, que por definición se transmiten de un individuo a otro, existe una dimensión adicional de responsabilidad personal hacia el público en general. Además de querer evitar infectarnos nosotros/as mismos, también deberíamos estar interesados en prevenir la propagación de la infección de nosotros/as mismos a los demás. Este es el ámbito de la buena ciudadanía, que se refiere a cómo se comportan los individuos por el bien mayor de la población humana.

En el momento de escribir este artículo, la pandemia de COVID-19 causada por el coronavirus, SARS-CoV-2, continúa progresando a nivel mundial. Esta pandemia sin duda pasará a la historia como una de las principales por la pérdida de vidas y los daños generales que ha causado. También ha sido una pandemia verdaderamente sin precedentes en términos de la respuesta global y la amplitud, profundidad y volumen de información (y desinformación) rápidamente disponibles sobre la enfermedad, así como su prevención y tratamiento. Un problema importante para el público ha sido comprender la ciencia detrás de la pandemia, que ha influido en las intervenciones médicas y de salud pública implementadas por varios gobiernos (Strydom et al., 2022).

En el centro de las estrategias de salud pública ha estado la evolución de este virus, aunque no siempre es evidente de inmediato. Por lo tanto, una mejor comprensión de los procesos evolutivos por parte del público podría haber resultado en mejores respuestas individuales a diversas intervenciones de salud pública.

Una vez que el SARS-CoV-2 infectó a un

número suficiente de personas y fue declarado como pandemia, los desafíos relacionados con su control, y más aún la esperanza de eliminarlo, aumentaron exponencialmente. De particular preocupación fue predecir cómo podría evolucionar el virus, adquirir diferentes características fenotípicas y potencialmente evadir nuestros esfuerzos de salud pública y/o convertirse en una enfermedad más dañina (Callaway, 2020). Este es un fenómeno evolutivo básico en el que un organismo que se reproduce se somete a una fuerte presión de selección.

Un linaje viral sólo sobrevivirá si logra un fenotipo a través de mutaciones que lo hagan más apto (esto es, capaz de mantener o incluso aumentar su número de descendientes, propagándose). Sin la génesis de las mutaciones, no hay esperanza de que surja una variante que pueda escapar al sistema inmunitario (preparado mediante infección natural o vacunación) o volverse más transmisible, sean cuales sean los mecanismos que lo afectan. Una clave para evolucionar es la mutación, y la clave para la mutación es la replicación del genoma.

Así, los lugares o situaciones donde hay brotes descontrolados de enfermedades son ideales para la aparición de nuevas mutaciones, algunas de las cuales pueden ser más peligrosas que las variantes anteriores.

Desde el inicio de la pandemia de COVID-19, virólogos y epidemiólogos han monitoreado de cerca la tasa y diversidad de mutaciones del virus en tantas dimensiones como sea posible, una iniciativa que se ha tomado en diversos grados en diferentes países pero que, en general, representa el mayor esfuerzo de vigilancia molecular de la historia (Oude Munnink, 2021). Como predijo la teoría evolutiva, no pasó mucho tiempo antes de que surgieran variantes virales ("*variantes preocupantes*"), con diferentes características de enfermedad e impactos significativamente diferentes en las intervenciones sanitarias. Muchos comentaristas argumentaron que la virulencia eventualmente disminuiría y, por lo tanto, pidieron moderación en los esfuerzos de salud pública. Sin embargo, el argumento de que un patógeno inevitablemente evolucionará hacia una forma

menos virulenta es una hipótesis persistente para la cual no se han encontrado pruebas concluyentes hasta la fecha (Bull y Lauring, 2014). El único ejemplo claro en el que se ha estudiado la evolución natural de la virulencia a lo largo del tiempo es el virus del mixoma, que causa mixomatosis en conejos (Alves et al., 2019; Kerr et al., 2017).

El curso de evolución de este virus durante muchos años muestra que la virulencia se mantiene y no disminuye. El hecho de que todavía vivamos con muchas enfermedades graves que se originaron hace mucho tiempo también es una evidencia indirecta de que los patógenos no se vuelven inevitablemente menos virulentos (Bull y Lauring, 2014).

La mayoría de los virus, y en particular los virus con genomas de ARN, tienen altas tasas de mutación durante la replicación genómica (Domingo et al., 2021a). Por lo tanto, cada replicación del genoma viral es una oportunidad para que surja una nueva mutación. Dentro de una célula individual y del huésped como un todo, típicamente surgen un número verdaderamente amplio de variantes de secuencias virales; acumulativamente referido como una *cuasi-especie viral* (Domingo et al., 2021b). Teniendo en cuenta la gran cantidad de huéspedes infectados, es probable que todas las posibles variantes de secuencia del SARS-CoV-2 surgieran varias veces durante la pandemia. Entonces, es solo una cuestión de probabilidad que una de estas eventualmente se propague a suficientes huéspedes nuevos para convertirse en una nueva variante que se propague a través de la población.

Debido a las inevitabilidades probabilísticas y evolutivas de la variación y la selección, la única forma de evitar que surjan nuevas variantes es evitar la replicación. Si bien no es posible prevenir por completo la replicación (actualmente no tenemos una vacuna esterilizante), limitarla lo más posible a través de la vacunación y comportamientos apropiados (uso de mascarillas, distanciamiento social, etc.) limitaría las posibilidades de que surjan variantes, convirtiéndose así en un imperativo ético para cada individuo.

Sin duda, apreciar este contexto evolutivo

facilitaría la toma de decisiones informadas sobre el comportamiento personal. La moraleja de esta historia es que, si bien la enfermedad es inevitable, las pandemias no tienen por qué serlo en la era de la vacunación y otras intervenciones modernas de salud pública.

## 6. CONCLUSIÓN

La amplitud, profundidad y volumen de nuestra comprensión de la evolución y sus ámbitos de influencia son tan grandes que desafían por completo la síntesis en un solo capítulo de libro. Los procesos evolutivos, los resultados y el conocimiento impactan nuestras vidas en un número casi incontable de formas. En su mayor parte, los sistemas afectados son las propias entidades biológicas evolucionadas; sin embargo, otros no lo son y podrían beneficiarse de los principios evolutivos por analogía.

Por ejemplo, los algoritmos evolutivos, en los que los programas informáticos pasan por ciclos de “mutación” y “selección”, son una metodología importante en informática (para obtener una descripción general, consúltese Sloss y Gustafson, 2016). Otro ejemplo es un método filogenético que se está utilizando en el análisis lingüístico y literario para investigar cómo “evolucionaron” las lenguas y los textos (p. ej., Barbrook et al., 1998). Algunos impactos de la evolución son mucho más obvios y comprensibles que otros, por lo que pueden inspirar a educadores/as y estudiantes por igual. Otros impactos son sutiles y están ocultos a la consideración casual.

El desafío para el/la docente es identificar contextos atractivos y ejemplos del mundo real para los temas a enseñar y que funcionarán mejor para sus alumnos/as en particular.

Para obtener más inspiración y una cobertura más amplia de este tema, consúltese Oldroyd (1983), Losos y Lenski (2016) y Johnson (2021).

## REFERENCIAS

- Aktipis, C. A. (2020). *The cheating cell: How evolution helps us understand and treat cancer*. Princeton University Press.
- Alam, K., Abbasi, M. N., Hao, J., Zhang, Y., & Li, A. (2021). Strategies for natural products discovery from uncultured microorganisms. *Molecules*, 26(10), 2977.
- Albanes, D. (1998). Height, early energy intake, and cancer. Evidence mounts for the relation of energy intake to adult malignancies. *BMJ*, 317(7169), 1331–1332.
- Alves, J. M., Carneiro, M., Cheng, J. Y., Lemos de Matos, A., Rahman, M. M., Loog, L., Campos, P. F., Wales, N., Eriksson, A., Manica, A., Strive, T., Graham, S. C., Afonso, S., Bell, D. J., Belmont, L., Day, J. P., Fuller, S. J., Marchandea, S., Palmer, W. J., Queney, G., ... Jiggins, F. M. (2019). Parallel adaptation of rabbit populations to myxoma virus. *Science*, 363(6433), 1319–1326.
- Barbrook, A. C., Howe, C. J., Blake, N., & Robinson P. (1998). The phylogeny of The Canterbury Tales. *Nature*, 394, 839.
- Baum, D. A., Smith, S. D., & Donovan, S. S. (2005). Evolution. The tree-thinking challenge. *Science*, 310(5750), 979–980.
- Baum, D. A., & Smith, S. D. (2012). *Tree thinking: An introduction to phylogenetic biology*. Roberts and Co.
- Benton, M. J. (2009). The Red Queen and the Court Jester: Species diversity and the role of biotic and abiotic factors through time. *Science*, 323(5915), 728–732.
- Bonnet, T., Morrissey, M. B., de Villemereuil, P., Alberts, S. C., Arcese, P., Bailey, L. D., Boutin, S., Brekke, P., Brent, L., Camenisch, G., Charmantier, A., Clutton-Brock, T. H., Cockburn, A., Coltman, D. W., Courtiol, A., Davidian, E., Evans, S. R., Ewen, J. G., Festa-Bianchet, M., de Franceschi, C., ... Kruuk, L. (2022). Genetic variance in fitness indicates rapid contemporary adaptive evolution in wild animals. *Science*, 376(6596), 1012–1016.
- Borgerding, L. A., & Kaya, F. (2022). Is knowledge of evolution useful? A mixed methods examination of college biology students' views. *International Journal of Science Education*, 44(2), 271–296.
- Bull, J. J., & Luring, A. S. (2014). Theory and empiricism in virulence evolution. *PLOS Pathogens*, 10(10), e1004387.
- Callaway, E. (2016). Evidence mounts for interbreeding bonanza in ancient human species. *Nature*,
- Callaway, E. (2020). The coronavirus is mutating – does it matter? *Nature*, 585(7824), 174–177.
- Carroll, S. P., Jørgensen, P. S., Kinnison, M. T., Bergstrom, C. T., Denison, R. F., Gluckman, P., Smith, T. B., Strauss, S. Y., & Tabashnik, B. E. (2014). Applying evolutionary biology to address global challenges. *Science*, 346(6207), 1245993.
- Catley, K. M., & Novick, L. R. (2009). Digging deep: Exploring college students' knowledge of macroevolutionary time. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(3), 311–332.
- Caulin, A. F., & Maley, C. C. (2011). Peto's Paradox: Evolution's prescription for cancer prevention. *Trends in Ecology & Evolution*, 26(4), 175–182.
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M., & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1(5), e1400253.
- Cohen, A. S., Du, A., Rowan, J., Yost, C. L., Billingsley, A. L., Campisano, C. J., Brown, E. T., Deino, A. L., Feibel, C. S., Grant, K., Kingston, J. D., Lupien, R. L., Muiruri, V., Owen, R. B., Reed, K. E., Russell, J., & Stockhecke, M. (2022). Plio-Pleistocene environmental variability in Africa and its implications for mammalian evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(16), e2107393119.
- Cook, L. M., & Saccheri, I. J. (2013). The peppered moth and industrial melanism: Evolution of a natural selection case study. *Heredity*, 110(3), 207–212.
- Domingo, E., García-Crespo, C., Lobo-Vega, R., & Perales, C. (2021a). Mutation rates, mutation frequencies, and proofreading-repair activities in RNA virus genetics. *Viruses*, 13(9), 1882.
- Domingo, E., García-Crespo, C., & Perales, C. (2021b). Historical perspective on the discovery of the quasispecies concept. *Annual Review of Virology*, 8(1), 51–72.
- Fortunato, A., Boddy, A., Mallo, D., Aktipis, A., Maley, C. C., & Pepper, J. W. (2017). Natural selection in cancer biology: From molecular snowflakes to trait hallmarks. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 7(2), a029652.

- Gregory, T. R. (2008). Understanding evolutionary trees. *Evolution Education and Outreach*, 1, 121–137.
- Hairston, N., Ellner, S., Geber, M., Yoshida, T., & Fox, J. (2005). Rapid evolution and the convergence of ecological and evolutionary time. *Ecology Letters*, 8(10), 1114–1127.
- Hanahan, D., & Weinberg, R. A. (2011). Hallmarks of cancer: The next generation. *Cell*, 144(5), 646–674.
- Harackiewicz, J. M., Smith, J. L., & Priniski, S. J. (2016). Interest matters: The importance of promoting interest in education. *Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences*, 3(2), 220–227.
- Hoffmann, A. H., & Flatt, T. (2022). The rapid tempo of adaptation. *Science*, 375(6586), 1226–1227.
- Holt, R. D. (1990). The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology & Evolution*, 5(9), 311–315.
- Hulme, P. E. (2020). One Biosecurity: A unified concept to integrate human, animal, plant, and environmental health. *Emerging Topics in Life Sciences*, 4(5), 539–549.
- Javaux, E. J. (2019). Challenges in evidencing the earliest traces of life. *Nature*, 572(7770), 451–460.
- Jiao, J. Y., Liu, L., Hua, Z. S., Fang, B. Z., Zhou, E. M., Salam, N., Hedlund, B. P., & Li, W. J. (2020). Microbial dark matter coming to light: Challenges and opportunities. *National Science Review*, 8(3), nwaa280.
- Johnson, N. A. (2021). *Darwin's reach: 21st century applications of evolutionary biology*. CRC Press.
- Jördens, J., & Hammann, M. (2019). Driven by topics: High school students' interest in evolutionary biology. *Research in Science Education* 51, 599–616.
- Kanwal, R., & Gupta, S. (2012). Epigenetic modifications in cancer. *Clinical Genetics*, 81(4), 303–311.
- Kattner, P., Zeiler, K., Herbener, V. J., Ferla-Brühl, K., Kassubek, R., Grunert, M., Burster, T., Brühl, O., Weber, A. S., Strobel, H., Karpel-Massler, G., Ott, S., Hagedorn, A., Tews, D., Schulz, A., Prasad, V., Siegelin, M. D., Nonnenmacher, L., Fischer-Posovszky, P., Halatsch, M. E., ... Westhoff, M. A. (2021). What animal cancers teach us about human biology. *Theranostics*, 11(14), 6682–6702.
- Kerr, P. J., Cattadori, I. M., Liu, J., Sim, D. G., Dodds, J. W., Brooks, J. W., Kennett, M. J., Holmes, E. C., & Read, A. F. (2017). Next step in the ongoing arms race between myxoma virus and wild rabbits in Australia is a novel disease phenotype. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(35), 9397–9402.
- Krishnamurthy, R. (2020). Chemical origins of life: Its engagement with society. *Trends in Chemistry*, 2(5), 406–409.
- Kuo, M., & Jordan, C. (2019). Editorial: The natural world as a resource for learning and development: From schoolyards to wilderness. *Frontiers in Psychology*, 10, 1763.
- Labrie, M., Brugge, J. S., Mills, G. B., & Zervantonakis, I. K. (2022). Therapy resistance: Opportunities created by adaptive responses to targeted therapies in cancer. *Nature Reviews Cancer*, 22, 323–339.
- Lamichhaney, S., Han, F., Webster, M. T., Andersson, L., Grant, B. R., & Grant, P. R. (2018). Rapid hybrid speciation in Darwin's finches. *Science*, 359(6372), 224–228.
- Lankau, R., Jørgensen, P. S., Harris, D. J., & Sih, A. (2011). Incorporating evolutionary principles into environmental management and policy. *Evolutionary Applications*, 4(2), 315–325.
- Lindström, M. S., Bartek, J., & Maya-Mendoza, A. (2022). p53 at the crossroad of DNA replication and ribosome biogenesis stress pathways. *Cell Death and Differentiation*, 29(5), 972–982.
- Losos, J. B., & Lenski, R. E. (Eds.). (2016). *How evolution shapes our lives: Essays on biology and society*. Princeton University Press.
- Lynch, M., & Conery, J. S. (2000). The evolutionary fate and consequences of duplicate genes. *Science*, 290(5494), 1151–1155.
- Malti, T., Galarneau, E., & Peplak, J. (2021). Moral development in adolescence. *Journal of Research on Adolescence*, 31(4), 1097–1113.
- Masel, J., & Siegal, M. L. (2009). Robustness: Mechanisms and consequences. *Trends in Genetics*, 25(9), 395–403.
- Meisel, R. P. (2010). Teaching tree-thinking to undergraduate biology students. *Evolution*, 3(4), 621–628.

- Merlo, L. M., Pepper, J. W., Reid, B. J., & Maley, C. C. (2006). Cancer as an evolutionary and ecological process. *Nature Reviews Cancer*, 6(12), 924–935.
- Nguyen, L. V., Vanner, R., Dirks, P., & Eaves, C. J. (2012). Cancer stem cells: An evolving concept. *Nature Reviews Cancer*, 12(2), 133–143.
- Nuwer, R. (2022). Why elephants don't get cancer. *Scientific American*, 327(4), 22.
- Oldroyd, D. R. (1983). *Darwinian impacts: An introduction to the Darwinian revolution*. New South Wales University Press.
- Oude Munnink, B. B., Worp, N., Nieuwenhuijse, D. F., Sikkema, R. S., Haagmans, B., Fouchier, R., & Koopmans, M. (2021). The next phase of SARS-CoV-2 surveillance: Real-time molecular epidemiology. *Nature Medicine*, 27(9), 1518–1524.
- Page, R. D. M., & Holmes, E. C. (1998). *Molecular evolution: A phylogenetic approach*. Wiley-Blackwell.
- Pamenter, M. E., & Cheng, H. (2022). Supermole-rat to the rescue: Does the naked mole-rat offer a panacea for all that ails us? *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 266, 111139.
- Perry, G. H. (2021) Research: Evolutionary medicine. *eLife*, 10, e69398
- Ragan, M. A. (2009). Trees and networks before and after Darwin. *Biology Direct*, 4, 43.
- Ruse, M., & Richards, R. J. (Eds.). (2017) *The Cambridge handbook of evolutionary ethics*. Cambridge University Press.
- Saldmann, F., Viltard, M., Leroy, C., & Friedlander, G. (2019). The naked mole rat: A unique example of positive oxidative stress. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019, 4502819.
- Salmi, H., Thuneberg, H., & Vainikainen, M-P. (2016). Learning with dinosaurs: A study on motivation, cognitive reasoning, and making observations. *International Journal of Science Education, Part B*, 7(3), 203–218.
- Sandvik, H. (2009). Anthropocentricisms in cladograms. *Biology & Philosophy*, 24(4), 425–440.
- Schramm, T., & Schmiemann, P. (2019). Teleological pitfalls in reading evolutionary trees and ways to avoid them. *Evolution Education and Outreach* 12, 20.
- Silvia, P. J. (2006). *Exploring the psychology of interest*. Oxford University Press.
- Silvia, P. J. (2008). Interest – The curious emotion. *Current Directions in Psychology Research*, 17, 57–60.
- Sloss, A. N., & Gustafson, S. (2020). 2019 Evolutionary algorithms review. In W. Banzhaf, E. Goodman, L. Sheneman, L. Trujillo, & B. Worzel, (Eds.), *Genetic programming theory and practice XVII* (pp. 307–344). Springer Nature Switzerland.
- Stadler, T., Pybus, O. G., & Stumpf, M. (2021). Phylodynamics for cell biologists. *Science*, 371(6526), eaah6266.
- Stratton, M. R. (2011). Exploring the genomes of cancer cells: Progress and promise. *Science*, 331(6024), 1553–1558.
- Strydom, N. A., & Landrum, A. R. (2022). Charting cognition: Mapping public understanding of COVID-19. *Public Understanding of Science*, 31(5), 534–552.
- Taberlet, P., Coissac, E., Pompanon, F., Brochmann, C., & Willerslev, E. (2012). Towards next-generation biodiversity assessment using DNA metabarcoding. *Molecular Ecology*, 21(8), 2045–2050.
- Tang, C., Davis, K. E., Delmer, C., Yang, D., & Wills, M. A. (2018). Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> promoted speciation in mosquitoes (Diptera, Culicidae). *Communications Biology*, 1, 182.
- Thuiller, W., Lavergne, S., Roquet, C., Boulangeat, I., Lafourcade, B., & Araujo, M. B. (2011). Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature*, 470(7335), 531–534.
- Waldvogel, A. M., Feldmeyer, B., Rolshausen, G., Exposito-Alonso, M., Rellstab, C., Kofler, R., Mock, T., Schmid, K., Schmitt, I., Bataillon, T., Savolainen, O., Bergland, A., Flatt, T., Guillaume, F., & Pfenninger, M. (2020). Evolutionary genomics can improve prediction of species' responses to climate change. *Evolution Letters*, 4(1), 4–18.
- Willingham, D. T. (2009). Why don't students like school?: A cognitive scientist answers questions about how the mind works and what it means for the classroom. Jossey-Bass.



## Capítulo 6

# Educación sobre evolución y divulgación: cosas importantes que debe saber sobre cómo enseñar evolución biológica



# Educación sobre evolución y divulgación: cosas importantes que debe saber sobre cómo enseñar evolución biológica

**Ross H. Nehm<sup>1</sup>,**  
**Kostas Kampourakis<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Department of Ecology and Evolution, Stony Brook University, USA

<sup>2</sup>Section of Biology and IUFE, University of Geneva, Switzerland

## Resumen:

Aunque la evolución es ampliamente reconocida como una de las teorías científicas más valiosas, también es uno de los temas más difíciles de comunicar y enseñar de manera efectiva. Este capítulo proporciona una breve descripción sobre algunos de los temas más relevantes para la enseñanza y comunicación efectiva de la evolución. Estos temas incluyen visiones del mundo, naturaleza de la ciencia, el lenguaje de la evolución, sesgos cognitivos y conceptos erróneos, razonamiento sobre fenómenos evolutivos, casos y planes de estudio, prácticas pedagógicas, y evaluación y aprendizaje. Dado que la amplitud del trabajo previo es extensa, se invita a los lectores a utilizar este capítulo como punto de entrada a la rica literatura sobre educación evolutiva.

### **PALABRAS CLAVE**

*evolución, enseñanza, concepciones alternativas, curriculum, pedagogía*

## INTRODUCCIÓN

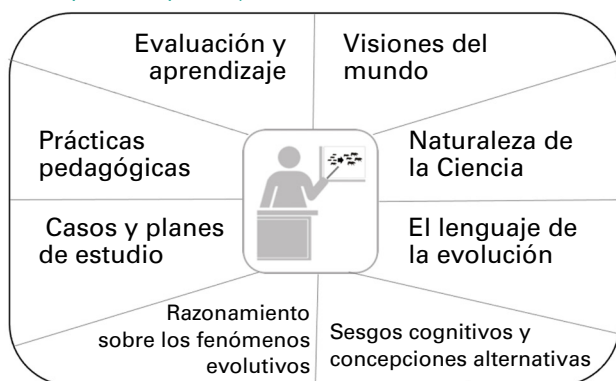
Aunque la evolución es ampliamente reconocida como una de las teorías científicas más valiosas (Mayr, 1994; U.S. National Research Council, 2012), también es uno de los temas más desafiantes para comunicar y enseñar de manera efectiva. Cientos de estudios han documentado una variedad de factores socioculturales, lingüísticos, cognitivos y epistémicos que impactan la comprensión y aceptación de la evolución (Figura 1).

Pocos estudios han integrado este amplio cuerpo de trabajo o lo han aprovechado para diseñar intervenciones que ayuden a estudiantes y ciudadanos/as a superar estos obstáculos y desarrollar una comprensión evolutiva profunda. Por lo tanto, si se abordan los factores antes mencionados tanto como sea posible, es probable que mejoren los resultados. Si bien, aún queda mucho por conocer y lograr en educación sobre evolución, una conclusión inequívoca de investigaciones anteriores es que una sólida comprensión de la forma de pensamiento y razonamiento del ser humano sobre la ciencia de la evolución - no sólo de su conocimiento evolutivo-, resulta esencial.

Este capítulo proporciona una breve introducción de algunos de los desafíos y soluciones centrales para enseñar y comunicar ideas evolutivas.

**Figura 1**

Factores principales que afectan la educación y la divulgación efectiva sobre la evolución (nota: esta figura está organizada como un reloj, con visiones del mundo como punto de partida).



## VISIONES DEL MUNDO

A nivel mundial, la religión está inextricablemente entrelazada con la cultura, la identidad, la familia y la epistemología personal. Por lo tanto, la religión debe tenerse en cuenta al enseñar o comunicar sobre evolución. Esta consideración no necesariamente tiene que implicar conflicto.

Aunque es fácil percibir controversia cuando se trata de evolución y religión, estamos de acuerdo con la sugerencia de Reiss (2019) de que hay una manera más fructífera de abordar esta relación: pensar en ella como un tema sensible y no controvertido. A pesar de la falta de controversia entre la comunidad científica sobre los hechos de la evolución, muchas personas se sienten incómodas al abordar este tema porque perciben que desafía sus visiones del mundo, y algunos incluso piensan en la evolución como una idea nihilista que priva a la vida humana de un significado más profundo.

Por tanto, la evolución debe abordarse como un tema delicado. Este enfoque requiere visiones sobre el mundo de los estudiantes y una discusión cuidadosa sobre cómo la evolución no es inherentemente atea o irreligiosa *per se*. Hay numerosos ejemplos de personas que han logrado adaptarse tanto a la religión como a la evolución.

En particular, estudios realizados en EE. UU. y otros lugares han encontrado que aproximadamente la mitad de la comunidad científica adopta alguna forma de afiliación religiosa (Ecklund et al., 2019). Una forma eficaz de abordar las visiones del mundo es evitar narrativas conflictivas y comenzar presentando la evidencia que acabamos de citar sobre los/as científicos/as y sus afiliaciones religiosas. Una vez que los estudiantes se dan cuenta de que no tienen por qué sentirse amenazados por la evolución, será más probable que consideren la ciencia misma sin preocuparse por sus implicaciones. Esto se debería hacer para respetar las creencias de los estudiantes y abstenerse de distraerlos de los conceptos científicos mismos. Para algunos, la teoría de la evolución tiene implicaciones o visiones del mundo. Sin embargo, esto depende de las inferencias que uno extraiga de la teoría, no de la teoría en sí. Por lo tanto, sugerimos que

## NATURALEZA Y PRÁCTICA DE LA CIENCIA

tales implicaciones se dejen fuera de cualquier discusión hasta que se presente el contenido científico.

Una analogía con la moralidad puede ser útil para introducir los límites de la ciencia. Considérese la interrupción del embarazo por razones médicas o de otro tipo. La ciencia puede decirnos qué sucede en el cigoto fertilizado, con el embrión implantado y cuándo comienza el desarrollo del sistema nervioso. Pero si un embrión debe ser considerado un ser humano o no, y si tiene derechos, no es una decisión que pueda tomarse únicamente sobre bases científicas. La ciencia genera datos sobre los fenómenos que ocurren en cada una de estas etapas de desarrollo. Cuál de estas consideramos una entidad viva portadora de derechos es una decisión que puede basarse en esos hechos, pero no puede tomarse basándose únicamente en ellos. Otras consideraciones filosóficas también son importantes.

Aunque la ciencia puede enriquecer las decisiones morales de diversas maneras, la ciencia no puede guiarlas porque las decisiones sobre lo que es malo o erróneo se hacen sobre una base subjetiva cultural/socialmente compartida. En general, involucrarse con las visiones del mundo es un primer paso esencial en la educación y la divulgación sobre la evolución porque puede servir como un enfoque eficaz para reducir los conflictos y aclarar malentendidos comunes (por ejemplo, los/as biólogos/as evolucionistas no pueden ser religiosos/as o la ciencia responde a todas las preguntas).

En los debates públicos sobre la evolución, si uno analiza de cerca los argumentos de los antievolucionistas, resulta evidente que gran parte del debate no gira en torno a la evolución *per se* sino sobre la naturaleza de la ciencia misma: cómo funciona la ciencia, qué tipo de preguntas puede responder y cómo esas respuestas son desarrolladas. Por ejemplo, un argumento común contra la evolución es que es “sólo una teoría” (Miller, 2008).

Esto refleja una confusión común sobre el significado de la palabra “teoría” en la vida cotidiana y en la ciencia. En el lenguaje cotidiano, la palabra “teoría” se refiere a una corazonada o especulación, mientras que en ciencia se refiere al conjunto más sólido de principios y modelos que los/las científicos/as pueden utilizar para llegar a explicaciones y predicciones. Por tanto, en tales casos, los antievolucionistas deben comprender la estructura y naturaleza de las teorías científicas en general. Sólo una vez que lo hagan podrán darse cuenta de las muchas virtudes de la teoría de la evolución (Kampourakis, 2020a).

Otro ejemplo se relaciona con los procesos de razonamiento de los/las científicos/as. El creacionista Ken Ham argumentó en un debate con Bill Nye, “el científico”, que la batalla entre evolución y creación gira en torno a interpretaciones de la misma evidencia. Sin embargo, esto no es exacto. En algunos casos, los evolucionistas y creacionistas miran los mismos datos y los interpretan de manera diferente. Sin embargo, sus métodos para hacerlo son sorprendentemente diferentes.

Los/las creacionistas abordan los datos con conclusiones predeterminadas (por ejemplo, cualquier cosa que los documentos religiosos sugieran es cierta) y buscan evidencia que respalde estas conclusiones. Cuando los datos no se ajustan a sus conclusiones, encuentran formas de adaptarlos o descartarlos por completo. Esto no es lo que hacen los/as científicos/as. Los/as científicos/as no tienen conclusiones predeterminadas. Aunque pueden tener hipótesis que comprobar, y deberían estar abiertos a rechazarlas o modificarlas si no están respaldadas por los datos disponibles, los/as científicos/as

llegan a conclusiones basadas en las pruebas que tienen a su alcance. En resumen, para los/las científicos/as, es la conclusión la que debe encajar con las pruebas, no las pruebas las que deben encajar con la conclusión (como es el caso de los creacionistas). Los/las científicos/as están dispuestos a descartar teorías arraigadas desde hace mucho tiempo si su creciente comprensión de la naturaleza llega a un punto que estas teorías ya no se pueden sostener.

Otro aspecto de la naturaleza de la ciencia se relaciona con las prácticas explicativas de los/las científicos/as. Su interés se centra en explicar los fenómenos del mundo natural, que es el ámbito de la ciencia. Cada vez que fallan, los antievolucionistas a menudo recurren a argumentos cuasi científicos que involucran a Dios, un patrón de razonamiento que ha sido descrito como “Dios en los vacíos”. Sin embargo, los objetivos explicativos de los/as científicos/as difieren de manera importante.

Los/las científicos/as intentan explicar únicamente la naturaleza, que incluye las entidades y fenómenos del mundo natural, pero no los del exterior (es decir, lo sobrenatural). En particular, la ciencia es un método de estudio de la naturaleza (conocido como naturalismo metodológico). Si bien esta perspectiva no niega la existencia de lo sobrenatural, reconoce que no puede ser estudiado. Como consecuencia, no hay razón para estudiarlo usando la ciencia. La ciencia se ocupa de la metafísica de la naturaleza (es decir, de las causas de los fenómenos naturales).

Esto contrasta con la visión descrita como naturalismo metafísico, que también se conoce como naturalismo filosófico u ontológico. Estas perspectivas sugieren que sólo existen entidades naturales, negando así la existencia de algo sobrenatural. Este es el tipo de argumento que a menudo confunde (y frustra) a los antievolucionistas; sin embargo, no es un argumento que la mayoría de los/las científicos/as esgrima. La perspectiva de que sólo existen entidades naturales es una visión que caracteriza al científicismo, no a la ciencia.

El científicismo sostiene que el alcance

explicativo de la ciencia no se limita al ámbito del mundo natural y que la ciencia es la única forma de conocimiento en general (ver también Kampourakis, 2020a, capítulo 7).

En resumen, abordar la naturaleza de la ciencia es un primer paso esencial en la educación y divulgación sobre evolución.

## EL LENGUAJE DE LA EVOLUCIÓN

El lenguaje es el medio principal a través del cual se han comunicado y transmitido las ideas científicas a lo largo de la historia (Rector et al., 2013). Como otros campos científicos, la biología evolutiva tiene un lenguaje propio. Aunque algunos términos son únicos (p. ej., autapomorfia), muchos otros no lo son y tienen significados científicos que difieren de los significados cotidianos (p. ej., aptitud, adaptación, mutación, teoría).

Por ejemplo, aunque la Biología considera que las mutaciones son cambios genéticos que ocurren aleatoriamente y que pueden ser neutrales, beneficiosos o perjudiciales para un organismo, en el uso común, el término mutación a menudo se visualiza como una monstruosidad visible y dañina a nivel fenotípico. Además, el “fitness”, o eficacia ecológica, se asocia a menudo con la salud física y la fuerza, a diferencia del número de descendientes que sobreviven y se reproducen en la siguiente generación.

Explorar los múltiples significados de términos como estos hace que la comunicación efectiva sea un reto, particularmente cuando se usan varios términos juntos en la enseñanza o en la conversación. La situación se vuelve mucho más desafiante cuando los maestros y los científicos alternan entre significados “cotidianos” y científicos (Betz et al., 2019). Suponiendo que

“el alumnado sabe lo que quiero decir”, es un error común que cometen los/las profesores/as. En pocas palabras, el lenguaje debe utilizarse con cuidado y abordarse explícitamente en la educación y la divulgación sobre la evolución.

Se pueden utilizar dos enfoques generales para abordar este desafío. En primer lugar, se puede presentar a los estudiantes ideas y conceptos evolutivos utilizando un lenguaje no técnico que no se superponga con términos técnicos. Esto minimiza la interferencia con conocimientos y definiciones previas. Sólo después de lograr la comprensión del concepto se le atribuye el término científico.

Por ejemplo, en lugar de introducir la “selección natural”, los docentes pueden explorar muchos aspectos de la clasificación de objetos y los patrones que resultan de ella (por ejemplo, clasificar objetos con y sin venda en los ojos, clasificar según una característica, pero encontrar que otra característica va a cuestras con ella). Por lo tanto, la comprensión que uno tenga de los diferentes procesos y patrones de clasificación puede vincularse posteriormente a términos y conceptos evolutivos (por ejemplo, selección natural, deriva genética).

Un segundo enfoque establece los desafíos lingüísticos previos a cualquier instrucción o comunicación. En este enfoque, los estudiantes son informados explícitamente sobre los significados duales de los términos evolutivos y cómo difieren en contextos cotidianos y científicos (Tabla 1).

Evaluar la comprensión del dominio del idioma es crucial en cualquier enfoque. Las “alertas” de ambigüedad también deben realizarse repetidamente durante la comunicación. En este sentido, los educadores evolucionistas tienen mucho que aprender del profesorado de lenguas extranjeras.

**Tabla 1 ▼**

Términos comunes y problemáticos que deben abordarse explícitamente antes y durante la educación y la divulgación sobre la evolución.

Palabra	Significados cotidianos que deben distinguirse de los significados científicos.
<b>Mutación</b>	Deformidad o monstruosidad visible y dañina a nivel fenotípico. Hay que contrastarlas con variantes invisibles que pueden resultar dañinas, neutras o beneficiosas en función de diversos factores.
<b>Fitness o Eficacia ecológica</b>	Condición física, fuerza y salud fenotípica exterior. Debe contrastarse con el resultado reproductivo (es decir, el número de individuos o la contribución genética a la siguiente generación).
<b>Adaptar/ adaptación</b>	Aclimatación o ajuste gradual de un individuo a una circunstancia y el punto final de un período de ajuste. Debe contrastarse con los cambios a nivel poblacional en la distribución de la variación causada por la selección natural. También es útil aquí enfatizar lo que el medio ambiente puede y no puede causar.
<b>Selección</b>	Un “selector” consciente que hace una elección intencional entre entidades. Debe contrastarse con la selección no intencional debido a la supervivencia y/o reproducción diferencial (por ejemplo, por condiciones abióticas).
<b>Selección Natural</b>	Múltiples ideas (por ejemplo, “adaptación al cambio ambiental”, “supervivencia de los más aptos”) que no se ajustan a la teoría científica tripartita (es decir, variación + herencia + supervivencia/reproducción diferencial).
<b>Presión ambiental</b>	La “fuerza” que causa el cambio evolutivo, incluidas las diferencias fenotípicas y genéticas. Debe contrastarse con lo que el ambiente puede y no puede causar (por ejemplo, el ambiente normalmente no puede causar mutaciones hereditarias o nuevos fenotipos).
<b>Teorías evolutivas</b>	Las conjeturas y especulaciones intrínsecas a un campo que no puede establecer ningún “hecho” o saber “lo que realmente sucedió” (ver también la sección “Naturaleza y práctica de la ciencia” más arriba). Debe contrastarse con explicaciones sólidas, contrastadas y basadas en pruebas que han resistido un intenso escrutinio.

Los medios de comunicación y la cultura popular exacerbaban esta difícil situación. Por ejemplo, los personajes de dibujos animados y los superhéroes “evolucionan” y “mutan”, mientras que los virus “se adaptan para tratar de evadir los sistemas inmunológicos”, lo que representa un discurso cotidiano que va en contra de la comprensión científica. La persona promedio es bombardeada con un lenguaje evolutivo que no concuerda con los significados científicos ni con la comprensión científica.

Hay al menos dos elementos clave que uno debe tener en cuenta al considerar las representaciones de la evolución en la cultura popular. El primer elemento es que la evolución es un proceso de cambio que ocurre a nivel poblacional y no a nivel individual. Los individuos no pueden desarrollar nuevas características; en cambio, las poblaciones evolucionan debido a la variación en las características de sus individuos y la supervivencia y/o reproducción diferencial a través de procesos naturales.

El segundo elemento es que este proceso de supervivencia y/o reproducción diferencial es un proceso inconsciente e involuntario que puede conducir a la adaptación, pero también a la extinción. Es necesario comprender estos dos elementos claves para evitar algunos malentendidos comunes que a menudo surgen, algunos de los cuales se revisan a continuación.

## SESGOS COGNITIVOS Y CONCEPCIONES ALTERNATIVAS

La evolución no es simple ni fácil de entender, y las afirmaciones en sentido contrario no se basan en pruebas. Es necesario comprender muchos conceptos biológicos fundamentales diferentes para poder comprender la evolución. La evolución también es contraintuitiva, ya que va en contra de nuestras intuiciones cotidianas sobre el mundo

natural. Por lo tanto, involucrarse con la intuición es un componente necesario para una educación y divulgación efectiva sobre la evolución.

Considérese el siguiente ejemplo: al preguntar a cualquier persona la simple pregunta “¿Por qué los pájaros tienen alas?” La respuesta intuitiva que la mayoría daría es “Volar”.

Esta es una respuesta racional y razonable porque muchas aves comunes, como las palomas, los halcones y los cuervos, utilizan sus alas para volar. Sin embargo, si uno piensa más detenidamente en esto, vienen a la mente ejemplos de aves que no usan sus alas para volar (por ejemplo, pingüinos nadadores y avestruces corriendo). Por lo tanto, la respuesta intuitiva, “Volar” a la pregunta “¿Por qué los pájaros tienen alas?” no funciona para todas las aves.

Consideremos ahora los aviones. Cuando se les preguntaba: “¿Por qué los aviones tienen alas?”; todos respondían: “Para volar”. ¿Qué es diferente en este caso? Dado que los aviones son artefactos diseñados por humanos con el único propósito de volar, sus piezas sirven exactamente para este propósito. Por supuesto, existen otros aviones que pueden volar sin alas, como los helicópteros. Sin embargo, en el caso de los aviones, no hay excepción.

Todos los aviones tienen alas para volar porque para eso fueron diseñadas. No es el caso de las aves, que no han sido diseñadas, sino que son producto de procesos evolutivos naturales. Esta es una distinción que no es inmediatamente evidente para muchos. Dado que estamos rodeados de artefactos en nuestras experiencias de la vida cotidiana desde una edad muy temprana, podríamos acostumbrarnos a la creación intencional para funciones necesarias y a la existencia de partes que cumplen funciones particulares. La aplicación del “pensamiento de artefactos” a los organismos podría ser el resultado de este escenario.

Por lo tanto, la educación sobre la evolución y la divulgación requieren atención a las distinciones entre artefactos y organismos. Los artefactos tienen “esencias fijas” (*fixed essences*, en inglés)

que se relacionan con el propósito que pretenden cumplir, mientras que los organismos pueden tener “esencias del desarrollo” (*developmental essences*, en inglés) que dan lugar a resultados relativamente consistentes (p. ej., el fenotipo adulto de cada especie); sin embargo, siempre hay variación que sirve como materia prima para la evolución. Todas las partes de los artefactos cumplen una función específica. Por el contrario, este no es el caso de todas las partes de los organismos. Además, aquellas partes de los organismos que cumplen una función son el resultado de la evolución mediante procesos naturales (no por diseño).

Pensar en las partes de los organismos como si fueran partes de artefactos es el resultado de intuiciones o sesgos cognitivos particulares, formas espontáneas de pensar que, a su vez, constituyen obstáculos para una comprensión científica de los fenómenos. Dos sesgos muy importantes son la teleología del diseño y el esencialismo psicológico. Estos pueden ser interpretados como resultado de nuestra comprensión de artefactos, que tienen esencias fijas (esencialismo) porque están diseñados para servir a un propósito (teleología del diseño).

Estas intuiciones pueden llevar a pensar en las características de los organismos de la misma manera (sus partes inmutables están diseñadas para un propósito).

Estos sesgos cognitivos hacen que la idea de evolución sea contraintuitiva. La Tabla 2 resume los sesgos cognitivos que son relevantes para enseñar y comunicar ideas evolutivas.

**Tabla 2** ▼

Sesgos cognitivos a considerar al enseñar y comunicar sobre la evolución.

Sesgo cognitivo	Descripción y relevancia para la evolución
<b>Razonamiento basado en diseño</b>	Un agente externo (por ejemplo, Dios, la naturaleza) guía la evolución de los organismos individuales hacia un fin particular para que cambien para poder sobrevivir. Esta idea es errónea porque supone que un agente externo a los propios organismos los ha diseñado a ellos o a su futuro.
<b>Intencionalidad</b>	Los organismos individuales sufren modificaciones porque tienen intenciones particulares que deben cumplirse. Esta es una idea errónea porque la voluntad de los organismos o sus deseos (si los tienen) no pueden influir en el curso de su evolución. Sin embargo, esto no significa que las intenciones de los organismos sean irrelevantes. Los organismos tienen intenciones (comer, pareja, etc.) que se expresan en su comportamiento, lo que podría afectar el curso de su evolución, pero no un fin evolutivo específico y deseado.
<b>Esencialismo</b>	Los organismos individuales han fijado esencias de especies y no pueden sufrir modificaciones significativas, lo que hace imposible la evolución. El problema aquí es que la solidez del desarrollo (por ejemplo, un embrión de cerdo se convertirá en un cerdo y no un perro) hace que la gente piense que hay propiedades esenciales de las especies que, debido a la propia esencia de la especie, no pueden cambiar. Sin embargo, incluso pequeños cambios en el desarrollo pueden provocar grandes cambios en las formas adultas, lo que puede dar lugar a la evolución.
<b>Razonamiento basado en la necesidad</b>	Los organismos individuales sufren modificaciones inconscientemente para satisfacer sus necesidades en un entorno particular y así sobrevivir. Esta idea es errónea porque cualquier rasgo favorable surge por casualidad y no porque los organismos lo necesiten. Por eso la mayoría de las especies que han vivido en la Tierra se han extinguido.

Los conceptos erróneos sobre la evolución también son importantes (ver Gregory, 2009 para una revisión). Si bien estos pueden deberse a los sesgos cognitivos antes mencionados, también pueden deberse a malentendidos. En general, todo el conocimiento que tenemos toma la forma de conceptos, que son representaciones mentales del mundo. Los conceptos científicos, como los relacionados con la evolución, son representaciones sistemáticas de entidades y fenómenos que los/las científicos/as utilizan en sus explicaciones y predicciones. Para cualquier concepto, es natural que las personas formen concepciones diferentes.

Por ejemplo, aunque existe un concepto de perro, la concepción de perro que tenemos cada uno de nosotros puede ser diferente. Cuando se trata de ciencia, es natural formarnos concepciones de fenómenos y entidades antes de que nos enseñen sobre ellos, ya que los encontramos en la vida cotidiana (considérese una “planta”, un “animal”, un “microbio”, etc.).

Esto se conoce como ideas preconcebidas, ideas/concepciones previas, o preconcepciones. Cuando son inexactos, se describen como concepciones alternativas. En última instancia, la enseñanza tiene como objetivo abordar estos conceptos erróneos y desestabilizarlos para que los estudiantes los reestructuren y adopten concepciones científicamente legítimas (Kampourakis y Nehm, 2018).

Un requisito para esto es que los estudiantes se encuentren en situaciones de “conflicto conceptual”, en las que sus concepciones se contrasten con los conceptos científicos y se les enseñe de una manera que les ayude a darse cuenta de que estos últimos son más precisos que los primeros. La Tabla 3 resume algunas concepciones alternativas comunes que deben abordarse explícitamente al participar en la educación y la divulgación sobre la evolución. Los enfoques pedagógicos para abordar estas concepciones alternativas se analizan en la sección sobre pedagogía.

**Tabla 3 ▼**

Concepciones alternativas comúnmente sostenidas por los estudiantes y el público en general. A menudo se combinan entre sí o con ideas normativas para producir ideas “mixtas” (normativas + no normativas).

Concepción alternativa	Breve descripción de la concepción alternativa
<b>El uso o desuso de rasgos es un factor causal central para el cambio evolutivo.</b>	La falta de utilidad de un rasgo es una causa directa de la disminución o pérdida de un rasgo a lo largo de generaciones o, por el contrario, la utilidad de un rasgo es la causa directa de un aumento o adición de un rasgo. La idea de uso/desuso suele estar vinculada a la herencia de características adquiridas (ver más abajo).
<b>Los rasgos adquiridos durante la vida se heredan y transmiten a la próxima generación.</b>	Los estados de carácter de los rasgos de individuos, poblaciones o especies adquiridos durante su vida se heredan y transmiten comúnmente a la siguiente generación. Esta concepción alternativa interfiere con el concepto científico de adaptación.
<b>Las presiones ambientales son una causa directa de diferencia, cambio y/o evolución.</b>	Presiones ambientales (es decir, cambios en la intensidad o el tipo de condición ambiental) ‘fuerzan’ o directamente causan que las unidades vivas (es decir, individuos, poblaciones y especies) cambien su genética y/o fenotipos. Esta idea es a menudo producto de que los/las científicos/as utilizan un lenguaje de “atajos” que implica presiones que causan cambios. Esta idea también está ligada a una teleología inapropiada.
<b>Aclimatación o ajuste simultáneo de todas las unidades bióticas al cambio.</b>	El ajuste gradual de las unidades (es decir, individuos, poblaciones y especies) al medio ambiente es un patrón que se explica por procesos incorrectos de uso/desuso de rasgos, herencia adquirida y/o presiones ambientales (más que por la clasificación diferencial de variantes hereditarias).

## RAZONAMIENTO SOBRE LOS FENÓMENOS EVOLUTIVOS

Los objetivos centrales de la biología evolutiva incluyen documentar patrones de evolución y elaborar explicaciones para ellos. Documentar los patrones evolutivos es un trabajo complejo y minucioso que puede llevar décadas. La mayoría de los estudiantes y ciudadanos/as se involucran con la evolución a través de la exploración de los siguientes fenómenos, previamente documentados: patrones de cambio dentro un taxón (p. ej., SARS-CoV-2 durante un año), patrones de cambio en un linaje más amplio (p. ej., dinosaurios no aviares y aves modernas durante millones de años) o patrones de cambio en rasgos fenotípicos en muchos linajes (por ejemplo, monogamia entre clados de mamíferos). Las discusiones a menudo se centran en la causa de estos patrones (por ejemplo, ¿por qué comenzaron a aparecer las nuevas variantes del SARS-CoV-2 documentadas por los/las biólogos/as?).

Por lo tanto, nuestra discusión sobre educación y divulgación se centra en pensar acerca de fenómenos evolutivos previamente documentados (por ejemplo, patrones), más que en los enfoques científicos utilizados para generar dicho conocimiento. Los sesgos cognitivos y las concepciones alternativas (ver arriba) no son los únicos factores que afectan el razonamiento sobre los fenómenos evolutivos.

Aunque la notable diversidad de los fenómenos evolutivos es lo que le da a la evolución su atractivo generalizado, estudios recientes han demostrado que tal diversidad es un “arma de doble filo” cuando se trata de promover la comprensión evolutiva (Nehm y Ha, 2011). Si bien entran en juego muchos elementos cuando se piensa en la evolución (por ejemplo, grado de conocimiento, sesgos cognitivos, concepciones alternativas, competencias representacionales), la clase de ideas que se utilizan para dar sentido a las situaciones no se evocan al azar; más bien, dependen en gran medida de las características de los casos en cuestión (Figura 2).

Los estudiantes tienden a centrar su atención en las características únicas y observables de tales casos y, como resultado, el conocimiento de la recuperación de la memoria está impulsada por estas características más que por principios causales fundamentales (a menudo no observables) (p. ej., variación hereditaria extensa

producida mediante mutación, éxito reproductivo diferencial). En otras palabras, las características únicas de cada ejemplo tienden a eclipsar el pensamiento sobre los procesos causales generales en los sistemas vivos.

El resultado es que se construyen explicaciones separadas y únicas para cada tipo de ejemplo o fenómeno evolutivo (Figura 2). Para los principiantes, las consecuencias funcionales y ecológicas de la coloración de la polilla moteada parecen tener poco en común con la susceptibilidad bacteriana a los medicamentos fabricados para matarlas. Sin embargo, ambos casos se explican en parte por la supervivencia diferencial de variantes fenotípicas hereditarias producidas por procesos genéticos aleatorios. En particular, comprender los fenómenos evolutivos requiere la integración de elementos causales y concretos.

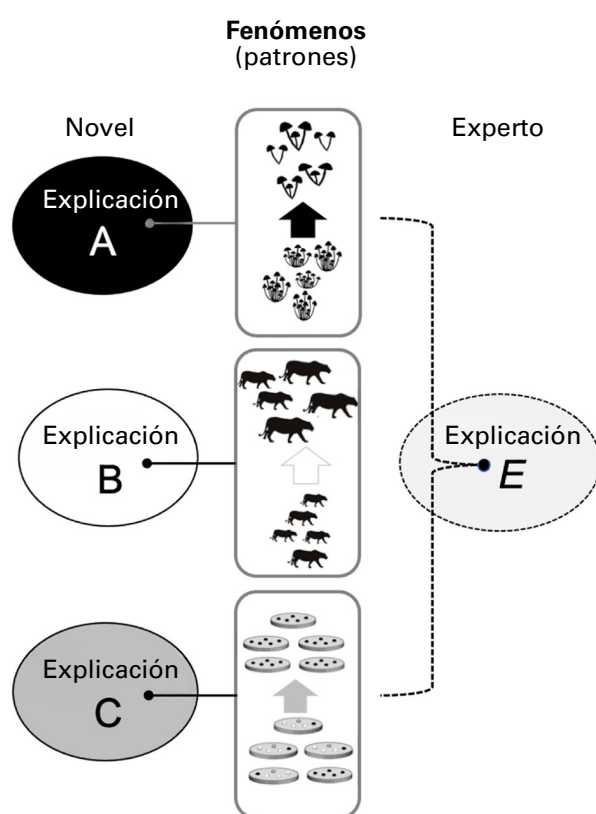
Un enfoque para abordar este desafío es ayudar a los estudiantes a equilibrar la especificidad, la generalidad y la causalidad al pensar en los fenómenos o patrones evolutivos. El primer paso en este enfoque (conocido como ‘comparación entre casos’) implica la creación de pares de fenómenos o patrones evolutivos que difieren en sus características concretas (por ejemplo, la persistencia de la lactasa en humanos frente a la pérdida de colmillos en elefantes; el grosor del pico de los pinzones de Darwin *versus* la pérdida de espinas en las plantas de arándano).

En lugar de enseñar casos secuencialmente o hacer que los estudiantes elaboren explicaciones para un solo caso, los estudiantes deben trabajar en colaboración para identificar simultáneamente las similitudes y diferencias biológicas y causales más destacadas entre dos casos (Nehm, 2018).

En general, al alumnado le resulta más fácil encontrar diferencias que similitudes; por lo tanto, este paso debería ser lo primero. Muchos estudiantes sólo “verán” aspectos superficiales de los casos (“uno es una planta y el otro es un animal”; “uno vive en el lugar X y el otro en el lugar Y”) que a menudo tienen poco que ver con la causalidad y, por tanto, con la explicación. A menudo es necesario presionar a los estudiantes para que consideren las diferencias a un nivel más profundo.

**Figura 2**

Razonamiento novel vs experto sobre fenómenos evolutivos.



Muchas características superficiales o concretas de los problemas evolutivos (p. ej., espinas de plantas, color del pelaje de los animales, persistencia de la lactasa, resistencia a los antibióticos) activan diferentes conjuntos de concepciones previas y concepciones alternativas durante la resolución de problemas de los principiantes (Nehm, 2010; Nehm et al., 2012). Un estudiante puede utilizar conceptos erróneos (por ejemplo, las presiones evolutivas causan mutaciones en respuesta a las necesidades de la especie) en una situación, e ideas normativas en otra (por ejemplo, la variación existente en una población se clasificó y solo algunos individuos

sobrevivieron). La sensibilidad a las características de los problemas evolutivos se asocia con la activación de conocimientos idiosincrásicos y la generación de múltiples soluciones frente a lo que los especialistas interpretarían como un mismo problema (Nehm y Ridgway, 2011).

Un siguiente paso importante es pedir a los estudiantes que consideren si las características de los fenómenos o patrones que han identificado se relacionan con causas biológicas (por ejemplo, “¿Cuáles de las diferencias que han identificado son de naturaleza causal?”). Esta no es sólo una oportunidad para discutir la naturaleza de la ciencia en general, sino también para enfatizar que la causalidad es una característica esencial de la explicación. Este es el punto donde los estudiantes deberían comenzar a darse cuenta de que hay pocas causas biológicas únicas para un solo fenómeno o patrón. A partir de ahí, pueden hacerse resúmenes de las diferencias (tanto superficiales como profundas, causales y no causales) identificadas por los estudiantes (ya sea en grupos o individualmente) y reunirse en una hoja de trabajo, en la pizarra de grupo o de aula, y discutir las conjuntamente entre toda la clase.

Una vez que se han identificado y discutido las diferencias entre los casos, es hora de comenzar a explorar las similitudes entre los fenómenos o patrones evolutivos. Estas similitudes pueden abarcar características básicas (por ejemplo, “Tienen células y usan oxígeno para metabolizar los alimentos”) o más avanzadas (por ejemplo, “En ambos casos ocurren constantemente mutaciones hereditarias que pueden causar diferencias en las proteínas que forman parte de sus fenotipos”). Las preguntas orientadoras también pueden apoyar el pensamiento; por ejemplo, “¿Las diferencias genéticas entre individuos se relacionan con diferencias fenotípicas en ambos casos?”; “¿Ambos casos se caracterizan por recursos y hábitats infinitos?”

Las similitudes entre fenómenos o patrones evolutivos deben resumirse de manera paralela a las diferencias identificadas en la primera parte del ejercicio.

Una vez identificadas y discutidas las similitudes y diferencias entre casos, comienza el trabajo más desafiante de conectar proceso y patrón (por ejemplo, los procesos que causan patrones de falta de colmillos en los elefantes, o procesos que causan la persistencia de la lactasa en humanos).

Este paso requerirá herramientas de andamiaje, como listas de posibles ideas (normativas y no normativas) que los estudiantes puedan discutir y evaluar como potencialmente relevantes para ambas situaciones evolutivas. Por ejemplo, dado que los estudiantes suelen utilizar explicaciones basadas en las necesidades (Tabla 2), podrían evaluar el grado en que las “necesidades” podrían explicar los patrones biológicos en los dos casos. ¿La falta de alimentos en una población humana, así como la necesidad asociada de consumir y digerir leche, afectarían la frecuencia de individuos con persistencia de lactasa? ¿Cómo sucedería esto? ¿Los cazadores furtivos que buscan elefantes de manera diferente según sus fenotipos, así como la necesidad de los elefantes de carecer de colmillos, harían que los elefantes individuales los pierdan? Se podrían evaluar una variedad de causas como contribuyentes a los patrones documentados en cada caso.

El andamiaje también puede promover ideas normativas (por ejemplo, “¿Ocurren mutaciones en humanos y elefantes?”, “¿Contribuyen las mutaciones a las diferencias fenotípicas en humanos y elefantes?”, “¿Cómo funciona eso?”, “¿Las diferencias fenotípicas impactan la supervivencia en seres humanos y elefantes en determinadas condiciones ambientales?”).

Las comparaciones entre casos deben enfatizar la similitud del proceso (por ejemplo, la mutación y la recombinación genética generan grandes cantidades de variación hereditaria; la variación en los genomas se relaciona con la variación de los fenotipos; la variación en los fenotipos afecta la competencia por la pareja y la obtención de recursos) y la disimilitud del patrón (p. ej., distribución de los colmillos de elefante, patrones

de persistencia de la lactasa). La evaluación de posibles contribuyentes causales a diferentes escenarios evolutivos centra la atención en cómo los patrones podrían relacionarse con los procesos.

El método de implicar a los estudiantes en el estudio de múltiples fenómenos evolutivos o patrones y luego ir quitando gradualmente los andamios cognitivos (por ejemplo, resumen tablas con similitudes, diferencias y sus naturalezas causales) constituye una prueba de preparación para el aprendizaje futuro (es decir, “¿Pueden los estudiantes razonar eficazmente sobre nuevos patrones y fenómenos evolutivos?”). El uso de casos contrastantes brinda a los estudiantes la oportunidad de construir modelos abstractos y causales de cambio evolutivo que trascienden casos específicos.

Esto ayuda a abordar las bien documentadas fragmentación y especificidad del contexto propias del razonamiento evolutivo novel (Nehm, 2018). Este enfoque ayudaría a contrarrestar aquel otro, altamente improductivo, presente en las escuelas y programas de divulgación, centrado en presentar interesantes casos únicos (o en algunos casos, secuenciales) en detalle.

Los estudiantes y ciudadanos/as deben estar preparados para dar sentido a futuros fenómenos o patrones evolutivos.

## CASOS Y PLANES DE ESTUDIO

Emplear ejemplos interesantes y relevantes para ilustrar los principios y prácticas de la evolución es una característica importante a considerar al diseñar un plan de estudios de evolución.

Con demasiada frecuencia, los estudiantes aprenden sobre los mismos ejemplos durante su educación secundaria y universitaria (por ejemplo, los pinzones de Darwin y las polillas moteadas). Los tipos de ejemplos evolutivos son una consideración

central porque (i) los estudiantes tienen dificultades para razonar entre ejemplos evolutivos y sobre nuevos fenómenos evolutivos (ver arriba), (ii) los estudiantes a menudo ven la evolución poco importante, poco interesante o inútil (Heddy y Sinatra, 2013) y (iii) la utilidad percibida por los temas evolutivos está fuertemente asociada con la aceptación de la evolución (Borgerding y Kaya, 2022).

Trabajos recientes han explorado qué temas de evolución encuentran interesantes los estudiantes e informaron que la evolución del VIH, la gripe aviar y las bacterias se consideran más interesantes que la evolución de los humanos (p. ej., persistencia de la lactasa, adaptación a gran altitud) y otros animales (p. ej., elefantes, peces, ovejas; Jördens y Hammann 2019). Así pues, alinear el plan de estudios con el interés de los estudiantes podría aumentar su motivación para aprender sobre la evolución.

El plan de estudios también debería considerar las percepciones sobre la utilidad de los fenómenos evolutivos. Borgerding y Kaya (2022) estudiaron el valor de utilidad de los temas de aprendizaje sobre la evolución y descubrieron que los ejemplos de microevolución (por ejemplo, transmisión de enfermedades, variación genética, resistencia a antibióticos y pesticidas) se consideraban como más útiles que los ejemplos macroevolutivos (por ejemplo, la relación de organismos particulares y la coevolución). En particular, maximizar el interés y la utilidad es una característica importante del diseño curricular. Antes de discutir los detalles del currículo de evolución, es valioso dar un paso atrás y considerar cómo se debe concebir el diseño curricular en primer lugar.

Muchos países han estado trabajando para que sus planes de estudio de ciencias dejen de centrarse en grandes cantidades de información fáctica y avancen hacia un aprendizaje más profundo de menos ideas centrales (es decir, “menos es más”).

En Estados Unidos, por ejemplo, las ideas fundamentales que merecen la mayor atención se denominan “ideas disciplinares principales” (o Disciplinary Core Ideas; DCIs, por sus siglas en inglés). Las DCIs son valiosas porque ayudan a dar sentido a una amplia gama de fenómenos naturales.

Sin embargo, una participación eficaz en el mundo natural requiere mucho más que conocimiento.

Los estudiantes y ciudadanos/as deben comprender los enfoques, principios y marcos que utilizan los/las científicos/as (junto con las DCI) para dar sentido a los fenómenos naturales (ver también Naturaleza de la Ciencia más arriba). Estos enfoques de construcción de conocimiento (por ejemplo, hacer observaciones, desarrollar modelos, discutir sobre pruebas y construir explicaciones) se denominan “prácticas científicas”. Las prácticas científicas son enfoques que los/las científicos/as de muchas disciplinas han considerado esenciales para construir conocimiento y dar sentido al mundo natural. Además de las DCI y las prácticas científicas, los/las científicos/as también utilizan ideas generales conocidas como “conceptos transversales” (Cross-Cutting Concepts, o CCCs, por sus siglas en inglés) para estructurar su trabajo. Por ejemplo, estos incluyen enmarcar los fenómenos en términos de su patrón, estructura-función, y causa y efecto.

Este aprendizaje tridimensional (por ejemplo, DCI, prácticas científicas, CCC) proporciona herramientas para ayudar a las personas a dar sentido y explicar los fenómenos. Aunque el plan de estudios de evolución debería abarcar los tres aspectos (Figura 3), a menudo este no es el caso.

Desafortunadamente, hay muchas menos investigaciones que exploran cómo el pensamiento sobre la evolución se cruza con las prácticas científicas y los CCC. Esto plantea las siguientes preguntas: ¿Qué creen los estudiantes que debería incluir una explicación significativa de la evolución? ¿Cómo impactan los sesgos cognitivos y las concepciones alternativas en las prácticas de argumentación (y viceversa)?

¿Pueden los estudiantes identificar las características más destacadas de un patrón evolutivo? En gran medida, el plan de estudios de evolución en muchos países se ha centrado demasiado en los resultados de la ciencia (por ejemplo, selección natural, filogenias, extinción) a expensas de las competencias orientadas a la construcción de conocimiento (por ejemplo, cómo abordar la explicación de un patrón evolutivo, cómo

## PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS

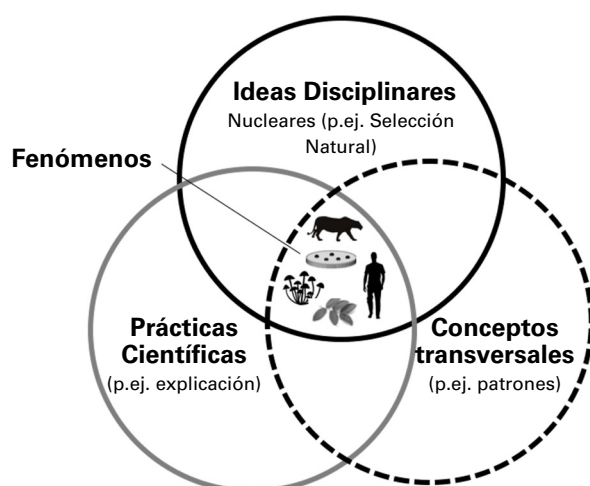
construir una explicación evolutiva sólida, cómo establecer una causa para un patrón evolutivo).

Investigaciones anteriores sugieren que fomentar competencias para la construcción de conocimientos es un desafío. Por ejemplo, sabemos que 1) los estudiantes prefieren las descripciones a las explicaciones causales cuando se enfrentan a fenómenos evolutivos, 2) que les resulta arduo reconocer las características destacadas de los patrones, al construir explicaciones; y 3) que, con demasiada frecuencia, la argumentación carece de la debida articulación basada en pruebas.

Se necesita, por tanto, una síntesis de los hallazgos previos acerca de la enseñanza-aprendizaje de la evolución utilizando una lente tridimensional del aprendizaje, junto con más planes de estudio centrados en la enseñanza de la evolución empleando dicho enfoque.

### Figura 3

DCIs, prácticas científicas y CCCs. El aprendizaje tridimensional, como lo ejemplifican los *Next Generation Science Standards* (NGSS, por sus siglas en inglés) de EE. UU., abarca DCI, prácticas científicas y CCC. Estas tres vertientes de la ciencia se utilizan como un marco integrador para explorar fenómenos en el mundo natural. En otras palabras, estas herramientas permiten a los estudiantes involucrarse en la ciencia, no sólo aprender sobre los resultados de la ciencia.



La participación activa en el proceso de aprendizaje (por ejemplo, aprendizaje colaborativo, aprendizaje activo) es un enfoque pedagógico general que se sabe que es eficaz para muchas disciplinas científicas (Freeman et al., 2014). Curiosamente, los estudios a gran escala han planteado dudas sobre si el aprendizaje activo por sí solo puede promover la comprensión evolutiva (Andrews et al., 2011) y si la atención explícita a las concepciones alternativas, en entornos de aprendizaje activo, es el elemento esencial (Nehm et al., 2022). Ahora bien, además del aprendizaje activo y la atención explícita a las concepciones alternativas, se han propuesto muchos otros enfoques pedagógicos (ver Tabla 4).

Muchos de estos enfoques por sí solos se han mostrado prometedores en estudios a pequeña escala. Sin embargo, las combinaciones que incluyan múltiples estrategias probablemente generarán un mayor impacto. A pesar de la ausencia de directrices sólidas, a gran escala y basadas en pruebas, para informar las prácticas pedagógicas para enseñar evolución, es importante enfatizar que comprender el pensamiento y el razonamiento de los estudiantes sobre la evolución es un requisito previo a cualquier implementación pedagógica.

Muchos estudios han demostrado que los profesores y profesoras son incapaces de identificar las limitaciones en el razonamiento evolutivo de los estudiantes y, a menudo, ellos/as mismos/as albergan concepciones alternativas (p. ej., Hartelt et al., 2022).

Tabla 4 ▼

Enfoques pedagógicos para abordar concepciones alternativas.

Enfoque pedagógico	Descripción de cómo abordar las concepciones erróneas
<b>Instrucción directa</b>	Discusión explícita de concepciones alternativas y por qué son inexactas en contextos evolutivos (p. ej., Nehm et al., 2022).
<b>Conflicto cognitivo</b>	Presentar ejemplos o situaciones que contradicen las expectativas o que no pueden explicarse mediante modelos mentales o concepciones alternativas actuales (p. ej., Kampourakis, 2020b).
<b>Estrategias metacognitivas</b>	Introducir oportunidades metacognitivas para que los estudiantes reflexionen, regulen y apliquen ideas en situaciones científicas y cotidianas (p. ej., González Galli et al., 2020).
<b>Discusiones sobre metaconocimiento</b>	Fomentar el desarrollo de metaconocimiento sobre tipos de explicaciones en biología y evolución (p. ej., funcionales y mecanicistas) (p. ej., Trommler y Hammann, 2020).
<b>Ejemplos históricos</b>	Analizar cómo los científicos y científicas lucharon anteriormente con las mismas concepciones e ilustrar cómo ayudó la ciencia en la resolución de fenómenos confusos (p. ej., pérdida de rasgos) (p. ej., Kampourakis y Nehm, 2018).

## EVALUACIÓN Y APRENDIZAJE

Tener objetivos de aprendizaje claros y evaluarlos es de vital importancia para una enseñanza eficaz, y la enseñanza-aprendizaje de la evolución no es una excepción.

La primera consideración al pensar en la evaluación es identificar lo que el alumnado sabe y ser capaz de hacer con sus conocimientos una vez finalizada la instrucción; en otras palabras, la educación siempre debe comenzar con el fin en mente. Dado que el plan de estudios debe

buscar fomentar el crecimiento en el dominio del lenguaje de la evolución, la naturaleza de la ciencia y el aprendizaje tridimensional (DCI, prácticas científicas y CCC) a través de una variedad de ejemplos de casos evolutivos, ¿qué formas de evaluación se pueden utilizar para medir el aprendizaje y ¿qué errores se deben evitar?

En parte debido a la rica información generada, sobre el pensamiento de los estudiantes y razonamiento, las explicaciones escritas de los patrones evolutivos se han utilizado como enfoque de evaluación durante más de 30 años (p. ej., Bishop y Anderson, 1990; ver Ha y Nehm, 2018 para una revisión). Explicar los patrones de cambio también es una actividad realista y auténtica porque la mayoría de los ciudadanos y ciudadanas se verán implicados/as en patrones de cambio biótico en algún momento.

A medida que evolucionan nuevos virus, se encuentran nuevos organismos, se descubren nuevos fósiles, se nombran nuevos taxones y se documentan nuevos fenómenos evolutivos, la gente intenta dar sentido a estos patrones (es decir, explicarlos). La pandemia de COVID-19 es un ejemplo de ello.

La débil comprensión del público en general (y de los estudiantes, en particular) sobre este fenómeno se refleja en preguntas comunes: ¿Por qué evolucionó un nuevo virus? ¿Por qué siguen apareciendo nuevas variantes del virus? ¿Cuándo dejará de cambiar el virus? Por supuesto, el cambio evolutivo es la norma y nunca deja de ocurrir. Es evidente que conocer los pinzones y las polillas moteadas de Darwin en la escuela secundaria no ha inculcado una comprensión evolutiva abstracta y generalizada que se extienda más allá de estos casos.

Uno de los resultados de la educación y la divulgación sobre la evolución debería ser preparar a la ciudadanía para el aprendizaje futuro. Como tal, es tan importante poder dar sentido a los patrones futuros como a aquellos que nos han enseñado. El instrumento de Evaluación del Razonamiento Contextual sobre la Selección Natural (ACORNS, por sus siglas en inglés)

(Nehm et al., 2012; ver ) fue diseñado para este propósito. Concretamente, el instrumento fue desarrollado para ayudar a profesores/as e investigadores/as a comprender el pensamiento en una variedad de escenarios, incluidos diferentes linajes (p. ej., animales, plantas, hongos), diferentes polaridades de rasgos (p. ej., pérdida *versus* ganancia), diferentes rasgos y familiaridades de taxones (puercoespín *versus* prosimio), diferentes escalas (dentro de las especies *versus* entre especies) y diferentes funciones de rasgos (por ejemplo, coloración *versus* locomoción).

Diferentes tipos de patrones proporcionan a los/las educadores/as información sobre qué tan preparados/as estarán los estudiantes cuando se encuentren con nuevos casos en el futuro. Los resultados de ACORNS a menudo muestran que los estudiantes carecen de un modelo sólido de evolución que generalice todos los fenómenos.

Este es un problema importante si queremos preparar al alumnado para futuros descubrimientos y desafíos sociales. Otros formatos de evaluación (por ejemplo, de opción múltiple) son más efectivos para determinar si los estudiantes han dominado partes particulares de la teoría de la evolución. Las tareas de explicación, en cambio, evalúan el nivel de integración y comprensión del contenido a partir de su aplicación a contextos del mundo real.

Determinar si los estudiantes han aprendido la evolución es un proceso notablemente complejo debido a los factores discutidos anteriormente. Por ejemplo, si los estudiantes carecen de una comprensión sólida de la naturaleza de la ciencia (por ejemplo, qué preguntas la ciencia puede responder mejor y cuáles no), es posible que no entiendan qué pertenece a una clase de ciencias y qué tipos de conocimiento son adecuados a la

**Tabla 5 ▼**

Ejemplos de posibles objetos de evaluación y objetivos de aprendizaje asociados. Se pueden utilizar diferentes formatos de evaluación (por ejemplo, verdadero-falso, opción múltiple, escritura abierta, comunicación oral) para evaluar las competencias.

Objeto de evaluación	Al final del proceso de enseñanza-aprendizaje sobre evolución, los estudiantes deberían ser capaces de...
<b>Naturaleza de la Ciencia</b>	...explicar las limitaciones de la ciencia; refutar concepciones alternativas comunes en torno a la evolución y la religión y la Naturaleza de la Ciencia; ilustrar cómo se usan las prácticas científicas para generar conocimiento basado en pruebas; diferenciar entre el significado cotidiano y el significado científico de muchos términos y vocabulario relacionado con la Naturaleza de la Ciencia.
<b>Lenguaje de la Ciencia</b>	... diferenciar entre el significado cotidiano y el significado científico de diferentes términos evolutivos; emplear adecuadamente la terminología evolutiva en contextos de comunicación científica; identificar lenguaje evolutivo ambiguo en un periódico o fuente online, y reescribir la noticia de forma que refleje adecuadamente los conceptos científicos.
<b>Conocimiento sobre evolución (es decir, ideas nucleares)</b>	...refutar concepciones alternativas comunes relacionadas con conceptos y teorías evolutivas; explicar cómo tanto los procesos aleatorios y no aleatorios intervienen sobre los fenómenos evolutivos; explicar por qué el cambio ambiental no es necesario para la selección natural; explicar el papel de las extinciones masivas en la evolución de la vida en el planeta Tierra.
<b>Prácticas científicas</b>	... construir un modelo causal simple, carente de concepciones alternativas, que explique diferentes fenómenos evolutivos o patrones; construir una argumentación científica escrita que integre las conclusiones, pruebas y justificaciones a partir de las fuentes de datos más relevantes, para la explicación de un determinado patrón evolutivo; desarrollar una explicación científica para un nuevo fenómeno evolutivo.
<b>Conceptos transversales</b>	...utilizar una filogenia previamente desarrollada para documentar patrones de cambio en el estado de los caracteres a lo largo de los linajes; ser capaz de identificar relaciones de causa y efecto dentro de un fenómeno evolutivo.

hora de explicar diferentes eventos evolutivos (por ejemplo, el origen de un nuevo virus o enfermedad). Si los estudiantes están confundidos acerca de los significados duales de los términos evolutivos, les costará entender qué se está preguntando en una tarea de evaluación. Si a los estudiantes se les plantea una pregunta sobre un único escenario evolutivo, será imposible saber si pueden utilizar sus conocimientos para abordar otro. Si a los estudiantes se les proponen tareas de evaluación utilizando diferentes taxones, diferentes tipos de rasgos o diferentes polaridades de cambio antes y después de la instrucción, puede que no sea posible aislar inequívocamente los efectos del contexto de los resultados del aprendizaje.

Por estas razones, es esencial evaluar una variedad de objetivos (Tabla 5) y tener ítems que sean paralelos en forma y dificultad. En otras palabras, todos los temas discutidos en este capítulo deben incluirse en la recopilación de datos para determinar si la comunicación y la educación han sido efectivas.

## CONCLUSIÓN

Este capítulo proporcionó una breve panorámica general de algunos de los temas más importantes y relevantes a la hora de enseñar y comunicar ideas evolutivas de manera efectiva.

Estos temas incluyen: visiones del mundo, naturaleza de la ciencia, lenguaje evolutivo, sesgos cognitivos y concepciones alternativas, razonamiento sobre fenómenos evolutivos, casos y planes de estudio, prácticas pedagógicas y evaluación del aprendizaje. Dado que la amplitud del trabajo anterior es extensa, se anima a los/las lectores/as a utilizar este capítulo como punto de entrada a la literatura.

Se requiere prestar atención a todas estas cuestiones para una educación y divulgación efectivas sobre la evolución.

## REFERENCIAS

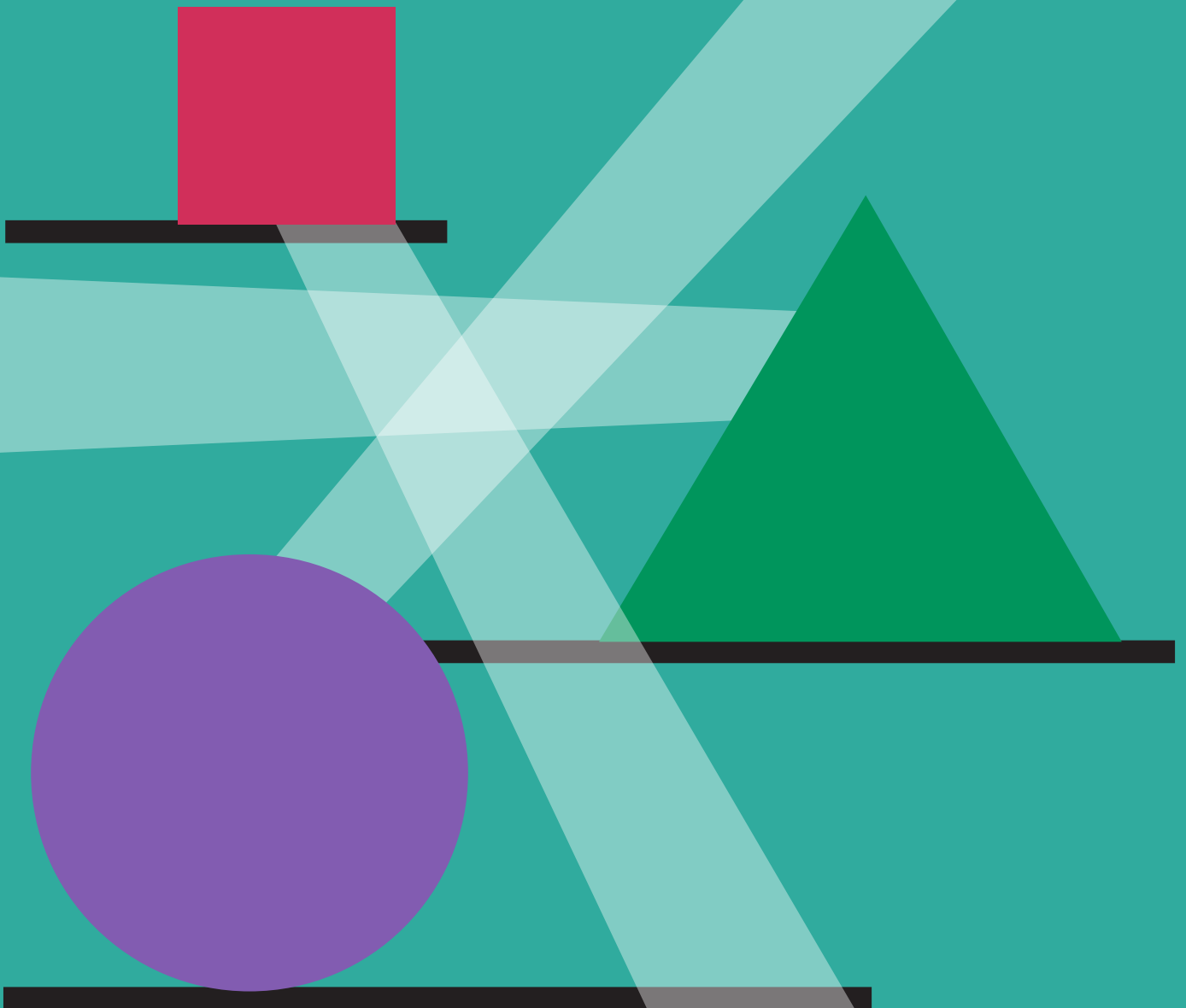
- Andrews, T. M., Leonard, M. J., Cogrove, C. A., & Kalinowski, S. T. (2011). Active learning not associated with student learning in a random sample of college biology courses. *CBE—Life Sciences Education*, 10(), 329–435. DOI: 10.1187/cbe.11-07-00613
- Betz, N., Leffers, J. S., Dahlgard Thor, E. E., Fux, M., de Nesnera, K., Tanner, K. D., & Coley, J. D. (2019). Cognitive construal-consistent instructor language in the undergraduate biology classroom. *CBE—Life Sciences Education*, 18(4), 1–16.
- Bishop, B. A., & Anderson, C. W. (1990). Student conceptions of natural selection and its role in evolution. *J Res Sci Teach*, 27(5), 415–427.
- Borgerding, L. A., & Kaya, F. (2022). Is knowledge of evolution useful? A mixed methods examination of college biology students' views. *International Journal of Science Education*, 44(2), 271–296. DOI: 10.1080/09500693.2021.2024913.
- Ecklund, E. H., Johnson, D. R., Vaidyanathan, B., Matthews, K. R., Lewis, S. W., Thomson Jr, R. A., & Di, D. (2019). *Secularity and science: What scientists around the world really think about religion*. Oxford University Press.
- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *PNAS*, 111(23), 8410–8415. DOI: 10.1073/pnas.1319030111
- González Galli, L., Pérez, G., & Gómez Galindo, A. A. (2020). The self-regulation of teleological thinking in natural selection learning. *Evolution: Education and Outreach*, 13(6).1-16
- Gregory, T. R. (2009). Understanding natural selection: Essential concepts and common misconceptions. *Evolution: Education and Outreach*, 2, 156–175.
- Ha, M., & Nehm, R. H. (2014). Darwin's difficulties and students' struggles with trait loss: Cognitive-historical parallelisms in evolutionary explanation. *Science & Education*, 23(5), 1051–1074. DOI 10.1007/s11191-013-9626-1.
- Hartelt, T., Martens, H., & Minkley, N. (2022). Teachers' ability to diagnose and deal with alternative student conceptions of evolution. *Science Education*, 106(3), 706–738.
- Heddy, B.C., & Sinatra, G.M. (2013). Transforming misconceptions: Using transformative experience to promote positive affect and conceptual change in students learning about biological evolution. *Science Education*, 97(5), 723–744.
- Jördens, J., & Hammann, M. (2019). Driven by topics: High school students' interest in evolutionary biology. *Research in Science Education*, 51(1), 599–616
- Kampourakis, K. (2020a). *Understanding evolution*. Cambridge University Press.
- Kampourakis, K. (2020b). Students' "teleological misconceptions" in evolution education: Why the underlying design stance, not teleology per se, is the problem. *Evolution: Education and Outreach*, 13(1), 1-12
- Kampourakis, K., & Nehm, R. H. (2014). History and philosophy of science and the teaching of evolution: Students' conceptions and explanations. In M. R. Matthews (Ed.), *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (pp. 377–399). Springer.
- Lennox, J. G., & Kampourakis, K. (2013). Biological teleology: The need for history. In K. Kampourakis (Ed.), *The philosophy of biology: A companion for educators* (pp. 421–454). Springer.
- Matthews, M. R. (Ed.). (2014). *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (Vols. 1–3). Springer.
- Mayr, E. (1994). *What evolution is*. Basic Books.
- Miller, K. R. (2008). *Only a theory: Evolution and the battle for America's soul*. Penguin.
- National Research Council (2012). *Thinking evolutionarily*. The National Academies Press.
- Nehm, R. H. (2010). Understanding undergraduates' problem-solving processes. *Journal of Biology and Microbiology Education*, 1(2), 119–121.
- Nehm, R. H. (2018). Chapter 14: Evolution. In M. Reiss & K. Kampourakis (Eds.), *Teaching biology in schools* (pp. 1-14). Routledge.
- Nehm, R. H., & Kampourakis, K. (2014). History and philosophy of science and the teaching of macroevolution. In M. R. Matthews (Ed.), *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (pp. 401–421). Springer.
- Nehm, R. H., & Ha, M. (2011). Item feature effects in evolution assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(3), 237–256.
- Nehm, R. H., & Ridgway, J. (2011). What do experts and novices "see" in evolutionary problems? *Evolution: Education and Outreach*, 4(4), 666–679.
- Nehm, R. H., Finch, S., & Sbeglia, G. (2022). Is active learning enough? The contributions of misconception focused instruction and active learning dosage on student learning of evolution. *BioScience*.

- Nehm, R. H., Beggrow, E. P., Opfer, J. E., & Ha, M. (2012). Reasoning about natural selection: Diagnosing contextual competency using the ACORNS instrument. *The American Biology Teacher*, 74(2), 92–98.
- Rector, M. A., Nehm, R. H., & Pearl, D. (2013). Learning the language of evolution: Lexical ambiguity and word meaning in student explanations. *Research in Science Education*, 43(3), 1107–1133.
- Reiss, M. J. (2019). Evolution education: Treating evolution as a sensitive rather than a controversial issue. *Ethics and Education*, 14(3), 351–366.
- Trommler, F., & Hammann, M. (2020). The relationship between biological function and teleology: Implications for biology education. *Evolution: Education and Outreach*, 13(11), 1–16.



## Capítulo 7

# Oportunidades para abordar la evolución humana



## Oportunidades para abordar la evolución humana

**Merav Siani**<sup>1,2</sup>,  
**Anat Yarden**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Weizmann Institute of Science

<sup>2</sup>Herzog College

### Resumen:

Dado que los conocimientos sobre la evolución y especialmente la evolución humana, resultan insuficientes, nos propusimos diseñar tres actividades en línea centradas en el estudiante. Estas actividades tratan sobre la evolución humana y pretenden exponer a los estudiantes de biología de enseñanza media y a los profesores de ciencias en formación a temas relacionados con la evolución humana, con el fin de mejorar sus conocimientos sobre la evolución y la evolución humana, y al mismo tiempo mejorar potencialmente su aceptación de la evolución. Las actividades tratan de la tolerancia a la lactosa, la celiaquía y el consumo de almidón que afecta a la diabetes. Además, se describen los principios que guiaron el diseño de estas tres actividades: temas relacionados con la vida de los estudiantes; temas no controversiales relacionados a la evolución humana; ejemplos de evolución humana ocurridos en un pasado no muy lejano; historias de marcos genéticos no ambiguos que incluyan mutaciones genéticas simples que afecten a rasgos conocidos; y ejemplos que expongan a los estudiantes a herramientas bioinformáticas básicas para enfrentarse a auténticas cuestiones científicas relacionadas con las evidencias genéticas de la evolución. Además, presentamos los resultados de las experiencias de profesorado de ciencias en formación con una de las actividades, que demuestran que una proporción significativa de estos docentes utilizó más conceptos clave de evolución después de experimentar la actividad. En particular, una proporción significativa mostró un aumento en la aceptación de la evolución. El profesorado en servicio que experimentó una de las actividades recomendó la introducción de pruebas genéticas de la evolución humana a través de la actividad y no predijeron oposición entre su alumnado. Así pues, recomendamos el uso de estas actividades entre los estudiantes de biología de secundaria, ya que tratar un tema relevante que incluya pruebas claras y directas de la evolución puede conducir a un mejor conocimiento, a una mayor aceptación de la evolución, y de la evolución humana, y a una mejor negociación de las cuestiones sociocientíficas (CSC, o SSI por sus siglas en inglés) relacionadas con la evolución.

### **PALABRAS CLAVES**

*Actividades en línea, evidencia genética, profesorado religioso en formación religioso*

## INTRODUCCIÓN

Aunque la evolución es un tema controversial (Deniz y Borgerding, 2018), la evolución de los animales y las plantas es más comúnmente aceptada que la evolución de los seres humanos (Asghar y Wiles, 2007). Esto se debe porque muchas sociedades consideran que los humanos tienen alma y un código ético. Por ello algunos teólogos no aceptan el concepto de que se esté produciendo un proceso evolutivo en los humanos (Alter y Webb, 1996). Un estudio realizado en 2009 reveló que sólo el 48% de los estadounidenses está de acuerdo en que la evolución es la mejor explicación del origen de la vida humana en la Tierra (Moore et al., 2010).

Esta polémica también resuena en el ámbito de la educación. En las universidades del Reino Unido, se encontró que el 9% de los estudiantes no acepta la evolución por selección natural, y el 16% no aceptan la evolución humana por selección natural (Betti et al., 2020). En Israel, la situación es similar. Aproximadamente la mitad del profesorado de ciencias de secundaria encuestado veía un conflicto entre la teoría de la evolución y la religión. Para algunos de ellos, la naturaleza aleatoria de la teoría de la evolución contradecía la creencia en una creación dirigida por la “mano de Dios”, mientras que otros se oponían a la posibilidad de que el ser humano evolucionara a partir de los simios (Dodick et al., 2010).

Otro estudio realizado con profesorado de ciencias en Israel mostró que la evolución humana era uno de los temas menos familiares para ellos (Siani y Yarden, 2022b). Sin embargo, ha habido algunos cambios en este sentido durante la última década. Al comparar el tiempo dedicado a enseñar creacionismo y el tiempo dedicado a la evolución humana y los procesos evolutivos en las clases de biología en los EE. UU., hubo un aumento sustancial en la cantidad de tiempo que los profesores dedicaron a enseñar la evolución humana entre 2011 (Berkman y Plutzer, 2011) y 2019 (Plutzer et al., 2020).

En la segunda encuesta, solo el 14% de los docentes informaron que hablaban del creacionismo en las clases de biología de la escuela secundaria, en comparación con el 23% en

la primera encuesta (Plutzer et al., 2020). A pesar de este cambio, la evolución humana sigue siendo un tema delicado y controvertido en la mayoría de los países, lo que podría explicar por qué no se incluye en los planes de estudio y libros de texto de ciencias de muchos países (Zer-Kavod, 2018).

Dado que la evolución es un tema controversial, se considera una cuestión sociocientífica (CSC, o SSI por sus siglas en inglés). Las CSC se definen como cuestiones controversiales que implican el uso de temas científicos y requieren que los estudiantes participen en el diálogo y el debate (Zeidler y Nichols, 2009).

El proceso de abordar las CSC requiere una toma de decisiones basada en el conocimiento científico y al mismo tiempo influenciado por factores sociales como el origen étnico y la religión. Esto implica que la negociación de las CSC relacionadas con la evolución está vinculada al conocimiento y la aceptación de la evolución (Fowler y Zeidler, 2016).

En este capítulo, presentamos tres actividades instructivas en línea que abordan el tema de la evolución humana al abordar la evidencia genética. Las tres actividades tienen como objetivo familiarizar a los estudiantes de biología de secundaria y al profesorado en formación con casos de evolución humana que son relevantes para la vida de los estudiantes. Nos esforzamos por aumentar el conocimiento y la aceptación de la evolución humana, que no son altos en Israel ni en todo el mundo, especialmente entre las poblaciones religiosas. Además, se presentan hallazgos sobre las experiencias de profesores/as de ciencias religiosos judíos en formación con la actividad de “tolerancia a la lactosa” y entrevistas realizadas con ellos/as unos meses después de experimentar esta actividad.

El público objetivo de este capítulo son los/las profesores/as de biología de secundaria, los/las desarrolladores/as de planes de estudios en el campo de la biología y los/las investigadores/as en educación biológica. A la luz de la experiencia de los futuros docentes, recomendamos el uso de las actividades propuestas con profesorado de secundaria y diseñadores/as curriculares. Además,

recomendamos que los/las investigadores/as en educación en biología examinen la evolución del conocimiento de sus estudiantes después de experimentar las actividades.

## 1.1 Controversia religiosa en torno a la evolución

La evolución ha sido un tema controvertido durante muchos años. La mayoría de las dudas y disputas en torno a la evolución surgen del conflicto entre evolución y creacionismo, que se ha detectado en países como Gran Bretaña, donde los musulmanes y los cristianos protestantes conservadores muestran bajos niveles de aceptación de la evolución.

Esto también es válido para los musulmanes de todo el mundo (Edis, 2008), así como entre personas de otros 34 países (Miller et al., 2006). Anteriormente se demostró que, en algunos casos, a medida que aumenta el nivel de religiosidad, el nivel de aceptación de la evolución disminuye (Unsworth y Voas, 2018). Además, entre los estudiantes, las creencias religiosas y las culturas religiosas se encuentran entre los factores más importantes que predicen si aceptarán la evolución (Hill, 2014; Truong et al., 2018). Uno de los factores centrales relacionados con la aceptación de la evolución es que uno debe volverse ateo para poder aceptar la evolución (Lyons, 2010). Aunque algunas religiones han permitido a sus creyentes aceptar la evolución junto con su religiosidad, la teoría de la evolución es rechazada a pesar de la evidencia científica fácilmente disponible (Coyne, 2012). Además, se ha descubierto que la aceptación de la evolución se correlaciona positivamente con las actitudes hacia la ciencia y la comprensión de los conceptos de evolución, mientras que se correlaciona negativamente con la fe religiosa (Eder et al., 2018). Un tema problemático relacionado con la evolución sobre el cual la gente siente dudas tanto en grupos religiosos como no religiosos es la edad de la Tierra (Unsworth y Voas, 2018).

Entre el pueblo judío, el rechazo total de los principios centrales de la teoría de la evolución

existe principalmente en el sector ultraortodoxo. Otras sectas religiosas aceptan los principios principales de la teoría de la evolución, incluida la transformación de las especies.

Para ellos, la ciencia complementa la religión, siendo la evolución un proceso continuo impulsado por Dios (Dodick y Shuchat, 2014; Swetlitz, 2013). Este enfoque ha sido aceptado por rabinos como Abraham Isaac Kook (Cho et al., 2011; Pear et al., 2015), con rabinos adicionales afirmando que la evolución incluso puede respaldar creencias judías (Pear et al., 2015). En contraste, la comunidad judía ultraortodoxa se opone firmemente a la teoría de la evolución (Pear, 2018), tanto que rabinos ultraortodoxos conocidos le dijeron al profesorado que eliminaran páginas de los libros de texto que introducían la teoría de la evolución, lo que les parecía herejías respecto a la creación del mundo (Pear et al., 2015). La oposición a la evolución sostiene que la evidencia científica de la evolución es débil y que la Tierra es joven y ha sido creada por Dios en su forma actual (Swetlitz, 2013).

Se preguntó al profesorado judío de ciencias religiosas en Israel sobre sus conflictos con respecto a la evolución. En particular, mencionaron la edad de la Tierra como un tema controvertido junto con el choque entre la teoría de la evolución y la creación bíblica. Para algunos de los docentes, la aleatoriedad de la evolución se opone a su creencia en la creación dirigida por Dios “tal cual es”. De hecho, algunos de los/las profesores/as que mencionaron la controversia carecían de un conocimiento completo de la teoría de la evolución (Dodick et al., 2010). Investigaciones recientes han encontrado que los/las profesores/as de ciencias israelíes admitieron que ellos/as y sus estudiantes tienen dificultades con la controversia religiosa en torno a la evolución, además de una falta de conocimiento científico sobre la teoría (Siani y Yarden, 2022b).

Además de la religión, se ha demostrado que otros factores influyen en la aceptación de la evolución. Entre los estudiantes de secundaria del Reino Unido, la comprensión de la evolución aumentó significativamente después de

aprender la evolución (especialmente cuando se enseña la evolución después de la genética), ya que existe una fuerte correlación entre la comprensión y la aceptación de la evolución (Kampourakis y Strasser, 2015; Mead et al., 2017). Más investigaciones realizadas en el Reino Unido han demostrado que la aceptación previa de la evolución por parte de los estudiantes es un factor importante que influye en el aprendizaje. Aquellos con una baja aceptación de la evolución antes de aprender sobre la evolución responden mal al aprendizaje de la evolución (Mead et al., 2018).

Entre los docentes de ciencias griegos, se descubrió que la aceptación de la evolución puede mejorarse explicando la teoría de la evolución a través de ejemplos prácticos y comprensibles como argumentos geológicos, fósiles e información sobre la Tierra y sus entornos (Katakos y Athanasiou, 2020). Estos ejemplos y otros muestran que la influencia de la religión en la aceptación de la evolución es compleja y que es importante considerar la variedad de perspectivas entre los individuos estudiados (Elsdon-Baker, 2015).

## 1.2 La evolución humana en los planes de estudios de todo el mundo

Aunque está claro que la evolución es controvertida en todo el mundo, forma parte de los planes de estudios científicos de muchos países. Sin embargo, la situación es diferente cuando se habla de la evolución humana. Incluso en países donde los planes de estudio de ciencias incluyen la evolución, el tema de la evolución humana frecuentemente falta. Una revisión reciente que comparó los planes de estudio de biología de las escuelas secundarias en Australia, Inglaterra, Virginia y California en los EE. UU., Nueva Zelanda, Singapur, Escocia, Finlandia y la provincia canadiense de Columbia Británica mostró que el tema de la evolución era parte de todos los planes de estudio; sin embargo, la evolución humana solo fue mencionada en dos de ellos (Australia y Nueva

Zelanda) (Zer-Kavod, 2018). La evolución humana también se omite en los planes de estudio de Hong Kong (Cheng y Chan, 2018), Irán (Kazempour y Amirshokoohi, 2018) y Francia (Quessada y Clément, 2018).

Además, los libros de texto estadounidenses apenas mencionan la evolución humana. Antes de la década de 1960, los libros de texto de biología ponen poco énfasis en la evolución humana. En los años 1970 y principios de los 1980, los libros de texto redujeron aún más su cobertura de la evolución humana. Sin embargo, en la década de 1990, la cobertura se volvió bastante amplia (Skoog, 2005). Al comparar libros de texto de 18 países (12 europeos y 6 no europeos), 6 de ellos no tenían ningún capítulo que tratara el tema de la evolución humana (Quessada et al., 2008). En 2004, los marcos científicos estatales de sólo tres estados de Estados Unidos tenían estándares relacionados con la evolución humana (Skoog, 2005).

## 1.3 La evolución humana en el plan de estudios de ciencias en Israel

En Israel, se ha abordado recientemente el tema de la evolución en el plan de estudios de ciencia y tecnología de la escuela secundaria y en el plan de estudios de biología de bachillerato (Siani y Yarden, 2020).

Desde 2016, ambos planes de estudio incluyen el tema de la evolución, pero no la evolución humana. En particular, en las escuelas secundarias israelíes, la biología es una asignatura optativa que estudian aproximadamente el 15% de los estudiantes de secundaria. La evolución humana solo se incluyó en los planes de estudio de biología de 1990 y 2010 como parte de la evolución, que era un tema optativo elegido por aproximadamente el 5% de los estudiantes que estudiaban biología en la escuela secundaria. En el plan de estudios de 2010 (Ministerio de Educación de Israel, 2010), se recomendaba que la evolución humana se aprendiera en 1 de las 30 horas dedicadas al tema de la evolución.

Como ya se ha señalado, la evolución humana ya no se incluye en los planes de estudio israelíes. Sin embargo, el plan de estudios de biología israelí está experimentando otro cambio, ya que el comité de redacción del plan de estudios tiene previsto volver a incluir la evolución humana (comunicación personal, Supervisor Jefe de Enseñanza de Biología en Secundaria en Israel). Dado que este tema no ha formado parte del plan de estudios desde hace algunos años, apenas existen actividades educativas relacionadas para los estudiantes, especialmente las centradas en los estudiantes online, por lo que nos propusimos preparar dichas actividades para estar preparados/as cuando este tema vuelva a formar parte del plan de estudios. Una de nuestras consideraciones a la hora de preparar materiales didácticos sobre este tema fue que, si los principios de la evolución se conectaban con la vida del alumnado, podría ser más fácil que los aceptaran y se identificaran con ellos (Pobiner, 2012, 2016; Pobiner et al., 2018, 2019).

### 1.4 ¿Por qué deberíamos enseñar la evolución humana?

Como se puede entender al examinar varios planes de estudio en todo el mundo, la evolución humana se aborda con menos frecuencia que otros temas de la evolución. Sin embargo, se ha demostrado que centrarse específicamente en ejemplos de la evolución humana aumenta el disfrute, el compromiso y el entusiasmo de los estudiantes que estudian la evolución (Pobiner, 2012, 2016; Pobiner et al., 2018).

En particular, los ejemplos humanos han ayudado a los estudiantes a adquirir conocimientos sobre la evolución y aceptación (Kaloj et al., 2022). En este capítulo, presentamos tres actividades que tratan con ejemplos contemporáneos basados en investigaciones en los que se presenta evidencia genética de la evolución humana. Estas actividades podrían permitir a los estudiantes comprender mejor la evidencia de la evolución,

lo que puede llevarles a aceptar la evolución como una herramienta científicamente válida y significativa en el estudio de la biología (Pobiner et al., 2018).

### 1.5 Justificación de las actividades educativas sobre la evolución humana.

En investigaciones anteriores, entrevistamos a agentes de la educación sobre las tensiones teológicas que rodean la implementación de la evolución en los planes de estudio israelíes. Los entrevistados expresaron la necesidad de más materiales de aprendizaje que incluyan evidencia de la evolución como una posible forma de evitar tensiones teológicas entre los estudiantes (Siani y Yarden, 2020). Para satisfacer esta necesidad, se incluyó un capítulo sobre las pruebas de la evolución en una guía docente en línea (Siani, 2018). Uno de los subcapítulos incluidos en esta guía fue “Uniformidad en la estructura celular y composición química”. Este subcapítulo trata de la siguiente prueba genética de la evolución:

**“Al comparar secuencias de ADN de diferentes especies, podemos comprobar qué tan similares son entre sí y darles una puntuación numérica que refleje esa similitud. Con la ayuda de las puntuaciones otorgadas a las secciones de ADN de las diferentes especies, podemos saber quién se separó de quién e incluso estimar hace cuánto tiempo ocurrió. Cuanto mayor sea la diferencia entre las secuencias de ADN, mayor será el tiempo estimado desde la división”. (Siani, 2018, p. 16)**

Esta guía fue un primer paso en el desarrollo de materiales de enseñanza y aprendizaje sobre la evolución. Sin embargo, desde entonces hemos comprendido que los materiales en línea centrados

en los estudiantes que exigen su participación activa, son mejores que las guías para profesorado que sugieren hacer que los materiales sean accesibles para profesores y estudiantes. Dado que los actores educativos han notado que las pruebas de la evolución son un tema importante (y aunque sabíamos que la evolución humana actualmente no se menciona en el plan de estudios de biología israelí), decidimos diseñar actividades online que traten sobre la evolución humana.

### 1.6 Pedagogía en línea centrada en el estudiante

Además del contenido pedagógico que implica la enseñanza de la evolución humana, los continuos cambios en nuestro entorno plantean un desafío para la enseñanza en el siglo XXI.

El sistema educativo desempeña un papel importante a la hora de permitir que los estudiantes participen en estos desafíos cambiantes (Jan, 2017). Una forma de afrontar estos cambios es la tecnología, que se integra en la escolarización para lograr una pedagogía de la mejor calidad y un aprendizaje eficaz por parte de profesorado competente, que cuenta con nuevos conjuntos de recursos y técnicas (Jan, 2017).

Las simulaciones interactivas por computadora han mejorado con éxito la comprensión de los conceptos biológicos por parte de los estudiantes y han reducido los conceptos erróneos comunes sobre la evolución (Abraham et al., 2009; Perry et al., 2008).

Además, los métodos de enseñanza tradicionales no son adecuados para enseñar temas complicados como la evolución, que a menudo incluyen preconcepciones erróneas (Nelson, 2008). Más bien, las unidades de enseñanza basadas en la investigación han mejorado las explicaciones de los estudiantes universitarios y la aceptación de la teoría evolutiva moderna (Robbins y Roy, 2007). De hecho, se demostró que, en promedio, la pedagogía centrada en el estudiante conduce

a mejores resultados de aprendizaje para el alumnado que la enseñanza tradicional de la evolución (Grunspan et al., 2018).

## PROBLEMA

En este capítulo, describimos tres actividades en línea, centradas en los estudiantes, que tratan sobre la evolución humana. Estas actividades tienen como objetivo exponer a los estudiantes de biología de la escuela secundaria y al profesorado de ciencias en formación a cuestiones relacionadas con la evolución humana para mejorar su conocimiento sobre las pruebas de la evolución (que puede llevarlos a aceptar la evolución y la evolución humana), ya que el conocimiento y la aceptación de la evolución son importantes para las CSC y la argumentación.

Describimos los principios que guiaron el diseño de las tres actividades y presentamos los resultados de las experiencias del futuro profesorado de ciencias con una de las actividades.

## METODOLOGÍA

### Principios de diseño considerados al diseñar las actividades

Las tres actividades que diseñamos son parte del entorno gratuito de Enseñanza y Aprendizaje Personalizado (PeTeL) desarrollado por el Departamento de Enseñanza de Ciencias del Instituto Weizmann Petel.

PeTeL es un sistema interactivo de gestión del aprendizaje en línea basado en Moodle que permite a los educadores gestionar el aprendizaje de sus estudiantes en un único entorno en línea. PeTeL incluye una variedad de unidades interactivas de diagnóstico y evaluación para uso

del profesorado de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas.

Además de ayudar en la enseñanza, PeTeL también permite evaluar las acciones de los estudiantes ya que sigue y registra sus respuestas, su número de intentos y el tiempo que pasaron en el entorno (Bar et al., 2022).

Nos guiamos por una serie de principios de diseño al elaborar las siguientes tres actividades en línea: i) tolerancia a la lactosa; ii) enfermedad celíaca; iii) consumo de almidón y diabetes. A continuación, enumeramos cada uno de los principios de diseño que guiaron el diseño de estas tres actividades (Siani y Yarden, 2022a) y proporcionamos ejemplos para demostrar cómo estos principios se reflejan en las actividades:

- a. Elegir un problema médico que esté relacionado con casi todos los estudiantes o su familia.

Este principio se puede demostrar en las tres actividades. Es probable que todos los estudiantes estén familiarizados con amigos/as o familiares que se enfrentan a uno o más de los fenómenos/enfermedades en los que se centran las actividades.

- b. Elegir un tema no polémico de la evolución humana que no genere protestas de diferentes sectores de la población.

Dado que la evolución humana es un tema polémico, incluso más que la evolución de las plantas y los animales, decidimos rastrear la evidencia genética de rasgos que conocemos y que forman parte de nuestras vidas. Estos no incluyen temas que puedan generar controversia entre ciertos sectores de la sociedad israelí (Siani y Yarden, 2020), como la evolución de cráneos y el origen común humano-simio (Pobiner, 2016). Este es el caso de las tres actividades.

- c. Choosing a human evolution example that occurred in the not-too-distant past.

El momento en que probablemente ocurrió la evolución de un rasgo también fue una cuestión central en el diseño de las actividades, ya que los agentes educativos han afirmado que la dimensión temporal es un aspecto difícil de la evolución del aprendizaje (Siani y Yarden, 2022b).

Una de las mutaciones positivas que condujeron a la tolerancia a la lactosa probablemente ocurrió cuando los humanos comenzaron la transición de sociedades nómadas de cazadores-recolectores a comunidades agrícolas sedentarias y productivas hace aproximadamente 10.000 años, una escala de tiempo corta en términos de evolución.

- d. Elegir una “historia marco” genética clara e inequívoca que incluya una mutación genética simple de un solo paso que afecta un rasgo conocido, una mutación que puede explicarse fácilmente a estudiantes de biología de 15 a 18 años cuyo conocimiento sobre el control de la expresión genética es limitado.

Las tres actividades de la evolución humana tienen que ver con una mutación puntual. Por ejemplo, en la actividad que trata sobre la enfermedad celíaca, a los estudiantes se les enseña sobre la mutación puntual que conduce a la enfermedad celíaca y se les pide que completen una pregunta de respuesta inmediata (ver Figura 1).

**Figura 1**

Una pregunta sobre la mutación puntual que conduce a la enfermedad celíaca.

Complete by dragging to the right place

Genotype	Phenotype
<input type="text"/>	No mutation
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	Increased risk for celiac disease

CC CT TT Slight risk of developing celiac disease

El tema unificador de las tres actividades es que muestran pruebas genéticas de la evolución humana. En estudios anteriores, los profesores de ciencias han demostrado que una forma de reducir la tensión entre su alumnado es enseñándoles sobre las pruebas científicas de la evolución (Siani et al., 2022).

Así, entendemos que los docentes buscan actividades que aborden las pruebas. Nos centramos específicamente en pruebas genéticas, ya que la genética es un tema que los estudiantes tienen dificultades para estudiar (Dzidzinyo, 2020; Fauzi y Mitalistiani, 2018). Al diseñar estas actividades, nuestro objetivo era ayudar a los estudiantes a estudiar la evolución dentro del contexto de la genética para permitirles comprender las pruebas genéticas de la evolución.

- e. Elegir un ejemplo que exponga a los estudiantes a herramientas bioinformáticas básicas a través de las cuales puedan vislumbrar la ciencia auténtica que se ocupa de las pruebas genéticas de la evolución.

Las herramientas bioinformáticas permiten a los estudiantes vislumbrar la ciencia auténtica que se ocupa de las pruebas genéticas de la evolución, lo que les muestra cómo trabajan los científicos/as en este campo. Al utilizar estas herramientas, los estudiantes pueden comprender que la evolución es un campo científico basado en pruebas.

La Figura 2 presenta una captura de pantalla de la actividad relacionada con la tolerancia a la lactosa. Esto demuestra el uso de la herramienta EMBOSS (Madeira et al., 2022), con la que los estudiantes pueden comparar dos secuencias de ADN para determinar dónde ha ocurrido una mutación y qué tipo de mutación puntual es.

**Figura 2**

Uso de la herramienta bioinformática EMBOSS en la actividad de tolerancia a la lactosa.

**Pairwise Sequence Alignment**

EMBOSS Needle reads two input sequences and writes their optimal global sequence alignment to file.

**STEP 1 - Enter your nucleotide sequences**

Enter a pair of DNA sequences. Enter or paste your first **nucleotide** sequence in any supported format:

3. Copy the entire DNA sequence in the file DNA-1  
 4. Paste the sequence that you copied in the upper window  
 5. Copy the entire DNA sequence in the file DNA-2  
 6. Paste the sequence that you copied in the lower window.  
 7. In order to receive the result of the comparison between the two sequence pick **"pair"** and press on "submit"

**STEP 2 - Set your pairwise alignment options**

OUTPUT FORMAT  
 pair

The default settings will fulfill the needs of most users.  
 More options... (Click here, if you want to view or change the default settings.)

**STEP 3 - Submit your job**

☐ Subscribe by email (Tick this box if you want to be notified by email when the results are available)

Además de los principios de diseño que nos guiaron inicialmente, durante el desarrollo de la segunda y tercera actividad identificamos un principio de diseño adicional:

- f.** Tratar temas de evolución humana para mejorar el conocimiento de los estudiantes y al mismo tiempo mejorar potencialmente su aceptación de la evolución para que puedan negociar mejor las CSC relacionadas con la evolución.

Dado que la negociación de CSC se ha correlacionado con el desarrollo del conocimiento y la aceptación de la evolución (Fowler y Zeidler, 2016), y debido a que nuestro objetivo es que los estudiantes utilicen el razonamiento sociocientífico en el campo de la evolución, queríamos diseñar estas actividades para mejorar el conocimiento de la evolución de los estudiantes y al mismo tiempo aumentar su aceptación de la evolución humana.

## Descripciones detalladas de las tres actividades.

- i)** Tolerancia a la lactosa: la historia de un rasgo (descripción de la actividad 1)

La primera actividad que diseñamos consta de cuatro unidades que tratan sobre la actividad de la enzima lactasa en nuestro intestino, las diferencias en la tolerancia a la lactosa en personas de diferentes orígenes, el fundamento genético de la tolerancia a la lactosa (Ségurel y Bon, 2017) y una unidad de extensión que trata con el control de la expresión del gen de la lactasa. En esta actividad se incluyen elementos prácticos y experienciales, como el fundamento histórico de la mutación que conduce a la tolerancia a la lactosa.

Anteriormente hemos descrito en detalle toda esta actividad (Siani y Yarden, 2022a). Puede accederse a una versión demo gratuita y sin registro en:

- ii)** ¿Nuestra dieta afecta nuestros genes? (Descripción de la actividad 2)

La segunda actividad que diseñamos consta de dos unidades. La primera unidad aborda las características nutricionales de diferentes poblaciones y la conexión entre su dieta y el genoma humano. La segunda unidad trata de la diferencia entre el gen de la amilasa en el genoma humano y el gen de la amilasa en los chimpancés, mientras intenta ayudar a los estudiantes a comprender por qué existen estas diferencias. Puede accederse a una versión demo gratuita y sin registro en:

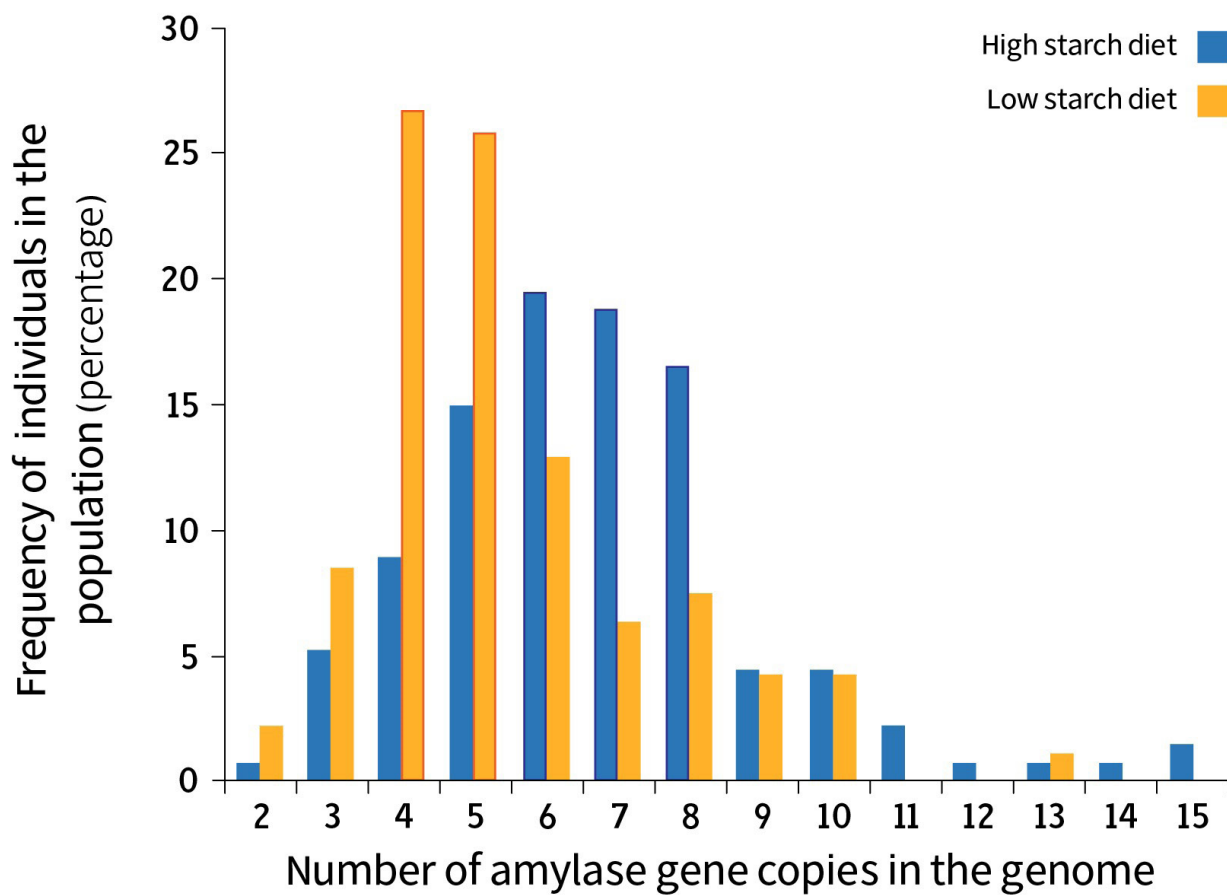
A continuación describimos los elementos principales de cada unidad.

### 1. Dietas en diferentes poblaciones.

Esta unidad tiene como objetivo enseñar a los estudiantes sobre las diferentes composiciones de almidón de las dietas en todo el mundo y familiarizarse con el gen de la amilasa y sus funciones. Luego, los estudiantes pueden comprender que el número de copias del gen de la amilasa es diferente en tribus como la tribu Biaka, que consume pequeñas cantidades de almidón en su dieta, que se basa principalmente en carne y frutas, en comparación con la alimentación occidental, que se basa en carbohidratos.

La Figura 3 presenta una comparación entre las diferentes poblaciones examinadas (Perry et al., 2007). A esta figura le siguen preguntas referidas a las habilidades de investigación que se pueden obtener de ella. Esta sección continúa con una pregunta abierta: ¿Cuál podría ser el beneficio biológico para las personas que tienen múltiples copias del gen de la amilasa? La sección finaliza con una posible explicación de la ventaja actual de una dieta baja en almidón (resumida en la Figura 4).

**Figura 3**  
Número de copias de amilasa en dos poblaciones que consumen dietas ricas o bajas en almidón.



**Figura 4**  
Una pregunta de tipo resumen.

When blood glucose levels remain high, diabetes and obesity can develop.

It is possible that in populations that consume a diet with a high amount of starch, in which there are more people with many copies of the amylase gene, not only does starch efficiently break down starch into glucose, insulin effectively puts glucose into cells, and blood sugar levels remain at a normal level.

It turns out that people with multiple copies of the  gene in their genome also have high levels of  in their blood.

Therefore, they are able to break down the starch into  and with the help of insulin the monosaccharides enter the cells efficiently.

If this condition **does not** occur, the blood sugar level  and thus the  disease and even  may develop.

insulin  amylase  diabetes  rise  obesity  monosaccharides

Check

médico que esté relacionado con casi todos los estudiantes o su familia de alguna manera, ya que las enfermedades metabólicas conciernen a todas las sociedades modernas del mundo.

Copy the human DNA sequence and paste it in the appropriate place according to the illustration.

TGGGAAAGATACCAACCAGTTAGCTATAAATTATGCACAAGATCTGGAAATGTAGTGAATTTAGAAACATGGTGACTAGATGCAACA

## Pairwise Sequence Alignment

EMBOSS Needle reads two input sequences and writes their optimal global sequence alignment to file.

STEP 1 - Enter your nucleotide sequences

Enter a pair of

DNA

sequences. Enter or paste your first **nucleotide** sequence in any supported format:

Human DNA

Or, upload a file:  בחרת קובץ | לא נבחר קובץ

Use a [example sequence](#) | [Clear sequence](#) | [See more example inputs](#)

AND

Enter or paste your second **nucleotide** sequence in any supported format:

Bonobo DNA

Or, upload a file:  בחרת קובץ | לא נבחר קובץ

Copy the DNA sequence of the bonobo and paste it in the appropriate place according to the illustration.

The DNA sequence of the Bonobo in exon 3 is:

TGGGAAAGATACCAACCAGTTAGCTATAAATTATGCACAAGATCTGGAAATGTAGTAATTTAGAAACATGGTGACTAGATGCAACA

de diseño utilizado en esta unidad es el quinto: “Un ejemplo que expone a los estudiantes a herramientas bioinformáticas básicas a través de las cuales pueden vislumbrar la ciencia auténtica que se ocupa de la evidencia genética de la evolución”. Usando la herramienta EMBOSS (Madeira et al. al., 2022), los estudiantes pueden utilizar una herramienta auténtica comúnmente utilizada por los/las científicos/as.

La unidad termina con preguntas que ayuda al alumnado a aplicar sus conocimientos sobre las diferencias genéticas que aprendieron al campo de la evolución humana: “Compara el proceso evolutivo del gen de la amilasa en humanos con

el proceso evolutivo del gen de la amilasa en el bonobo”.

Esta pregunta utiliza el cuarto principio de diseño: “Incluye una mutación genética simple de un solo paso que afecta un rasgo conocido”. Una vez que los estudiantes han aprendido sobre la mutación, establecen una conexión entre ella y la evolución humana.

### iii) Enfermedad celíaca: ¿una ventaja evolutiva? (Descripción de la actividad 3)

El objetivo de esta actividad, que consta de una unidad, es que los estudiantes comprendan los síntomas de la enfermedad celíaca y una de las mutaciones genéticas que la causan. Puede accederse a una versión demo gratuita y sin registro en:

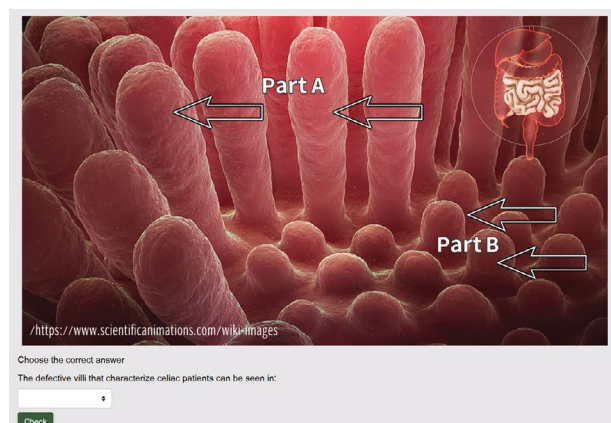
Un breve videoclip presenta este tema. Luego, los estudiantes responden preguntas sobre los síntomas de la enfermedad celíaca para continuar con el clip (Figura 6). A continuación del vídeo, se muestra la diferencia entre las vellosidades del intestino delgado de personas sanas en comparación con las de personas celíacas (ver Figura 7) e incluye una breve pregunta.

**Figura 6**  
Videoclip interactivo sobre la enfermedad celíaca.



**Figura 7**

Ilustración de vellosidades normales y defectuosas. Fuente de la imagen: Scientific Animations Inc, 2019.



Los principios de diseño utilizados en esta unidad son el primero y el segundo. El primer principio es “Un tema conectado con la vida de los estudiantes”, ya que aproximadamente el 1% de la población mundial tiene enfermedad celíaca (About Celiac Disease. Celiac Disease Foundation., 2021). El segundo es “Un tema no controvertido de la evolución humana”, ya que la enfermedad celíaca no suele conectarse con la evolución humana sino con la salud y la nutrición.

A continuación, se muestra la mutación que aumenta la incidencia de la enfermedad (Zhernakova et al., 2010), y se pide a los estudiantes que añadan una idea a un “foro de discusión” sobre la posible ventaja que tienen las personas con esta mutación sobre otras, ya que esta mutación se ha conservado durante muchos años.

Este foro de discusión se relaciona con el sexto principio de diseño: ‘Tratar temas de evolución humana para mejorar el conocimiento de los estudiantes y al mismo tiempo mejorar potencialmente su aceptación de la evolución para que puedan negociar mejor las CSC relacionadas con la evolución’. A través de los comentarios de los estudiantes en el foro de discusión, el docente puede observar el conocimiento y nivel de aceptación entre los estudiantes relacionado con los principios de la evolución y la evolución humana. Este foro podría ser una oportunidad

para la discusión y el debate sobre la aceptación de la evolución, las mutaciones ventajosas y la evolución humana.

La actividad finaliza con una descripción de una investigación que supone que la mutación de la enfermedad celíaca permite a las personas que la padecen hacer frente a enfermedades infecciosas, lo que podría explicar por qué ha sido beneficiosa durante miles de años.

## RESULTADOS

### Experiencia del profesorado de ciencias religioso en formación con la actividad de tolerancia a la lactosa

La actividad “Tolerancia a la lactosa: la historia de un rasgo” fue experimentada por 23 profesores/as de ciencias judíos religiosos en formación durante el año académico 2019-2020. Cuatro meses después de vivir la actividad, entrevistó a 11 de los/las futuros/as profesores/as a través de Zoom. El objetivo principal de la primera entrevista, conocida como la entrevista de “conocimiento de la evolución”, fue sondear el conocimiento de la evolución de los futuros docentes.

Las entrevistas duraron entre 20 y 30 minutos e incluyeron seis preguntas de conocimiento.

Las preguntas 1 y 5 tratan de la evolución humana y fueron adaptadas de Pobiner et al. (2019). Las preguntas restantes fueron adaptadas de Nehm y Ha (2011). Las preguntas 2 y 3 tratan de la evolución animal: la pregunta 2 trata de la formación de un rasgo, mientras que la pregunta 3 trata de la pérdida de un rasgo. La pregunta 4 trata sobre la evolución artificial y la pregunta 6 trata sobre la evolución de las bacterias.

El análisis de los datos de las entrevistas mostró que, en todas las preguntas, excepto en la que trataba sobre la pérdida de un rasgo (es decir, la pregunta 3), los futuros docentes utilizaron más conceptos clave de evolución (Nehm y Reilly, 2007)

que concepciones alternativas (*naïve*) (Nehm & Ha, 2011) para explicar situaciones de evolución. Esto podría significar que experimentar la actividad de la evolución humana fue significativo y resultó en que al profesorado en formación les resultará más fácil explicar los fenómenos de la evolución humana incluso unos meses después de la actividad (Siani y Yarden, en revisión).

Al inicio y al final de la actividad, los futuros docentes completaron el cuestionario de aceptación de la evolución I-SEA (Nadelson y Southerland, 2012), en el que una de las tres subescalas trata sobre evolución humana.

El análisis del cuestionario mostró una diferencia significativa ( $p=0,0291$ ) entre la puntuación media de los ítems relacionados con la evolución humana en el pre-test ( $3,283\pm0,877$ ) versus el post-test ( $3,572\pm0,922$ ), es decir, que el promedio de aceptación de los ítems de esta sección aumentó después de realizar esta actividad. Además, la puntuación promedio de aceptación de la evolución (según el cuestionario de tres partes del I-SEA) muestra que, entre los 23 futuros docentes, 13 mostraron un índice claro de mayor aceptación de la evolución después de la actividad que antes de ella, mientras que 3 no mostraron cambios y 7 mostraron una disminución en su aceptación (Siani y Yarden, en revisión).

Nueve meses después de haber experimentado la actividad, entrevistamos a cuatro de estos futuros docentes a través de Zoom durante 20 a 30 minutos. Al momento de la segunda entrevista, los entrevistados ya eran docentes en servicio y habían completado la mayor parte de sus estudios universitarios. El objetivo principal de la segunda entrevista, conocida como la entrevista de “aceptación de la evolución”, fue hacer un seguimiento del grado de aceptación de la evolución por parte del profesorado, su voluntad de enseñar la evolución y aclarar si hubo un cambio o retención en su aceptación de la evolución y la evolución humana. Las preguntas de ambas entrevistas se detallan en un artículo reciente de nuestro grupo (Siani y Yarden, en revisión).

En este capítulo, nos centramos en la forma en que los futuros docentes (ahora profesores y

profesoras de ciencias en servicio) declararon que abordarían el tema de la evolución y la evolución humana 9 meses después de haber experimentado la actividad de “tolerancia a la lactosa”.

La mayoría de ellos/as dijeron que en las escuelas en las que enseñan ya se han enfrentado al rechazo de la evolución. Otros/as dijeron que suponen que se enfrentarán a ella:

**Creo que no enseñaré evolución si enseño en una escuela religiosa porque puede despertar allí, hmm... porque su visión es muy negativa hacia la evolución. Incluso si lo presento de una manera nada negativa, pensarán que estoy trayendo un espíritu laico a una escuela religiosa que estaría fuera de lugar. (S10)**

Aunque S10 entiende que la evolución es una teoría aceptada por la comunidad científica, argumentó que no enseñaría la evolución como un proceso aleatorio, sino dirigido:

**Nosotros como personas religiosas pensamos que la evolución ocurre porque hay algo que la dirige, haciendo que sea más fácil aceptarla. Veo el proceso evolutivo como algo dirigido. En mi percepción como persona religiosa, esto no sucede por sí solo. (T10)**

Otra maestra en ejercicio enfatizó su propio argumento a favor de la evolución y señaló que cuando presenta el tema a los estudiantes, se basa tanto en la Biblia como en principios científicos evolutivos:

**Es imposible entender el libro del Génesis sin la perspectiva evolutiva: primero, la luz del sol tiene que desarrollarse; luego, los animales en el agua y luego los pájaros. Si hubiera habido una contradicción entre la Biblia y la teoría de la evolución, podría haberme hecho escéptico/a respecto de la Biblia o de la evolución. Sin embargo, la evolución me funciona perfectamente con la Biblia. (T11)**

La mayoría de los/las futuros/as profesores/as no diferenciaron entre la evolución humana y la evolución de las plantas y los animales, sin embargo, algunos de ellos enfatizaron los problemas de sus estudiantes de la siguiente manera:

**‘No creo que haya una diferencia entre diferentes criaturas vivientes. Creo que todas las poblaciones están cambiando a lo largo de los años. Todas las criaturas evolucionan (S9).**

**No hago distinción entre humanos, bacterias, etc. Enseñaré sobre todas las criaturas. Aquí hay una declaración filosófica. Que el hombre no es el centro del mundo. Pero lo que preocupará principalmente a los estudiantes es la contradicción entre el creacionismo, la evolución y el origen del hombre. Los estudiantes pueden decir que en realidad somos animales, y esto quizás sea una cuestión filosófica que también se pueda discutir, así como si el origen del hombre es realmente del simio. (S5)**

Sin embargo, algunos futuros docentes sí diferenciaron entre la evolución humana y la de otras criaturas:

**¿Evolución humana? Es diferente al de las plantas y los animales. Puedo aceptar la microevolución, pero no la macroevolución. El tema de la lactosa no entra en conflicto con la religión. Lo que entra en conflicto con la religión es algo que aún no se ha demostrado. La creación del mundo choca con la religión porque no se saben cosas con certeza, como la evolución del ser humano. (S8)**

Así, podemos entender que la evolución humana es aún más controvertida que otros temas de la evolución. Además, es esencial realizar más actividades en este campo, lo que podría ayudar tanto a profesores/as como a estudiantes.

## DISCUSIÓN

En este capítulo, hemos descrito las consideraciones teóricas y los principios de diseño que nos han llevado a diseñar tres actividades en línea relacionadas con la evolución humana. Además, hemos descrito la experiencia de profesorado de ciencias en formación que utilizan una de estas actividades. Esta experiencia podría haber llevado a los futuros docentes a comprender y aceptar mejor la evolución humana.

¿Por qué deberíamos ocuparnos específicamente de la evolución humana y esforzarnos en actividades que aborden este tema? Estudios anteriores relacionados con las actividades de la evolución humana han afirmado que es importante enseñar la evolución humana en el nivel escolar, para desarrollar una sociedad científicamente alfabetizada, que pueda discutir y debatir eficazmente cuestiones relacionadas con este tema (Sutherland y L'Abbé, 2019). Además, comprender la variación humana, que se refleja en las actividades relacionadas con la evolución humana, es un paso importante para respetar la naturaleza diversa de las sociedades (Donovan et al., 2019; Strkalj et al., 2007), como la sociedad multicultural de Israel.

Además de la importancia de comprender y aceptar la diversidad de la sociedad, otro objetivo principal al diseñar las actividades sobre la evolución humana fue introducir a los estudiantes en las pruebas genéticas, que se enseñan principalmente mediante la comparación de secuencias de ADN mediante herramientas bioinformáticas. La importancia de enseñar pruebas de la evolución es consistente con estudios previos que señalan que un factor importante que influye en el conocimiento y la aceptación de la teoría de la evolución es discutir las pruebas que respaldan la evolución y la selección natural (Bravo y Cofré, 2016). Por lo tanto, al discutir las pruebas genéticas con los estudiantes, podríamos mejorar sus conocimientos y quizás también su aceptación de la evolución.

Otro objetivo al diseñar las actividades fue exponer al alumnado al hecho de que la evolución ocurre en los humanos como en cualquier otro organismo. Investigaciones anteriores han demostrado que los estudiantes consideran

la evolución humana como un tema evolutivo separado (Trevisan y Santovito, 2015). Cabe destacar que para nosotras era importante revertir este concepto a través de las actividades que diseñamos.

Así, los futuros docentes de ciencias que experimentaron la actividad de “tolerancia a la lactosa” reflexionaron sobre el hecho de que la evolución de los humanos es parte de la teoría de la evolución. Además, las concepciones alternativas comunes sobre la evolución son explicaciones teleológicas, que generalmente se refieren al propósito de un rasgo (Hammann y Nehm, 2020) y son comunes tanto entre estudiantes de secundaria como de primaria (Brown et al., 2020). Al diseñar las actividades, nos esforzamos en diseñarlas de modo que los estudiantes no interpretaran las mutaciones como un intento intencional de un organismo de adaptarse a su entorno. Más bien, enfatizamos el hecho de que las mutaciones ocurrieron al azar y dieron una ventaja a quienes las tenían.

Dado que estudios anteriores han demostrado que la religiosidad es un factor influyente al considerar temas como el origen humano (Silva et al., 2021), era importante para nosotros que el profesorado religioso futuro experimentara una de las actividades y nos permitiera evaluar sus reacciones a la evolución humana unos meses después. A partir de sus reacciones, podemos concluir que su experiencia con la actividad podría haber agregado valor a su conocimiento (y quizás también a su aceptación) de la evolución humana.

Además de la religiosidad, otro factor que influye en la aceptación de la evolución es la comprensión de la naturaleza de la ciencia (NdC, o NOS, por sus siglas en inglés) (Dunk et al., 2019). El profesorado de ciencias en formación con un alto nivel de comprensión y aceptación de la teoría de la evolución también tenían un alto conocimiento de la NdC. Entendieron que la teoría científica es confiable ya que ha sido validada por evidencia acumulada y que también podría cambiar como resultado de nuevas investigaciones (Akyol et al., 2012). En particular, la importancia de la NdC se ha enfatizado en las tres actividades descritas en este capítulo. Nuestro objetivo era mostrar a los estudiantes la importancia de

la investigación genética como prueba de la evolución humana para aumentar su comprensión de la NdC, aumentando así el conocimiento de la evolución y quizás también la aceptación de la evolución.

Finalmente, también se ha descubierto que el pensamiento de mente abierta es significativamente correlacionado con la aceptación de la evolución humana (Sinatra et al., 2003), lo que implica que se ha encontrado una correlación positiva entre las características del pensamiento de mente abierta y la aceptación de la evolución. Esto significa que la aceptación de la evolución puede ser mayor entre los futuros docentes cuya flexibilidad cognitiva y apertura a la creencia en la teoría de la evolución son mayores (Athanasios et al., 2012).

Las tres actividades diseñadas y descritas en este capítulo tienen como objetivo desarrollar el pensamiento flexible y de mente abierta de los estudiantes mostrándoles el contexto genético de los fenómenos cotidianos que están conectados con sus vidas.

## LO MÁS DESTACADO PARA LAS PRÁCTICAS DOCENTES

Después de analizar el impacto de la actividad de ‘tolerancia a la lactosa’ entre los/las futuros/as profesores/as de ciencias, podemos concluir que abordar la evolución humana a través de una actividad interactiva centrada en el estudiante podría aumentar el conocimiento de la evolución humana, especialmente porque vimos que los futuros docentes utilizaban más conceptos científicos y menos concepciones alternativas cuando se trata de la teoría de la evolución. Esto puede implicar que incluso una actividad corta que aborde un tema de la evolución que tenga elementos relevantes para la vida de los estudiantes, y trate con pruebas claras y directas de la evolución, puede tener impacto y conducir a un mejor conocimiento —y tal vez a un aumento

en la aceptación— de la evolución y de la evolución humana.

Otro uso de la actividad de “tolerancia a la lactosa” se produjo en 2020, cuando 117 docentes en servicio experimentaron la actividad. Sus reflexiones sobre esta actividad podrían ayudar a otros/as profesores/as de todo el mundo ayudándoles a comprender cómo utilizarla. En promedio, la cantidad de tiempo de clase que los docentes recomendaron dedicar a cada una de las dos primeras unidades fue una sesión, mientras que, para la tercera unidad, la mayoría de los profesores recomendaron dedicar dos sesiones. En general, el 88% del profesorado dijo que la primera unidad fue fácil o razonable, mientras que el 77% dijo lo mismo sobre la segunda unidad y el 68% dijo que la tercera unidad fue de razonable a difícil. Cabe destacar que no se les preguntó sobre la cuarta unidad.

Cuando se preguntó a los docentes cómo combinarían la actividad durante la enseñanza de la evolución, algunos recomendaron emplear la actividad después de desarrollar una familiaridad básica con la selección natural, la presión selectiva y las mutaciones.

Otros/as profesores/as recomendaron estar familiarizado con la transcripción del ADN, el ARN y la traducción de proteínas antes de realizar la actividad.

El profesorado en servicio también sugirió utilizar la actividad, ya que es un ejemplo simple y relevante de la evolución humana que no involucra estudios de los huesos de pueblos antiguos o dinosaurios, lo que puede resultar poco claro o problemático para algunos estudiantes. Además, sugirieron utilizar la actividad como una forma de estimular la curiosidad del alumnado en el campo de la evolución.

Por lo tanto, los/las profesores/as mencionaron los objetivos principales de los principios de diseño que utilizamos en las tres actividades, es decir, un tema médico que está conectado con la vida de los estudiantes y un tema no polémico de la evolución humana que no generará protestas, lo que les permitió enseñar la evolución humana

sin especial controversia. Ninguno de los docentes mencionó ninguna controversia experimentada al tratar con la evolución humana, ni supusieron que surgiría controversia entre sus estudiantes. De manera similar, el profesorado de ciencias en servicio que experimentó la actividad de “tolerancia a la lactosa” sugirió emplear la actividad para permitir que los estudiantes se sientan investigadores al utilizar las herramientas bioinformáticas. Por lo tanto, los/las profesores/as de ciencias en servicio también sugirieron el principio de diseño relacionado con “exponer a los estudiantes a herramientas científicas auténticas”.

En general, podemos concluir que el uso de estas actividades en clases podría mejorar el conocimiento sobre la evolución y, por tanto,

aumentar la aceptación de la evolución humana. Además, el uso de ejemplos de evolución humana fue recomendado por todo el profesorado en servicio y en formación (y probablemente también sea preferido por los estudiantes), ya que ambos grupos recomendaron su uso y no predijeron ninguna oposición a la introducción de pruebas genéticas de la evolución humana a través de estas actividades.

## REFERENCIAS

- About celiac disease. *Celiac Disease Foundation*. (2021). International Publishing.
- Abraham, J. K., Meir, E., Perry, J., Herron, J. C., Maruca, S., & Stal, D. (2009). Addressing Undergraduate Student Misconceptions about Natural Selection with an Interactive Simulated Laboratory. *Evolution: Education and Outreach*, 2(3), 393–404.
- Alter, S. G., & Webb, G. E. (1996). The Evolution Controversy in America. *History of Education Quarterly*, 36(2), 207.
- Asghar, A., & Wiles, J. R. (2007). Canadian Pre-service Elementary Teachers' Conceptions of Biological Evolution and Evolution Education. *McGill Journal of Education*, 42(2), 189–209.
- Athanasiou, K., Katakos, E., & Papadopoulou, P. (2012). Conceptual ecology of evolution acceptance among Greek education students: the contribution of knowledge increase. *Journal of Biological Education*, 46(4), 234–241.
- Bar, C., Siani, M., & Yarden, A. (2022). Biology Teachers' Re-designed eLearning Units: The Relationships Between Knowledge Types and Scientific Practices. *Proceedings of the 16th International Conference of the Learning Sciences - ICLS*, 993–996.
- Berkman, M. B., & Plutzer, E. (2011). Defeating Creationism in the Courtroom, But Not in the Classroom. *Science*, 331(6016), 404–405.
- Betti, L., Shaw, P., & Behrends, V. (2020). Acceptance of Biological Evolution by First-Year Life Sciences University Students. *Science & Education*, 29(2), 395–409.
- Bravo, P., & Cofré, H. (2016). Developing biology teachers' pedagogical content knowledge through learning study: the case of teaching human evolution. *International Journal of Science Education*, 38(16), 2500–2527.
- Brown, S. A., Ronfard, S., & Kelemen, D. (2020). Teaching natural selection in early elementary classrooms: Can a storybook intervention reduce teleological misunderstandings? *Evolution: Education and Outreach*, 13(12), 1–19.
- Cheng, K. L., & Chan, K. H. (2018). Evolution Education in Hong Kong (1991–2016): A Content Analysis of the Biology Textbooks for Secondary School Graduates. In H. Deniz & L. A. Borgerding (Eds.), *Evolution Education Around the Globe* (pp. 315–333). Springer International Publishing.
- Cho, M.-H., Lankford, D. M., & Wescott, D. J. (2011). Exploring the Relationships among Epistemological Beliefs, Nature of Science, and Conceptual Change in the Learning of Evolutionary Theory. *Evolution: Education and Outreach*, 4(2), 313–322.
- Coyne, J. A. (2012). Science, Religion, and Society: the Problem of Evolution in America. *Evolution*, 66(8), 2654–2663.
- Deniz, H., & Borgerding, L. A. (2018). Evolutionary theory as a controversial topic in science curriculum around the globe. In *Evolution Education Around the Globe* (pp. 3–11). Springer, Cham.
- Dodick, J., Dayan, A., & Orion, N. (2010). Philosophical approaches of religious Jewish science teachers toward the teaching of "controversial" topics in science. *International Journal of Science Education*, 32(11), 1521–1548.
- Dodick, J., & Shuchat, R. B. (2014). Historical Interactions Between Judaism and Science and Their Influence on Science Teaching and Learning. In M. R. Matthews (Ed.), *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* (pp. 1721–1757). Springer International Publishing.
- Donovan, B. M., Semmens, R., Keck, P., Brimhall, E., Busch, K. C., Weindling, M., Duncan, A., Stuhlsatz, M., Bracey, Z. B., Bloom, M., Kowalski, S., & Salazar, B. (2019). Toward a more humane genetics education: Learning about the social and quantitative complexities of human genetic variation research could reduce racial bias in adolescent and adult populations. *Science Education*, 103(3), 529–560.
- Dunk, R. D. P., Barnes, M. E., Reiss, M. J., Alters, B., Asghar, A., Carter, B. E., Cotner, S., Glaze, A. L., Hawley, P. H., Jensen, J. L., Mead, L. S., Nadelson, L. S., Nelson, C. E., Pobiner, B., Scott, E. C., Shtulman, A., Sinatra, G. M., Southerland, S. A., Walter, E. M., ... Wiles, J. R. (2019). Evolution education is a complex landscape. *Nature Ecology & Evolution*, 3(3), 327–329.
- Dzidzinyo, A. F. (2020). *Exploration of Senior High School Biology Students' Conceptual Understanding of Genetics*. (Publication No. 23105496) [Doctoral dissertation; University of Cape Coast]. UCC Institutional Repository.

- Eder, E., Seidl, V., Lange, J., & Graf, D. (2018). Evolution Education in the German-Speaking Countries. In H. Deniz & L. A. Borgerding (Eds.), *Evolution Education Around the Globe* (pp. 235–260). Springer International Publishing.
- Edis, T. (2008). Modern Science and Conservative Islam: An Uneasy Relationship. In *Science, Worldviews and Education* (pp. 237–255). Springer Netherlands.
- Elsdon-Baker, F. (2015). Creating creationists: The influence of 'issues framing' on our understanding of public perceptions of clash narratives between evolutionary science and belief. *Public Understanding of Science*, 24(4), 422–439..
- Fauzi, A., & Mitalistiani, M. (2018). High school biology topics that perceived difficult by undergraduate students. *Didaktika Biologi: Jurnal Penelitian Pendidikan Biologi*, 2(2), 73–84.
- Fowler, S. R., & Zeidler, D. L. (2016). Lack of Evolution Acceptance Inhibits Students' Negotiation of Biology-based Socioscientific Issues. *Journal of Biological Education*, 50(4), 407–424.
- Grunspan, D. Z., Kline, M. A., & Brownell, S. E. (2018). The Lecture Machine: A Cultural Evolutionary Model of Pedagogy in Higher Education. *CBE—Life Sciences Education*, 17(3), 1–11.
- Hammann, M., & Nehm, R. H. (2020). Teleology and evolution education: Introduction to the special issue. *Evolution: Education and Outreach*, 13(1), 1–5.
- Hill, J. P. (2014). Rejecting Evolution: The Role of Religion, Education, and Social Networks. *Journal for the Scientific Study of Religion*, 53(3), 575–594.
- Israeli Ministry of Education. (2010). *Biologia: Tochnit halimudim lehativa haeliona [Biology curriculum, 10th to 12th grade]*.
- Jan, H. (2017). Teacher of 21st Century: Characteristics and Development. *Research on Humanities and Social Sciences*, 7(9), 50–54.
- Kaloi, M., Hopper, J. D., Hubble, G., Niu, M. E., Shumway, S. G., Tolman, E. R., & Jensen, J. L. (2022). Exploring the Relationship between Science, Religion & Attitudes toward Evolution Education. *The American Biology Teacher*, 84(2), 75–81.
- Kampourakis, K., & Strasser, B. J. (2015). The Evolutionist, the Creationist, and the 'Unsure': Picking-Up the Wrong Fight? *International Journal of Science Education, Part B*, 5(3), 271–275.
- Katakos, S., & Athanasiou, K. (2020). The 'Geological Argument' as an instrument for the acceptance of the Theory of Evolution among Greek Science Teachers. *Journal of Genetics and Cell Biology*, 3(3), 183–186.
- Kazempour, M., & Amirshokoochi, A. (2018). Evolution Education in Iran: Shattering Myths About Teaching Evolution in an Islamic State. In *Evolution Education Around the Globe* (pp. 281–295). Springer International Publishing.
- Lyons, S. L. (2010). Evolution and Education: Lessons from Thomas Huxley. *Science & Education*, 19(4–5), 445–459.
- Madeira, F., Pearce, M., Tivey, A. R. N., Basutkar, P., Lee, J., Edbali, O., Madhusoodanan, N., Kolesnikov, A., & Lopez, R. (2022). Search and sequence analysis tools services from EMBL-EBI in 2022. *Nucleic Acids Research*, 50(1), 276–279.
- Mead, R., Hejmadi, M., & Hurst, L. D. (2017). Teaching genetics prior to teaching evolution improves evolution understanding but not acceptance. *PLOS Biology*, 15(5), 1–30.
- Mead, R., Hejmadi, M., & Hurst, L. D. (2018). Scientific aptitude better explains poor responses to teaching of evolution than psychological conflicts. *Nature Ecology & Evolution*, 2(2), 388–394.
- Miller, J. D., Scott, E. C., & Okamoto, S. (2006). *Public Acceptance of Evolution*. *Science*, 313(5788), 765–766.
- Moore, R., Decker, M., & Cotner, S. H. (2010). *Chronology of the Evolution-Creationism Controversy*. ABC-CLIO.
- Nehm, R. H., & Ha, M. (2011). Item feature effects in evolution assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(3), 237–256.
- Nehm, R. H., & Reilly, L. (2007). Biology Majors' Knowledge and Misconceptions of Natural Selection. *BioScience*, 57(3), 263–272.

- Nelson, C. E. (2008). Teaching evolution (and all of biology) more effectively: Strategies for engagement, critical reasoning, and confronting misconceptions. *Integrative and Comparative Biology*, 48(2), 213–225.
- Pear, R. S. A. (2018). Agreeing to Disagree: American Orthodox Jewish Scientists' Confrontation with Evolution in the 1960s. *Religion and American Culture: A Journal of Interpretation*, 28(02), 206–237.
- Pear, R. S. A., Klein, M., & Berger, D. (2015). Report from the field: A pilot project on the teaching of Jewish views of evolution in Israel. *International Journal of Jewish Education Research*, 25(8), 59–66.
- Perry, G. H., Dominy, N. J., Claw, K. G., Lee, A. S., Fiegler, H., Redon, R., Werner, J., Villanea, F. A., Mountain, J. L., Misra, R., Carter, N. P., Lee, C., & Stone, A. C. (2007). Diet and the evolution of human amylase gene copy number variation. *Nature Genetics*, 39(10), 1256–1260.
- Perry, J., Meir, E., Herron, J. C., Maruca, S., & Stal, D. (2008). Evaluating Two Approaches to Helping College Students Understand Evolutionary Trees through Diagramming Tasks. *CBE—Life Sciences Education*, 7(2), 193–201.
- Plutzer, E., Branch, G., & Reid, A. (2020). Teaching evolution in U.S. public schools: a continuing challenge. *Evolution: Education and Outreach*, 13(14), 1–15.
- Pobiner, B., Beardsley, P. M., Bertka, C. M., & Watson, W. A. (2018). Using human case studies to teach evolution in high school A.P. biology classrooms. *Evolution: Education and Outreach*, 11(3), 1–14.
- Pobiner, B. L. (2012). Use Human Examples to Teach Evolution. *The American Biology Teacher*, 74(2), 71–72.
- Pobiner, B. L. (2016). Accepting, understanding, teaching, and learning (human) evolution: Obstacles and opportunities. *American Journal of Physical Anthropology*, 159, 232–274.
- Pobiner, B., Watson, W. A., Beardsley, P. M., & Bertka, C. M. (2019). Using Human Examples to Teach Evolution to High School Students: Increasing Understanding and Decreasing Cognitive Biases and Misconceptions. In *Evolution Education Re-considered* (pp. 185–205). Springer International Publishing.
- Quessada, M. P., Clément, P., Oerke, B., & Valente, A. (2008). Human Evolution in Science Textbooks from Twelve Different Countries. *Science Education International*, 19(2), 147–162.
- Quessada, Marie Pierre, & Clément, P. (2018). Evolution Education in France: Evolution Is Widely Taught and Accepted. In *Evolution Education Around the Globe* (pp. 213–233). Springer International Publishing.
- Robbins, J. R., & Roy, P. (2007). The natural selection: Identifying & correcting non-science student preconceptions through an inquiry-based, critical approach to evolution. In *American Biology Teacher* (Vol. 69, Issue 8, pp. 460–466). National Association of Biology Teachers.
- Scientific Animations Inc. (2019).
- Ségurel, L., & Bon, C. (2017). On the Evolution of Lactase Persistence in Humans. *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, 18(1), 297–319.
- Siani, M. (2018). *A Window to Evolution*. National Center for High-School Biology and Environmental Sciences Teacher (Hebrew).
- Siani, M., Stahi-Hitin, R., & Yarden, A. (2022). Student Opposition to Learning Evolution and How Teachers Deal with This following a Teacher Training Course. *Journal of Science Teacher Education*, 33(7), 764–785.
- Siani, M., & Yarden, A. (submitted). *Possible Connections Between Knowledge and Acceptance of Evolution amongst Jewish Religious Preservice Science Teachers Who Learned About Human Evolution*.
- Siani, M., & Yarden, A. (2020). "Evolution? I Don't Believe in It": Theological Tensions Surrounding the Implementation of Evolution in the Israeli Curricula. *Science and Education*, 29(2), 411–441.
- Siani, M., & Yarden, A. (2022a). Introducing Evolution of the Human Lactase Gene using an Online Interactive Activity. *American Biology Teacher*, 84(1), 16–21.
- Siani, M., & Yarden, A. (2022b). "I Think that Teachers Do Not Teach Evolution Because It Is Complicated": Difficulties in Teaching and Learning Evolution in Israel. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 20(3), 481–501.

- Silva, H. M., Oliveira, A. W., Belloso, G. V., Díaz, M. A., & Carvalho, G. S. (2021). Biology teachers' conceptions of Humankind Origin across secular and religious countries: an international comparison. *Evolution: Education and Outreach*, 14(2), 1–12.
- Sinatra, G. M., Southerland, S. A., McConaughy, F., & Demastes, J. W. (2003). Intentions and beliefs in students' understanding and acceptance of biological evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(5), 510–528.
- Skoog, G. (2005). The coverage of human evolution in high school biology textbooks in the 20th century and in current state science standards. *Science and Education*, 14(3–5), 395–422.
- Strkalj, G., Gibbon, V., & Wilkinson, T. (2007). Teaching human variation: Can education change students' attitudes towards "race"? *Glasnik Etnografskog Instituta*, 55(1), 253–258.
- Sutherland, C., & L'Abbé, E. (2019). Human evolution in the South African school curriculum. *South African Journal of Science*, 115(7/8), 1–7.
- Swetlitz, M. (2013). Judaism, Jews, and Evolution. In Michael Ruse (Ed.), *The Cambridge Encyclopedia of Darwin and Evolutionary Thought* (pp. 493–498). Cambridge University Press.
- Trevisan, T., & Santovito, G. (2015). Teaching evolution: a laboratory approach. In *EDULEARN15 Proceedings*. pp. 2234–2244.
- Truong, J. M., Barnes, M. E., & Brownell, S. E. (2018). Can Six Minutes of Culturally Competent Evolution Education Reduce Students' Level of Perceived Conflict Between Evolution and Religion? *The American Biology Teacher*, 80(2), 106–115.
- Unsworth, A., & Voas, D. (2018). Attitudes to evolution among Christians, Muslims and the Non-Religious in Britain: Differential effects of religious and educational factors. *Public Understanding of Science*, 27(1), 76–93.
- Zeidler, D. L., & Nichols, B. H. (2009). Socioscientific issues: Theory and practice. *Journal of Elementary Science Education*, 21(2), 49–58.
- Zer-Kavod, G. (2018). *Review of biology curricula for high schools around the world*.
- Zhernakova, A., Elbers, C. C., Ferwerda, B., Romanos, J., Trynka, G., Dubois, P. C., de Kovel, C. G. F., Franke, L., Oosting, M., Barisani, D., Bardella, M. T., Joosten, L. A. B., Saavalainen, P., van Heel, D. A., Catassi, C., Netea, M. G., & Wijmenga, C. (2010). Evolutionary and Functional Analysis of Celiac Risk Loci Reveals SH2B3 as a Protective Factor against Bacterial Infection. *The American Journal of Human Genetics*, 86(6), 970–977.

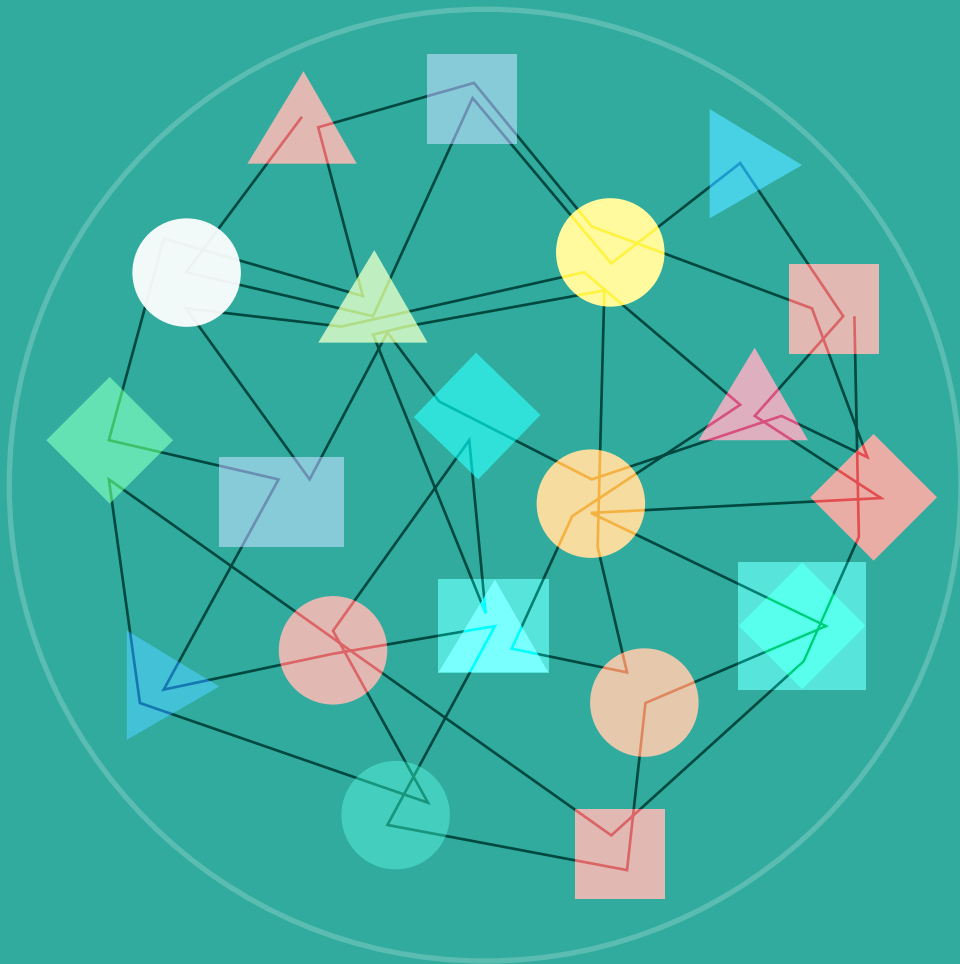
## AGRADECIMIENTOS

Las autoras del Capítulo 7 querían agradecer a los desarrolladores/as del programa PeTeL para la Enseñanza y Aprendizaje Personalizados en el Departamento de la Enseñanza de las Ciencias del Instituto de Ciencias Weizmann (Weizmann Institute of Science), por su asistencia y apoyo técnico.



## Capítulo 8

# Evolución de la cooperación y la sostenibilidad de los recursos de propiedad común



## Evolución de la cooperación y la sostenibilidad de los recursos de propiedad común

**Susan Hanisch**<sup>1,2,3,</sup>

**Dustin Eirdosh**<sup>2,1,</sup>

**Tammy Morgan**<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Research Group for Biology Education, Friedrich Schiller University Jena, Germany, <sup>2</sup>Department of Comparative Cultural Psychology

Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology, Leipzig, Germany

<sup>3</sup>Faculty of Education, University of Leipzig, Leipzig, Germany

<sup>4</sup>Lake Placid Central School District, Lake Placid, NY, USA

### Resumen:

La gestión sostenible de recursos a menudo implica la gestión de recursos de propiedad común (CPR, por sus siglas en inglés), que incluyen los recursos sociales y materiales compartidos por grupos de individuos. Los CPR pueden ser propensos al uso excesivo debido a la competencia entre los usuarios de recursos que están motivados a maximizar su uso (o contribuir poco al mantenimiento del recurso) para beneficio individual y a expensas de la sostenibilidad a nivel grupal, un resultado conocido como la Tragedia de los Comunes. Los dilemas de los CPR son omnipresentes en los contextos humanos, desde mitigar el cambio climático hasta compartir espacios públicos, luchar contra una pandemia o abordar la resistencia a los antimicrobianos. Dado que los dilemas de los CPR también se encuentran en el mundo viviente no humano, los/las científicos/as de la sostenibilidad, los/las economistas y los/las biólogos/as evolutivos/as están interesados en la dinámica de la competencia y la cooperación en torno a los recursos. En este capítulo, argumentamos que la comprensión conceptual de los estudiantes de los dilemas de los CPR a través de la exploración y la reflexión crítica sobre ejemplos humanos y no humanos es fundamental para desarrollar una comprensión básica de los problemas de sostenibilidad en general, así como de la dinámica evolutiva que puede ayudar a explicar la evolución de los comportamientos sociales cooperativos y los mecanismos de resolución de conflictos. Proporcionamos una descripción general de la ciencia de los dilemas de los CPR en la evolución de los sistemas vivos y los contextos de recursos naturales humanos. Además, presentamos un conjunto flexible de recursos que los/las educadores/as de biología o ciencias ambientales de la escuela secundaria pueden emplear para ayudar a los estudiantes a participar en conceptos transversales, ideas científicas de las ciencias de la vida y una gama de prácticas científicas para desarrollar comprensiones y habilidades de razonamiento sociocientífico en torno a problemas del mundo real relacionados con el uso sostenible de recursos.

### PALABRAS CLAVE

*Desarrollo sostenible, comportamiento, cooperación, recursos de propiedad común*

# 1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA SOCIOCIENTÍFICO

## 1.1 La Tragedia de los Comunes: un modelo central en ciencia de la sostenibilidad

En un artículo de 1968, el ecologista Garret Hardin popularizó el modelo de la Tragedia de los Comunes (TdC; Hardin, 1968). Utilizando el ejemplo de un pasto común en una aldea, teorizó que, el interés propio de los pastores individuales de maximizar sus propias ganancias a partir del pasto compartido, mediante el aumento del tamaño de su rebaño, conducirá inevitablemente al uso excesivo del pasto compartido.

La TdC se relaciona con un tipo específico de situación social llamada dilema social, que es una situación en la que los individuos se comportan de una manera que los beneficia individualmente en el corto plazo (en términos de aptitud evolutiva, riqueza u otros resultados); sin embargo, en conjunto, este comportamiento produce menores beneficios para todos en el largo plazo.

Muchos problemas sociales, como mitigar y adaptarse al cambio climático, reducir la desigualdad social, usar mascarillas para combatir una pandemia global y el uso responsable de antibióticos para enfrentar la resistencia a los antimicrobianos, pueden conceptualizarse como dilemas sociales, y, por lo tanto, como problemas relacionados con la superación de la Tragedia de los Comunes (TdC). La resolución de todos estos problemas requiere que los individuos cooperen por el bien común, a un costo mayor o menor para su propio beneficio a corto plazo.

Por lo tanto, los desafíos y soluciones a tales problemas de cooperación han sido un área de investigación académica en la ciencia de la sostenibilidad (por ejemplo, Dickinson et al., 2013; Meinzen-Dick et al., 2018; Messner et al., 2013; Waring et al., 2015, 2017).

Hardin (1968) propuso que, dada nuestra naturaleza humana supuestamente egoísta, la única solución a esta tragedia serían la privatización de los recursos o el control

gubernamental de arriba hacia abajo. Sin embargo, en la década de 1990, la politóloga Elinor Ostrom exploró una diversidad de estudios de casos del mundo real sobre recursos de propiedad común (*Common-pool resources*, o CPR, por sus siglas en inglés), como pastos, sistemas de riego y aguas subterráneas, y pesquerías, para comprender si los seres humanos (y en qué condiciones) pueden cooperar y gestionar de forma sostenible sus recursos compartidos (Ostrom, 1990).

En contraposición a Hardin, Ostrom encontró que las comunidades humanas sí pueden cooperar y autoorganizarse para la gestión sostenible de sus recursos compartidos; sin embargo, esto solo tiende a observarse cuando se cumplen ciertas condiciones. A través de este trabajo, derivó su marco para el análisis de sistemas socioecológicos (Ostrom, 2007, 2009; Fig. 1) y sus Principios de Diseño Central (PDC) para la gestión eficaz.

Utilizando su marco, Ostrom (2007) concluyó que el escenario de Hardin sobre la TdC surge sólo bajo ciertos supuestos específicos, incluyendo cuando no existe ningún sistema de gobernanza, cuando los usuarios de recursos no se comunican en absoluto y toman sus decisiones de forma independiente y anónima, y cuando los usuarios se centran principalmente en sus beneficios inmediatos a corto plazo. En realidad, los humanos a menudo se comunican, establecen reglas, basan sus decisiones en lo que hacen los demás y se preocupan por algo más que los beneficios inmediatos a corto plazo para ellos mismos. Diversos métodos y los conocimientos de las ciencias evolutivas y del comportamiento (incluidos experimentos de laboratorio y del mundo real y modelos de simulación basados en el comportamiento de los agentes, o *Agent-based modelling*) han proporcionado más conocimientos

sobre las condiciones y los mecanismos próximos que parecen permitir a los humanos cooperar hacia el bien común.

En este capítulo, sostenemos que estos conocimientos y los conceptos y métodos científicos asociados pueden servir como base para desarrollar la comprensión de las ideas científicas por parte de los estudiantes, así como sus habilidades de razonamiento sociocientífico. Como lo indican los PDC de Ostrom (Tabla 1), las dimensiones éticas, morales y políticas son inherentes al análisis y evaluación de soluciones para la sostenibilidad de los sistemas socioecológicos.

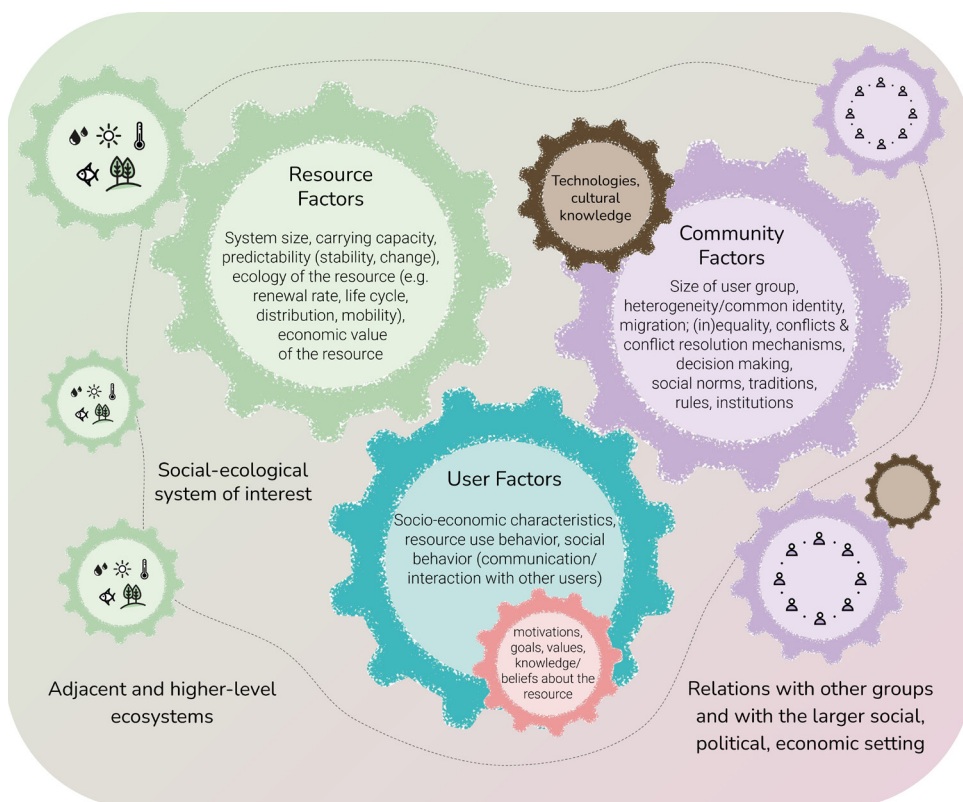
Los PDC resaltan la importancia de la identidad compartida, la justicia, la inclusión y la

autonomía de las partes interesadas en un sistema socioecológico. El papel del conocimiento (tanto científico como local) y la investigación continua en torno a un recurso compartido y su uso también es importante en los marcos de Ostrom.

Además, los PDC son exhaustivos y no prescriben políticas o comportamientos específicos que deban implementarse. Por el contrario, solo ofrecen una orientación general para una comunidad, que necesita negociar, experimentar y probar mecanismos específicos que puedan ser adecuados en su contexto, destacando así los límites de la ciencia —o al menos la necesidad de un enfoque científico aplicado y participativo.

**Figura 1**

Factores en un marco para el análisis de sistemas socioecológicos. Adaptado de Ostrom (2009).



**Tabla 1**

Principios de Diseño Central para la gestión exitosa de recursos de uso común y la cooperación exitosa, con ejemplos análogos en biología (ver Sección 1.2).

Principio de Diseño Central	Descripción	Ejemplos biológicos análogos
<b>1. Límites claramente definidos</b>	Está claro quién pertenece al grupo, y todos los miembros comparten un sentido de objetivos e identidad comunes. Sus destinos están entrelazados.	Piel y membranas celulares; interdependencia del estado físico a través de factores como la proximidad física, bajos niveles de migración, asociación positiva y parentesco genético.
<b>2. Distribución justa de costos y beneficios</b>	Los costos en los que incurrir los miembros por la cooperación se distribuyen en proporción a los beneficios que obtienen de la misma.	Transferencia de recursos basada en la necesidad (por ejemplo, murciélagos vampiros, trofalaxis en insectos sociales, distribución de nutrientes en organismos multicelulares).
<b>3. Toma de decisiones justa e inclusiva</b>	La mayoría de los individuos del grupo pueden participar en las decisiones que les afectan y establecer o cambiar las reglas del juego.	Detección de quórum en bacterias, toma de decisiones sobre sitios de anidación en enjambres de abejas.
<b>4. Transparencia y monitoreando</b>	La comunidad observa y monitorea si todos se comportan de acuerdo con las reglas, el estado del recurso y si se logran los objetivos comunes.	
<b>5. Respuestas graduadas a comportamientos útiles e inútiles</b>	Las recompensas por conductas valoradas y los castigos por malas conductas comienzan en un nivel bajo (p. ej., discusión amistosa) y aumentan en proporción a cuán útil o inútil es la conducta.	Vigilancia en sociedades de insectos; el sistema inmunológico en los cuerpos de los animales.
<b>6. Resolución de conflictos rápida y justa</b>	Existen mecanismos para resolver conflictos entre los miembros de manera rápida (eficiente) y percibida como justa por los involucrados.	
<b>7. Autonomía para autogobernarse</b>	El grupo tiene un mínimo de derechos y la libertad de establecer sus propias reglas sin interferencias	Se vuelve relevante cuando emergen niveles más altos de selección (p. ej., endosimbiosis, organismos multicelulares, simbiosis y transiciones importantes en la evolución).
<b>8. Relaciones de cooperación con otros grupos</b>	El grupo tiene relaciones de colaboración (según los PDC 1 a 7) con otros grupos y en todas las escalas de organización social.	

Fuentes: Aktipis (2016); Aktipis et al. (2018); Ostrom (1990); Rankin et al. (2007); Ratnieks y Wenseleers (2005); Seeley (2010); Wilson y cols. (2013).

## 1.2 La tragedia de los comunes en la biología evolutiva

La TdC y otros dilemas sociales no solo presentan un desafío para nuestra especie, sino para toda la vida. En su artículo “La tragedia de los comunes en la biología evolutiva”, Rankin et al. (2007) ofrecen un resumen de diversos contextos en los que los especialistas en biología evolutiva han aplicado la TdC para analizar cómo las interacciones sociales influyen en la evolución de los rasgos, desde el conflicto intragenómico hasta las relaciones virus-huésped (por ejemplo, Kerr et al., 2006), las comunidades microbianas (por ejemplo, MacLean y Gudelj, 2006), la competencia de las plantas por la luz y el agua (Zea-Cabrera et al., 2006), hasta el conflicto sexual (por ejemplo, Rankin et al., 2011).

Similar a las primeras opiniones de Hardin sobre la inevitabilidad de la TdC en el dominio humano, los/las biólogos/as evolutivos/as desde Darwin han estado reflexionando sobre cómo y bajo qué condiciones podría evolucionar la cooperación en torno a los recursos compartidos. Si partimos de la premisa de que la competencia entre individuos en una población es un motor central de los procesos evolutivos, que las diferencias de aptitud a nivel individual son lo que importa para la selección y que el comportamiento cooperativo implica costes de aptitud, ¿cómo puede evolucionar el comportamiento cooperativo en una población?

Sin embargo, Darwin (1871) ya ofreció explicaciones sobre cómo esto podría ser posible al considerar una población que está estructurada en múltiples subgrupos con diversas composiciones de rasgos dentro de los grupos. Desde entonces, los/las biólogos/as evolutivos/as han desarrollado formalmente y estudiado empíricamente una variedad de mecanismos y conceptos relacionados con la evolución de los grupos cooperativos. Por lo tanto, en el estudio de la evolución de la cooperación y la competencia en torno a los recursos compartidos, es importante buscar condiciones y mecanismos que puedan prevenir el comportamiento individual egoísta y la consiguiente TdC (similar a lo que Ostrom ha hecho para el dominio humano).

Cabe destacar que Rankin et al. (2007) resaltaron lo siguiente: “Una de las principales

ventajas de usar la Tragedia de los Comunes como analogía en la biología evolutiva es que nos obliga a preguntarnos por qué no se observa una tragedia de los comunes en un escenario particular” (p. 648).

Algunos de los mecanismos que se pueden encontrar en el mundo biológico incluyen la interdependencia de la aptitud (por ejemplo, la selección de parentesco), la distribución de recursos basada en las necesidades y eficiente entre los miembros del grupo (por ejemplo, entre los murciélagos vampiro), los mecanismos de monitoreo y sanción (por ejemplo, en los insectos sociales) y los mecanismos de toma de decisiones colectivas distribuidas, como en los enjambres de abejas melíferas (Aktipis, 2016; Aktipis et al., 2018; Ratnieks & Wenseleers, 2005; Sachs et al., 2004; Seeley, 2010). De manera más generalizada, estos se pueden relacionar con algunos de los Principios de Diseño Central de Ostrom (Tabla 1).

Rankin et al. (2007, p. 649) resumieron cómo estas concepciones evolutivas de la TdC en todo el mundo vivo pueden relacionarse con las cuestiones sociocientíficas (CSC, o SSIs por sus siglas en inglés) del uso sostenible de recursos: “A la luz de las crecientes preocupaciones ambientales, pensar en la Tragedia de los Comunes en la biología evolutiva es de interés no solo por estas implicaciones evolutivas, sino también por la analogía aplicada a las sociedades humanas que enfrentan problemas ambientales y de otros bienes públicos.”

Hoy en día, la ecología y la evolución del comportamiento grupal y la cooperación son a menudo temas en los estándares curriculares (por ejemplo, dentro de las ideas centrales disciplinarias de Ciencias de la Vida en los *Next Generation Science Standards* de los Estados Unidos; NGSS Lead States, 2013). Proponemos que explorar contextos a lo largo de la biología en los que la evolución ha favorecido los rasgos cooperativos en torno a los recursos compartidos puede servir como lecciones fructíferas para ayudar a los estudiantes a obtener una comprensión más profunda de las condiciones y los mecanismos que fomentan la cooperación y el uso sostenible de los recursos mientras se

transfieren críticamente estos a una variedad de CSC. Los docentes que ya han involucrado a los estudiantes en el concepto de biomimetismo pueden ver nuevas oportunidades para desarrollar una comprensión de principios más profundos de los sistemas vivos a través de perspectivas comparativas.

### 1.3 Entendiendo la evolución cultural de conductas, normas e instituciones en los dilemas CPR

En general, el campo de la ciencia de la evolución cultural propone que los rasgos culturales, incluidas las tecnologías, las normas, las tradiciones, las reglas, las creencias y el conocimiento, pueden evolucionar mediante procesos evolutivos como la variación, la selección (multinivel) y la transmisión (Mesoudi, 2011). Los especialistas en evolución cultural a menudo utilizan métodos prestados de la biología evolutiva para estudiar la evolución de fenómenos culturales, como la genética de poblaciones, las simulaciones por computadora basadas en agentes y los análisis filogenéticos.

De manera similar, algunos/as científicos/as de la sostenibilidad aplican dichos métodos y conceptos a la aparición y propagación de comportamientos e instituciones humanas para comprender cómo se logra –o se erosiona– la gestión exitosa de los recursos de propiedad común (CPR, por sus siglas en inglés) en los sistemas socioecológicos (por ejemplo, Ghorbani y Bravo, 2016; Ostrom, 2013; Waring et al., 2015).

Si bien esta transferencia de conceptos y métodos evolutivos al dominio de la cultura aún no se ha incorporado en la mayoría de los currículos y estándares de aprendizaje (Hanisch y Eirdosh, 2020b), proponemos que tales exploraciones pueden servir como lecciones valiosas que pueden mejorar tanto la comprensión de los conceptos científicos evolutivos (por ejemplo, Pugh et al.,

2014) como la comprensión y evaluación de las cuestiones sociocientíficas (CSC). Después de todo, las causas y soluciones de las CSC a menudo involucran cambios en las frecuencias de comportamientos y otros rasgos culturales.

En este sentido, explorar el método científico del modelado computacional, que abstrae los fenómenos del mundo real en términos matemáticos y es utilizado tanto por científicos/as de la evolución biológica como cultural, puede ayudar a los estudiantes a comprender la naturaleza de los procesos evolutivos y transferir conceptos evolutivos de manera crítica a través de diferentes dominios.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA SECUENCIA DIDÁCTICA

Sadler et al. (2017) proponen comenzar una unidad sobre Cuestiones Socio-Científicas (CSC) con una introducción a una CSC focal, seguida de un aprendizaje tridimensional que integre conceptos transversales, ideas disciplinares principales, prácticas científicas y razonamiento sociocientífico, para finalizar con la síntesis de ideas y prácticas a través de una actividad culminante.

Sadler et al. (2019) también propusieron un enfoque más flexible en torno a seis características del Aprendizaje Basado en Modelos y Cuestiones Socio-Científicas (SIMBL): 1) explorar los fenómenos científicos subyacentes; 2) participar en el modelado científico; 3) considerar la dinámica del sistema del problema; 4) emplear estrategias de alfabetización mediática e informacional; 5) comparar y contrastar múltiples perspectivas; 6) elucidar la propia posición/solución con flexibilidad en cuanto al orden y la duración de cualquiera de estas características.

Como se destaca en la sección 1.1, podemos encontrar los desafíos del uso de los CPR y otros dilemas sociales en muchos contextos diferentes

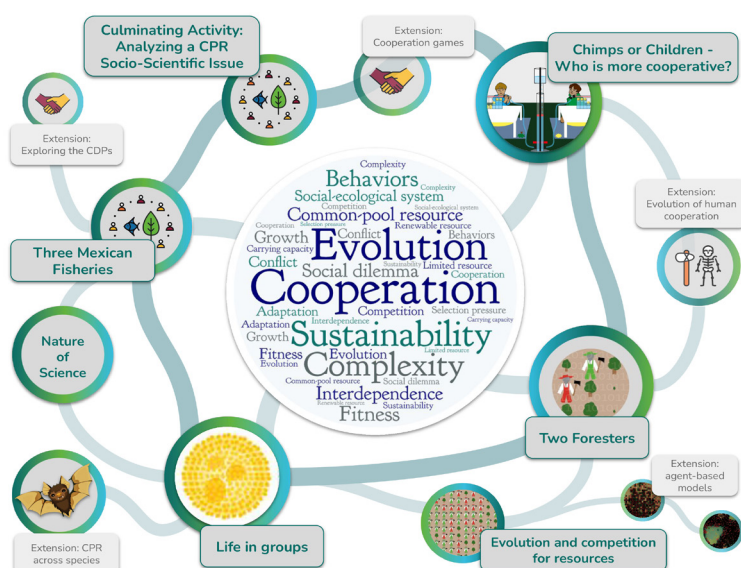
del mundo real y la sostenibilidad.

La CSC (Cuestión Socio-Científica) focal de la unidad propuesta (ver Apéndice) puede incluir uno o varios ejemplos familiares o de interés para el alumnado. Estas CSC podrían ser un recurso natural o social compartido en su área local, una nueva política escolar, comunitaria o nacional que sea costosa para los individuos, pero beneficie a la comunidad, o problemas globales como el cambio climático, la lucha contra una pandemia o la contaminación por plástico. Además, los científicos han explorado la evolución de la cooperación y la sostenibilidad en torno al uso de los CPR a través de diversos métodos, como experimentos, observaciones de casos reales y simulaciones por ordenador. Los estudiantes pueden participar en el modelado científico y las prácticas científicas asociadas explorando una variedad de estos métodos y datos.

Por lo tanto, en línea con Sadler et al. (2019), también proponemos que la selección y secuencia de las lecciones presentadas en este capítulo puedan abordarse con flexibilidad en función del contexto de enseñanza, incluyendo los objetivos del currículo y los conocimientos previos e intereses de los estudiantes. Aunque a continuación se propone una secuencia, todas las

lecciones pueden servir como puntos de partida para que los estudiantes se adentren en los conceptos centrales y los apliquen críticamente a una CSC focal, introduciéndoles al mismo tiempo una variedad de métodos científicos (Fig. 2).

En esta unidad, los estudiantes se centrarán en conceptos transversales (es decir, sistemas y modelos de sistemas; causa y efecto; estabilidad y cambio), ideas disciplinares de los NGSS en Ciencias de la Vida (LS2: Ecosistemas: Interacciones, Energía y Dinámica; LS4: Evolución Biológica: Unidad y Diversidad) y Ciencias de la Tierra y Sistemas (ESS3: Tierra y Actividad Humana), así como en prácticas científicas (por ejemplo, utilizando y construyendo modelos, analizando datos y diseñando soluciones). A través de la exploración de comparaciones entre especies, casos de estudio reales de humanos y no humanos, y simulaciones por ordenador basadas en agentes, los estudiantes pueden desarrollar una comprensión conceptual científicamente adecuada de los desafíos y soluciones a los dilemas de CPR en diversos contextos. Por último, los estudiantes pueden utilizar su comprensión de los conceptos y métodos para analizar una CSC focal y diseñar propuestas para su mejora, practicando así las habilidades de razonamiento sociocientífico.



**Figura 2**  
Descripción general de la unidad con lecciones básicas sugeridas, así como oportunidades para extensiones de lecciones adicionales para reforzar la transferencia y una comprensión más profunda.

Las lecciones también incluyen el uso de un conjunto de herramientas de enseñanza basadas en la ciencia, que ayudan a analizar y visualizar conceptos y relaciones en los sistemas socioecológicos, y a desarrollar el pensamiento sistémico y las habilidades de razonamiento socio-científico. Estas herramientas pueden introducirse dentro de las lecciones o utilizarse de diversas formas con apoyo, dependiendo del tiempo disponible, la edad de los estudiantes y los objetivos de aprendizaje específicos:

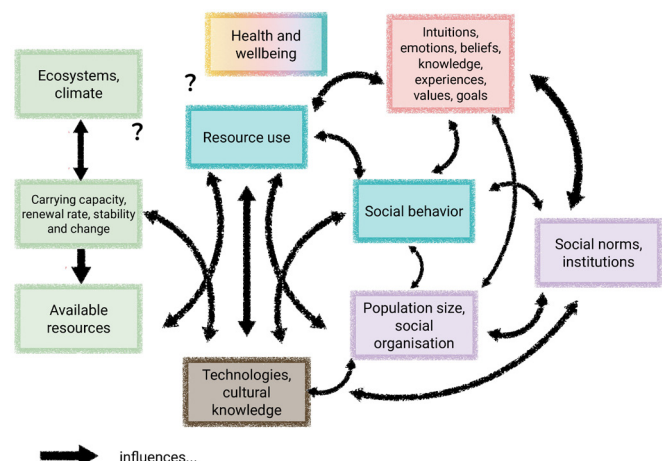
- **Mapas o diagramas causales:**

Estos ayudan a los estudiantes a visualizar las interrelaciones entre factores en los sistemas socioecológicos. La construcción de mapas causales se puede guiar de diversas formas, como completando nodos o relaciones en mapas causales parcialmente completados, construyendo mapas a partir de una lista de elementos dados y finalmente construyendo mapas causales desde cero (Cox et al., 2018; Novak & Cañas, 2006, 2004). También se recomienda el trabajo en grupo y la revisión por pares de mapas causales para profundizar la reflexión y la comprensión (Novak y Cañas, 2006; Schwendimann y Linn, 2016). La figura 3 proporciona un ejemplo de un mapa causal de factores que impactan el desarrollo de un sistema socioecológico (humano) (con algunos elementos transferibles a otras especies). Cabe destacar que en tales mapas causales de sistemas socioecológicos (humanos), la frontera entre un modelo científico y un modelo sociocientífico con dimensiones sociales, éticas y políticas -como se ha conceptualizado en la literatura de CSC (Ke et al., 2021)- se difumina o desaparece debido a la naturaleza interdisciplinaria de este campo de la ciencia.

- **Mapas de analogía:** Estos ayudan a los estudiantes a comparar fenómenos utilizando conceptos y principios generales, y a transferir estos conceptos y principios para analizar nuevos contextos (p. ej., Glynn, 2008).
- **Matriz de beneficios:** Esta es una herramienta utilizada en biología evolutiva, economía y ciencias de la sostenibilidad para comprender el grado en que una situación social presenta un dilema entre los resultados individuales y grupales, y, por lo tanto, el grado en que la selección en diferentes niveles favorece la cooperación o la competencia (Bowles y Gintis, 2011; Diekert, 2012). También se puede utilizar para comprender las motivaciones detrás del comportamiento de las personas, fomentando así la capacidad de adoptar diferentes perspectivas (Powers, 1986).

También se puede encontrar una introducción para el profesorado a los conceptos y herramientas de enseñanza de este capítulo en Hanisch y Eirdosh (2020a).

**Figura 3**  
Ejemplo de mapa causal general de un sistema socioecológico.



## 2.1 Materiales

Aquí presentamos una secuencia detallada de lecciones seleccionadas que pueden ayudar a los estudiantes a comprender y aplicar conceptos en contextos y presentarles una variedad de métodos científicos. Las extensiones sugeridas (consulte la Sección 2.6) también se enumeran aquí.

### Lección 1:

#### **Chimpancés o niños: ¿quién es más cooperativo?**

- Extensión: Evolución de la cooperación humana

### Lección 2:

#### **Simulaciones informáticas basadas en agentes de sistemas socioecológicos.**

- Dos silvicultores
- Evolución y competencia por los recursos forestales
- Ampliación: otros modelos que integran más procesos

### Lección 3:

#### **¿Cómo evoluciona la vida hacia las soluciones a los dilemas de los CPR?**

- Lectura del texto “La vida en grupo”
- Ampliación: Otros estudios de caso biológicos

### Lección 4:

#### **Análisis de estudios de casos reales de CPR**

- Tres pesquerías mexicanas
- Extensión: Otros estudios de caso de CPR

### Lección 5:

#### **Actividad culminante: Analizar una CSC focal y proponer soluciones.**

- Extensión: Explorar e implementar los principios de diseño para la cooperación.

## 2.2 Tiempo

La unidad propuesta tiene una duración mínima de 9 horas. También alentamos a los/las educadores/as a involucrar al alumnado en algunas de las lecciones de extensión propuestas para profundizar su comprensión.

### Lección 1:

**20–45 minutos**

### Lección 2:

**60–120+ minutos**

### Lección 3:

**45–120+ minutos**

### Lección 4:

**90 minutos**

### Lección 5:

**5: 3+ horas**

### Total:

**~9+ horas**

## 2.3 Público objetivo

Esta unidad es más adecuada para participantes de 9° a 12° grado (jóvenes de 15 a 18 años). La mayoría de las lecciones son adecuadas sin que los estudiantes comprendan previamente los conceptos relevantes (incluidos los conceptos evolutivos). Las lecciones se pueden utilizar para presentar estos conceptos. La unidad contiene lecciones que utilizan simulaciones por computadora basadas en agentes. Para ello, es necesario tener acceso a computadoras o tabletas y los estudiantes deben estar familiarizados con los conceptos básicos del uso de dichos dispositivos. Las simulaciones por computadora también se pueden discutir con toda la clase usando una sola computadora y un proyector o una pizarra inteligente interactiva.

También se pueden omitir las lecciones que utilizan simulaciones por computadora; sin embargo, en este caso, los objetivos de aprendizaje relacionados con las prácticas científicas (Sección 2.4.2) no pueden abordarse de la misma manera. Los estudiantes más jóvenes también pueden participar en lecciones seleccionadas, en particular la Lección 1 y el modelo de “los dos silvicultores”; ya que este último es muy simple (para estudiantes mayores, este modelo podría presentarse en una breve

sesión interactiva, seguida de pasar a modelos más complejos). En la Sección 2.5 y en los documentos de las lecciones individuales, destacamos la idoneidad y adaptaciones específicas para diferentes niveles. Se anima a los diseñadores de planes de estudio y al profesorado de todos los niveles a pensar estratégicamente sobre cómo intercalar las lecciones de forma iterativa a lo largo de los cursos.

## 2.4 Objetivos de aprendizaje

### 2.4.1 **Objetivos de aprendizaje relacionados con el conocimiento de la CSC**

Los estudiantes son capaces de:

- Describir y explicar las condiciones y mecanismos que obstaculizan y fomentan (la evolución de) la cooperación en torno a los CPR.
- Analizar ejemplos de casos de dilemas de CPR en biología evolutiva y ecología humana en busca de dinámicas que induzcan o prevengan la TdC y desarrollen soluciones.

### 2.4.2 **Objetivos de aprendizaje relacionados con la evolución**

Los estudiantes son capaces de:

- Describir el papel de múltiples mecanismos en la evolución de la cooperación y el uso sostenible de los recursos compartidos.
- Evaluar pruebas del papel del comportamiento grupal en la probabilidad de supervivencia y reproducción de individuos y especies.

### 2.4.3 **Objetivos de aprendizaje relacionados con las prácticas científicas**

Los estudiantes son capaces de:

- Utilizar y criticar modelos.
- Analizar e interpretar datos. Construir explicaciones y diseñar soluciones.

### 2.4.4 **Objetivos de aprendizaje relacionados con la Naturaleza de la Ciencia**

Los estudiantes son capaces de:

- Comprender que las investigaciones científicas utilizan una variedad de métodos, herramientas y técnicas para revisar y producir nuevos conocimientos.
- Comprender que muchas decisiones no se toman utilizando únicamente la ciencia, sino que dependen de contextos sociales y culturales para resolver problemas.

### 2.4.5 **Objetivos de aprendizaje relacionados con habilidades transversales**

Los estudiantes son capaces de:

- Participar en el razonamiento sociocientífico (Sadler et al., 2007):
  - (i) Reconocer la complejidad inherente de CSC.
  - (ii) Examinar las cuestiones desde múltiples perspectivas.
  - (iii) Apreciar que las CSC estén sujetas a una investigación continua.
  - (iv) Examinar la información potencialmente sesgada con escepticismo.

## 2.5 Descripción de la práctica educativa

Las lecciones presentadas aquí se han desarrollado basándose en estrategias de enseñanza para la comprensión conceptual y la transferencia del aprendizaje de Stern et al. (2017, 2021). Como tales, se centran en un conjunto central de conceptos y preguntas conceptuales que se revisan en todos los contextos. La comprensión de los estudiantes se evalúa instándolos a reflexionar sobre su comprensión de los conceptos y las preguntas conceptuales, y/o revisar sus modelos causales integrando pruebas de las lecciones.

Las preguntas conceptuales centrales son:

- ¿Qué problemas pueden surgir cuando un grupo de individuos tiene que compartir un recurso común?
- ¿Qué condiciones y comportamientos fomentan y obstaculizan (la evolución de) la cooperación y la sostenibilidad en torno a los recursos compartidos?

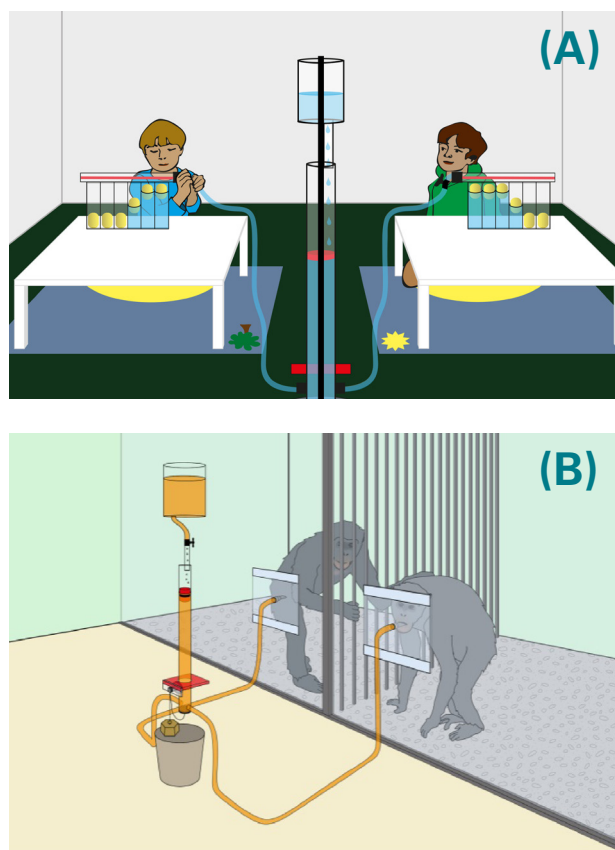
Las siguientes descripciones de lecciones y recomendaciones para su implementación se basan en las experiencias de los/las autores/as en la implementación de lecciones en contextos de educación secundaria y docente.

### 2.5.1 Lección 1: Chimpancés o niños - ¿Quién es mejor para compartir recursos?

Esta lección presenta una serie comparativa de experimentos con chimpancés y niños/as humanos/as (Koomen y Herrmann, 2018a, 2018b; Fig. 4) y pide a los estudiantes que hagan predicciones sobre los resultados. La configuración experimental modela la situación del uso de los CPR. La lección hace aflorar las concepciones de los estudiantes sobre el comportamiento social de los humanos y nuestros parientes primates más cercanos. Por lo tanto, la

lección es adecuada para introducir una serie de conceptos básicos relacionados con la ciencia de la sostenibilidad, la cooperación y la evolución de una manera atractiva. Recomendamos implementar esta lección con estudiantes a partir del 7° grado (12 a 13 años o más).

**Figura 4**  
Configuración experimental de los experimentos con (A) niños/as y (B) chimpancés. Fuentes de imágenes: Koomen y Herrmann (2018a, 2018b).



A los estudiantes se les presenta la configuración experimental con la ayuda de una presentación corta, un texto o un video. Luego, se les pide que predigan cuál de las dos especies (niños/as humanos o chimpancés) tendrá más éxito en cooperar y mantener un recurso compartido.

Los estudiantes pueden tener la oportunidad de hacer preguntas aclaratorias sobre el experimento antes de pensar en su predicción. Las preguntas comunes se refieren a la edad de los chimpancés, si los chimpancés o los/as niños/as se conocían, si las parejas eran del mismo sexo y si los/as niños/as pueden comunicarse. En nuestra experiencia (Hanisch y Eirdosh, 2021), muchos estudiantes y profesores tienden a predecir que los chimpancés serían más cooperativos que los/as niños/as en este experimento, dando razones como “los chimpancés necesitan vivir en armonía con la naturaleza”, “los chimpancés viven en grupos y dependen unos de otros” o “necesitan compartir recursos en su grupo”, mientras que los niños/as “son codiciosos y egoístas” o “no entienden la situación”. Esto puede resaltar posibles concepciones alternativas de los estudiantes (y educadores) sobre las causas de los problemas de sostenibilidad humana.

De hecho, los humanos son una especie mucho más cooperativa en comparación con los chimpancés y otros primates. Además, pueden coordinarse, comunicarse y compartir recursos con mucha más facilidad y equidad dentro de su grupo que los chimpancés. Por lo tanto, los desafíos modernos de la sostenibilidad en nuestro mundo globalizado pueden conceptualizarse como desafíos de adaptación (cultural), que implica idear y probar nuevos mecanismos y tecnologías para garantizar el uso sostenible de los recursos compartidos.

Las explicaciones de las predicciones del alumnado también suelen contener una serie de causas que son exploradas por la biología del comportamiento, incluyendo las causas y funciones evolutivas, de desarrollo y próximas de los rasgos (Tinbergen, 1963). Por lo tanto, la lección puede servir como introducción a la exploración de las causas de los rasgos (conductuales) de los organismos.

Después de la presentación mínima del experimento y la discusión de los resultados (aproximadamente 20-30 minutos), la lección se puede extender para explorar cómo los experimentos modelan situaciones del mundo real sobre el uso compartido de recursos (por ejemplo, utilizando mapas de analogía) y cómo ciertas

condiciones podrían facilitar u obstaculizar la cooperación en tales situaciones. Por ejemplo, los casos del mundo real incluidos en los materiales de la lección incluyen la reducción del Mar de Aral y la deforestación de la selva amazónica; sin embargo, se puede utilizar cualquier tema focal que involucre el uso (in)sostenible de recursos compartidos.

Los estudiantes pueden comenzar a crear un mapa causal de la situación de CPR integrando factores del recurso y el comportamiento de los usuarios del recurso. En una unidad sobre la evolución humana, la lección puede servir como una discusión inicial sobre las causas evolutivas de nuestro comportamiento social humano, así como nuestras similitudes y diferencias con los chimpancés.

El plan de la lección enumera una variedad de materiales posibles y formas de impulsar una mayor reflexión en torno a este experimento.

Al final de esta lección, los estudiantes podrían reflexionar sobre la pregunta “¿Qué condiciones y comportamientos permiten a los humanos cooperar y compartir recursos de manera sostenible?” y explicar sus respuestas integrando pruebas y conocimientos de la lección o proporcionando un ejemplo del mundo real.

### **2.5.2 Lección 2: Modelos de sistemas socioecológicos basados en agentes**

En la ciencia (por ejemplo, Aktipis et al., 2011; Ghorbani y Bravo, 2016; Waring et al., 2017) y la educación (por ejemplo, Dickes et al., 2016; Wilensky y Reisman, 2006), hemos desarrollado una variedad de modelos de sistemas socioecológicos para ayudar a los estudiantes a comprender los mecanismos que influyen en la evolución de la cooperación en torno al uso de los recursos de propiedad común (CPR, por sus siglas en inglés).

Un modelo simple basado en agentes, conceptualmente similar a la lección anterior y que permite la transferencia y mayor abstracción de la dinámica del uso de los CPR, es el modelo

de “Los dos silvicultores”. Este es un modelo de un sistema socioecológico simple que consta de solo dos individuos y un recurso renovable (árboles). A través de este modelo, los estudiantes pueden observar cómo factores como la cantidad cosechada, la tasa de regeneración del recurso y la capacidad de carga (es decir, la altura máxima del árbol), y si el recurso es un recurso de uso común o privado, influyen en resultados como la cosecha acumulada por cada forestal y el estado del bosque.

Los estudiantes pueden crear un mapa causal de los factores y relaciones representados en el modelo (o modificar mapas causales creados previamente), evaluar críticamente el modelo comparándolo con el mundo real con la ayuda de una tabla de analogía y hacer predicciones sobre cómo los rasgos humanos y otros factores podrían cambiar estos resultados en el mundo real.

El material de la lección contiene una guía de discusión para introducir el modelo y la plataforma NetLogo a los estudiantes. En los grados inferiores (de 5° a 8°; de 11 a 14 años), los estudiantes pueden usar el modelo para ejecutar y documentar experimentos y reflexionar sobre los resultados individualmente o en grupos con la ayuda de hojas de trabajo. En los grados superiores (de 9° a 12°; de 15 a 18 años), el modelo podría usarse para introducir conceptos básicos y el uso de la plataforma NetLogo, después de lo cual los estudiantes pueden pasar a explorar modelos más avanzados individualmente o en grupos.

Para dar seguimiento al modelo de “Los dos silvicultores”, los estudiantes pueden explorar el modelo “Evolución y competencia por los recursos forestales” (Fig. 5). Este modelo también simula una población de silvicultores que cosechan árboles. Introduce dinámicas adicionales del mundo real, incluidos procesos evolutivos de variación aleatoria, reproducción, herencia, selección y relaciones depredador-presa.

Debido a la incorporación de la dinámica evolutiva, los estudiantes observan que, dadas las condiciones y procesos representados en el modelo, la competencia por los recursos conduce

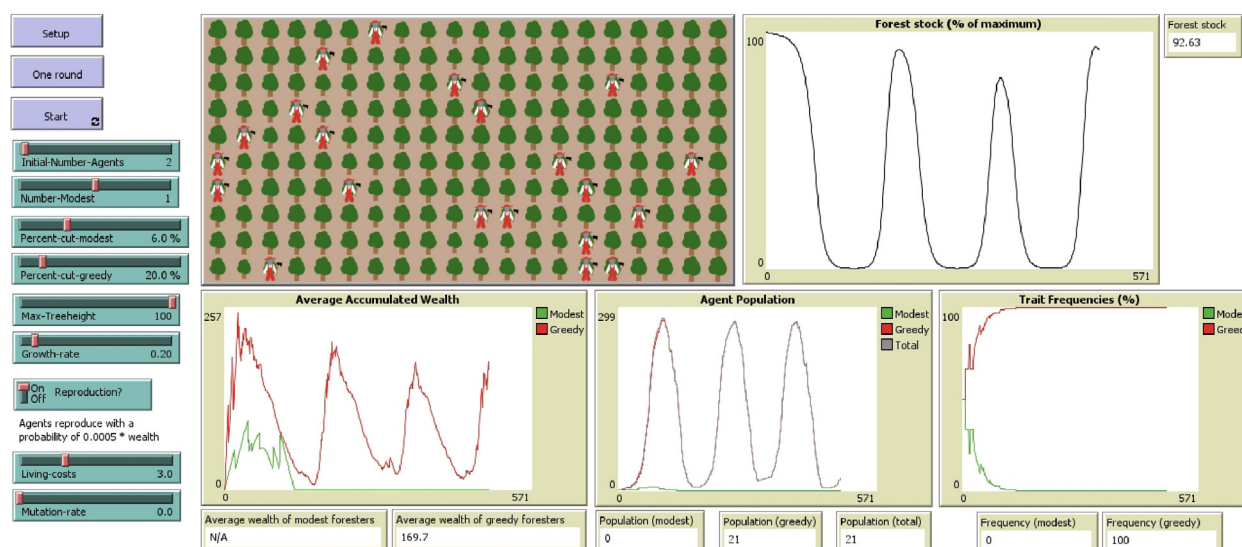
al agotamiento del recurso y la extinción de la población forestal (es decir, la TdC) o ciclos de auge y caída de la disminución y el crecimiento de la población (es decir, “tragedias de componentes” según Rankin et al., 2007 y dinámicas depredador-presa).

Con la ayuda de hojas de trabajo, los estudiantes realizan experimentos, hacen predicciones y describen y explican los resultados observados. Se puede utilizar una matriz de pagos para documentar los resultados bajo diferentes configuraciones de parámetros y desarrollar una comprensión de los dilemas sociales.

Una vez más, los estudiantes pueden crear o extender sus mapas causales del sistema socioecológico modelado, evaluar críticamente el modelo comparándolo con el mundo real con la ayuda de una tabla de analogía y pensar en otros factores que podrían ayudar a estabilizar o sostener las poblaciones de silvicultores y árboles en este sistema socioecológico. Los recursos ampliados presentados en la Sección 2.6 proponen modelos adicionales que integran mecanismos que pueden prevenir la TdC.

**Figura 5**

Interfaz de usuario del modelo 'Evolución y competencia por los recursos forestales'.



### 2.5.3 Lección 3: Comprender la evolución de la cooperación en torno a recursos compartido

Las lecciones anteriores establecen el desafío básico de la cooperación en torno a recursos limitados compartidos y plantean la pregunta de cómo evoluciona la cooperación a lo largo de la vida (incluidos los humanos). Esta lección introduce la evolución de la cooperación a través de ejemplos de vida con la ayuda de un texto de lectura.

Después de algunas reflexiones sobre los posibles desafíos de la vida en grupo, el texto introduce ejemplos de organismos multicelulares y abejas melíferas como contextos para explorar algunos de los mecanismos que han evolucionado para permitir la cooperación.

La lección se puede ampliar opcionalmente mediante un texto de lectura adicional (que se encuentra en el material de la lección) que explora la evolución de la cooperación en la historia evolutiva humana al observar la organización social de los grupos de cazadores-recolectores.

También se pueden explorar otros ejemplos de la evolución de la cooperación en biología (consulte la sección 2.6). En general, esta lección refuerza la noción de que deben existir ciertos comportamientos y mecanismos para permitir la cooperación a largo plazo y la sostenibilidad. Estos incluyen la distribución de recursos a donde se necesitan, así como mecanismos de monitoreo y sanción para evitar que individuos egoístas o dañinos obtengan beneficios de aptitud (Tabla 1).

### 2.5.4 Lección 4: Análisis de estudios de caso sobre el uso de CPR

Esta lección aplica los conocimientos previos a un ejemplo de una CSC del mundo real e integra otro conjunto de métodos científicos para el estudio de los sistemas socioecológicos; a saber, el análisis de estudios de caso del mundo real para comprender las condiciones que tienden a favorecer la cooperación y el uso sostenible de los recursos.

La lección "Tres pesquerías mexicanas" se desarrolló basada en la investigación de Basurto y

Ostrom (2009), quienes investigaron y compararon tres pueblos pesqueros en el Golfo de California utilizando el marco presentado en la Figura 1.

En esta lección, los estudiantes primero exploran los hallazgos sobre la ecología de una especie marina y derivan recomendaciones de manejo para la extracción sostenible de esta especie. Luego, exploran las dimensiones históricas, sociales, económicas y políticas de cada pueblo a través de la lectura de textos y utilizan una tabla de analogía, que integra los factores de la Figura 1, para comparar los pueblos e identificar los factores que permitieron o dificultaron que los pueblos utilizaran sus recursos de manera sostenible.

Para prepararse para la actividad final y practicar la transferencia, la lección podría terminar con una transferencia crítica de la herramienta de análisis a un caso diferente del mundo real. Los materiales de la lección incluyen el cambio climático como un tema a analizar.

### 2.5.5 **Lección 5: Aplicar los conocimientos a una CSC focal**

La unidad finaliza con una actividad de proyecto culminante en la que los estudiantes utilizan su comprensión de la complejidad de los sistemas socioecológicos y el marco de análisis para analizar una CSC central de la unidad. Para esta actividad, la clase se puede dividir en grupos separados de especialistas.

El material de la lección contiene una hoja de trabajo para guiar al alumnado a través de la actividad. Los materiales sobre la CSC pueden ser proporcionados por el docente o los estudiantes pueden buscar información en los medios (practicando así sus habilidades de alfabetización mediática como parte del razonamiento sociocientífico). Luego, los grupos de especialistas se reúnen para integrar sus hallazgos en un mapa causal. Finalmente, la clase decide recomendaciones sobre la sostenibilidad del sistema socioecológico. Por ejemplo, esto

puede incluir recomendaciones para mejorar la base de conocimientos a través de la investigación adicional de ciertos factores, recomendaciones para ciertas políticas y prácticas que se dirigen a los Principios de Diseño Central (PDC), o para el uso o desuso de ciertas tecnologías.

Finalmente, los estudiantes desarrollan una forma de comunicar los resultados de su análisis a las partes interesadas, teniendo en cuenta las motivaciones, objetivos, valores, costos y beneficios para los grupos de interés y comunicándose de una manera que sean comprendidos y se dirija a sus objetivos y valores.

## 2.6 Más perspectivas sobre cómo utilizar la actividad en otros contextos o con participantes de otras edades

Como se indica en la Fig. 1, la secuencia de lecciones presentada aquí se puede ampliar de numerosas maneras. Aquí destacamos algunas de estas posibles lecciones de extensión, que también se pueden encontrar en los materiales vinculados en el Apéndice.

### 2.6.1 **Juegos de cooperación**

Un método experiencial que se puede utilizar para introducir el desafío de la cooperación en el aula son los juegos cooperativos. Un aspecto importante del uso de juegos en el aula es la fase de reflexión. Hemos desarrollado una serie de materiales de lecciones para juegos, que modelan el desafío de cooperación en torno a la sostenibilidad de recursos compartidos, junto con reflexiones sobre los conceptos de la unidad, incluyendo dilemas sociales, cooperación, condiciones que fomentan y

obstaculizan la cooperación, y las funciones de los comportamientos sociales humanos evolucionados.

Por ejemplo, el “juego de caza de la Edad de Piedra” simula uno de los desafíos de cooperación que enfrentaron nuestros antepasados hace 2 millones de años en la sabana africana y puede servir para ayudar al alumnado a comprender los primeros orígenes del comportamiento social humano. Además, el “juego del cambio climático” modela los desafíos de cooperación en torno al cambio climático global. Si bien los juegos se pueden usar en diferentes grupos de edad, las recompensas, el nivel de reflexión y los conceptos introducidos deben adaptarse al contexto.

### 2.6.2 Modelos adicionales basados en agentes

Los modelos basados en agentes pueden introducir cada vez más procesos y, por tanto, representar cada vez más aspectos del mundo real. Sin embargo, también se volverán más complejos en el proceso.

Un conjunto de factores que pueden limitar el grado en que una situación de uso de CPR es propensa a la Tragedia de los Comunes (TdC) incluye el rendimiento decreciente del uso de recursos y el comportamiento competitivo (Foster, 2004; Rankin et al., 2007). Por ejemplo, es posible que muchos organismos no puedan explotar por completo los recursos disponibles debido a los límites de la eficiencia del uso de recursos, de modo que no se produzca el agotamiento. Para trasladar esto al ámbito humano, el problema del uso sostenible de los recursos se hizo más frecuente a lo largo de la historia humana con la llegada de tecnologías cada vez más eficientes para la extracción de recursos. Este aspecto también es evidente en la lección de “Las tres pesquerías mexicanas”.

Este factor se simula en el modelo “Evolución de la tasa de cosecha”, donde los estudiantes no establecen los parámetros de la tasa de cosecha de los agentes, sino la tasa de cosecha en sí. El

modelo no evoluciona por sí mismo. En cambio, el parámetro que establece el usuario es un factor para la fracción de costos de energía que los agentes deben pagar por la recolección. Los estudiantes pueden crear o ampliar sus mapas causales del sistema social-ecológico modelado, evaluar críticamente el modelo comparándolo con el mundo real con la ayuda de una tabla de analogías y pensar en otros factores que podrían ayudar a estabilizar (o mantener) las poblaciones de silvicultores y recursos en este sistema social-ecológico en el que los silvicultores se vuelven cada vez más eficientes en la extracción de recursos.

El modelo “Evolución del comportamiento social” introduce un conjunto de mecanismos que pueden ayudar a resolver la TdC (la monitorización de otros miembros del grupo social y la respuesta a ellos de forma que se limite el comportamiento egoísta o éste no tenga más beneficios de aptitud, o menos beneficios de aptitud en comparación con el comportamiento cooperativo). Esto representa varios de los principios de diseño de Ostrom para una cooperación exitosa (Tabla 1). Cabe destacar que estos mecanismos se pueden encontrar en muchas especies y relaciones simbióticas (como se describe en la sección 1.2 y la lección sobre “La vida en grupo”).

Por último, el modelo “Evolución del uso de recursos mediante la imitación del comportamiento” simula algunas dinámicas evolutivas culturales del comportamiento de uso de recursos mediante la modelización de una serie de sesgos de imitación observados en los humanos (Mesoudi, 2016). Esto permite a los estudiantes reflexionar sobre las similitudes y diferencias entre las dinámicas evolutivas biológicas y culturales, y sobre el papel que podrían desempeñar los sesgos de imitación como causas y soluciones a los problemas de sostenibilidad social-ecológica (SSE).

Si los objetivos de aprendizaje son la programación informática y el pensamiento computacional, los estudiantes también pueden modificar y crear sus propios modelos (Sengupta et al., 2013).

### **2.6.3 *Análisis de otros estudios de caso de cooperación en biología***

Para transferir aún más condiciones y mecanismos que fomentan la cooperación en torno a recursos compartidos (Tabla 1), los estudiantes pueden explorar más profundamente ejemplos de especies que han desarrollado tales mecanismos. Los recursos ampliados contienen una lección sobre la toma de decisiones en enjambres de abejas basada en Seeley (2010), con una transferencia crítica de principios a la toma de decisiones en grupos humanos.

### **2.6.4 *Evolución de la cooperación humana y el comportamiento social.***

Se puede mejorar la comprensión del papel de los comportamientos sociales humanos en las cuestiones modernas de sostenibilidad explorando su evolución (por ejemplo, dentro de una unidad sobre la evolución humana).

### **2.6.5 *Comprender los principios de diseño para la cooperación y encontrar soluciones a problemas de cooperación del mundo real.***

Las lecciones anteriores introducen una variedad de condiciones y comportamientos que fomentan u obstaculizan la cooperación entre especies y en los seres humanos. Se relacionan implícitamente con los principios de diseño de Ostrom para la cooperación (Tabla 1). Estos principios de diseño se pueden explorar con mayor detalle y utilizarse para analizar y mejorar las dinámicas de cooperación que son relevantes para la vida de los estudiantes, como en un equipo de proyecto estudiantil, su salón de clases o su comunidad escolar. Para esta ampliación se puede utilizar el material didáctico “Explorando los principios de diseño para la cooperación”.

## REFERENCIAS

- Aktipis, C. A. (2016). Principles of cooperation across systems: From human sharing to multicellularity and cancer. *Evolutionary Applications*, 9(1), 17–36.
- Aktipis, C. A., Cronk, L., Alcock, J., Ayers, J. D., Baciú, C., Balliet, D., Boddy, A. M., Curry, O. S., Krems, J. A., Muñoz, A., Sullivan, D., Sznycer, D., Wilkinson, G. S., & Winfrey, P. (2018). Understanding cooperation through fitness interdependence. *Nature Human Behaviour*, 2(7), 429–431.
- Aktipis, C. A., Cronk, L., & de Aguiar, R. (2011). Risk-pooling and herd survival: An agent-based model of a Maasai gift-giving system. *Human Ecology*, 39(2), 131–140.
- Basurto, X., & Ostrom, E. (2009). Beyond the tragedy of the commons. *Economia Delle Fonti Di Energia e Dell'ambiente*, 35–60.
- Bowles, S., & Gintis, H. (2011). *A cooperative species. Human reciprocity and its evolution*. Princeton University Press.
- Cox, M., Steegen, A., & Elen, J. (2018). Using causal diagrams to foster systems thinking in geography education. *International Journal of Designs for Learning*, 9(1), 34–48.
- Darwin, C. (1871). *The descent of man, and selection in relation to sex*. John Murray.
- Dickes, A. C., Sengupta, P., Farris, A. V., & Basu, S. (2016). Development of mechanistic reasoning and multilevel explanations of ecology in third grade using agent-based models. *Science Education*, 100(4), 734–776.
- Dickinson, J. L., Crain, R. L., Reeve, H. K., & Schuldt, J. P. (2013). Can evolutionary design of social networks make it easier to be “green”? *Trends in Ecology and Evolution*, 28(9), 561–569.
- Diekert, F. K. (2012). The tragedy of the commons from a game-theoretic perspective. *Sustainability*, 4(8), 1776–1786.
- Foster, K. R. (2004). Diminishing returns in social evolution: The not-so-tragic commons. *Journal of Evolutionary Biology*, 17(5), 1058–1072.
- Ghorbani, A., & Bravo, G. (2016). Managing the commons: A simple model of the emergence of institutions through collective action. *International Journal of the Commons*, 10(1), 200–219.
- Glynn, S. M. (2008). Making science concepts meaningful to students: Teaching with analogies. In S. Mikelskis-Seifert, U. Ringelband, & M. Brückmann (Eds.), *Four decades of research in science education: From curriculum development to quality improvement* (pp. 113–125). Waxmann.
- Hanisch, S., & Eirdosh, D. (2020a). *A teacher's guide to evolution, behavior, and sustainability science*, (2nd edition).
- Hanisch, S., & Eirdosh, D. (2020b). Educational potential of teaching evolution as an interdisciplinary science. *Evolution: Education and Outreach*, 13(1), 25. h
- Hanisch, S., & Eirdosh, D. (2021). Are humans a cooperative species? Challenges & opportunities for teaching the evolution of human prosociality. *The American Biology Teacher*, 83(6), 356–361.
- Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons. *Science*, 162(3859), 1243–1248.
- Ke, L., Sadler, T. D., Zangori, L., & Friedrichsen, P. J. (2021). Developing and using multiple models to promote scientific literacy in the context of socioscientific issues. *Science and Education*, 30(3), 589–607.
- Kerr, B., Neuhauser, C., Bohannan, B. J. M., & Dean, A. M. (2006). Local migration promotes competitive restraint in a host–pathogen “tragedy of the commons”. *Nature*, 442(7098), 75–78.
- Koomen, R., & Herrmann, E. (2018a). An investigation of children's strategies for overcoming the tragedy of the commons. *Nature Human Behaviour*, 2, 348–355.
- Koomen, R., & Herrmann, E. (2018b). Chimpanzees overcome the tragedy of the commons with dominance. *Scientific Reports*, 8(10389).
- MacLean, R. C., & Gudelj, I. (2006). Resource competition and social conflict in experimental populations of yeast. *Nature*, 441(7092), 498–501.
- Meinzen-Dick, R., Janssen, M. A., Kandikuppa, S., Chaturvedi, R., Rao, K., & Theis, S. (2018). Playing games to save water: Collective action games for groundwater management in Andhra Pradesh, India. *World Development*, 107(July), 40–53.

- Mesoudi, A. (2011). *Cultural evolution: How Darwinian theory can explain human culture and synthesize the social sciences*. University of Chicago Press.
- Mesoudi, A. (2016). Cultural evolution: Integrating psychology, evolution and culture. *Current Opinion in Psychology*, 7(February), 17–22.
- Messner, D., Guarín, A., & Haun, D. B. M. (2013). *The behavioural dimensions of international cooperation*. Global Cooperation Research Papers, 1. Käte Hamburger Kolleg / Centre for Global Cooperation Research.
- NGSS Lead States. (2013). *Next Generation Science Standards: For States, by States*. Washington, DC: National Academies Press.
- Novak, J. D., & Cañas, A. J. (2006). The origins of the concept mapping tool and the continuing evolution of the tool. *Information Visualization*, 5(3), 175–184.
- Novak, J. D., & Cañas, A. J. (2004). Building on new constructivist ideas & CmapTools to create a new model for education. In A. J. Cañas, J. D. Novak, & F. M. González (Eds.), *Concept maps: Theory, methodology, technology. Proceedings of the First International Conference on Concept Mapping. Vol. 1* (pp. 469–476).
- Ostrom, E. (1990). *Governing the commons. The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press.
- Ostrom, E. (2007). A diagnostic approach for going beyond panaceas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(39), 15181–15187.
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419–422.
- Ostrom, E. (2013). Do institutions for collective action evolve? *Journal of Bioeconomics*, 16(1), 3–30.
- Powers, R. B. (1986). The commons game: Teaching students about social dilemmas. *Journal of Environmental Education*, 17(2), 4–10.
- Pugh, K. J., Koskey, K. L. K., & Linnenbrink-Garcia, L. (2014). High school biology students' transfer of the concept of natural selection: A mixed-methods approach. *Journal of Biological Education*, 48(1), 23–33.
- Rankin, D. J., Bargum, K., & Kokko, H. (2007). The tragedy of the commons in evolutionary biology. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(12), 643–651.
- Rankin, D. J., Dieckmann, U., & Kokko, H. (2011). Sexual conflict and the tragedy of the commons. *The American Naturalist*, 177(6), 780–791.
- Ratnieks, F. L. W., & Wenseleers, T. (2005). Policing insect societies. *Science*, 307(5706), 54–56.
- Sachs, J. L., Mueller, U. G., Wilcox, T. P., & Bull, J. J. (2004). The evolution of cooperation. *The Quarterly Review of Biology*, 79(2), 135–160.
- Sadler, T. D., Barab, S. A., & Scott, B. (2007). What do students gain by engaging in socioscientific inquiry? *Research in Science Education*, 37(4), 371–391.
- Sadler, T. D., Foulk, J. A., & Friedrichsen, P. J. (2017). Evolution of a model for socioscientific issue teaching and learning. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 5(2), 75–87.
- Sadler, T. D., Friedrichsen, P., & Zangori, L. (2019). A framework for teaching for socioscientific issues and model based learning (SIMBL). *Revista Educação e Fronteiras On-Line*, 9(25), 8–26.
- Schwendimann, B. A., & Linn, M. C. (2016). Comparing two forms of concept map critique activities to facilitate knowledge integration processes in evolution education. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(1), 70–94.
- Seeley, T. D. (2010). *Honeybee democracy*. Princeton University Press.
- Sengupta, P., Kinnebrew, J. S., Basu, S., Biswas, G., & Clark, D. (2013). Integrating computational thinking with K-12 science education using agent-based computation: A theoretical framework. *Education and Information Technologies*, 18(2), 351–380.
- Stern, J., Ferraro, K., Duncan, K., & Aleo, T. (2021). *Learning that transfers: Designing curriculum for a changing world*. Corwin.
- Stern, J., Ferraro, K., & Mohnkern, J. (2017). *Tools for teaching conceptual understanding, secondary. Designing lessons and assessments for deep learning*. Corwin.
- Tinbergen, N. (1963). On aims and methods of ethology. *Zeitschrift Für Tierpsychologie*, 20(4), 410–433.

Waring, T. M., Goff, S. H., & Smaldino, P. E. (2017). The coevolution of economic institutions and sustainable consumption via cultural group selection. *Ecological Economics*, 131(January), 524–532.

Waring, T. M., Kline, M. A., Brooks, J. S., Goff, S. H., Gowdy, J., Janssen, M. A., Smaldino, P. E., & Jacquet, J. (2015). A multilevel evolutionary framework for sustainability analysis. *Ecology and Society*, 20(2), 34.

Wilensky, U. (1999). *NetLogo*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University.

Wilensky, U., & Reisman, K. (2006). Thinking like a wolf, a sheep, or a firefly: Learning biology through constructing and testing computational theories - An embodied modeling approach. *Cognition and Instruction*, 24(2), 37–41.

Wilson, D. S., Ostrom, E., & Cox, M. E. (2013). Generalizing the core design principles for the efficacy of groups. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 90(Suppl.), S21–S32.

Zea-Cabrera, E., Iwasa, Y., Levin, S., & Rodríguez-Iturbe, I. (2006). Tragedy of the commons in plant water use. *Water Resources Research*, 42(Suppl.), 1–12.

## 4. APÉNDICE

Se puede acceder gratuitamente al material de todas las lecciones a través del siguiente enlace:

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Alejandro Sanchez-Amaro por sus valiosos comentarios sobre este manuscrito.



## Capítulo 9

# Considerando la evolución como una cuestión sociocientífica: una actividad para la educación superior



# Considerando la evolución como una cuestión sociocientífica: una actividad para la educación superior

Ümran Betül Cebesoy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Usak University, Faculty of Education  
Department of Mathematics and  
Science Education

## Resumen:

Esta actividad busca fomentar la comprensión de los participantes sobre la selección natural (que es un mecanismo principal de la evolución), dentro del contexto de resistencia a los antibióticos. La actividad comienza enunciando las preguntas para explorar las ideas previas de los participantes sobre evolución y selección natural. Posteriormente, se crea un escenario para descubrir las ideas de los participantes sobre la resistencia a los antibióticos a través de una serie de preguntas, seguidas de un debate en el aula. El docente explica los tres mecanismos de la selección natural y el papel que ésta juega en la resistencia a los antibióticos. En la última sesión, el docente desafía las ideas iniciales de los participantes utilizando un debate con todo el grupo aula. Se busca que los participantes, al final de la actividad, comprendan que la selección natural es uno de los mecanismos de la evolución. Además de comprender los conceptos de la selección natural, y las conexiones entre ellos, se espera que los participantes desarrollen sus habilidades para la toma de decisiones, al tiempo que reconocen y respetan los distintos puntos de vista. También, deberán aprender a elaborar argumentos, justificaciones para sus argumentos y contraargumentos (es decir, argumentos opuestos que incluyan perspectivas diferentes) para sus justificaciones. Esta actividad ha sido diseñada para estudiantes de Bachillerato y del último año de Educación Secundaria (de 15 a 17 años), y para estudiantes universitarios. Tal y como se explica al final de la actividad, ésta puede usarse tanto para determinar el conocimiento previo y las concepciones alternativas de los participantes sobre los conceptos de selección natural y evolución, como usarse con fines de evaluación, por ejemplo, para determinar la calidad de los argumentos contruidos por los estudiantes y su consideración de las diferentes perspectivas, es decir, los contraargumentos.

### **PALABRAS CLAVE**

*Resistencia a los antibióticos, argumentación, educación superior, selección natural*

# 1. INTRODUCCIÓN A LAS CUESTIONES SOCIOCIENTÍFICAS

Las cuestiones sociocientíficas (CSC) son un tema interdisciplinar que incluye aspectos no científicos (Fensham, 2012). La mejor forma de definirlas es como cuestiones sociales que están directamente conectadas con la ciencia. Sin embargo, son cuestiones escasamente estructuradas y de naturaleza controvertida; incluyen dilemas éticos y morales, por lo que el razonamiento científico es insuficiente para abordarlas debido a su naturaleza compleja y ambigua (Sadler, 2011).

Además, cuando se toman decisiones, requieren de múltiples perspectivas, incluidos puntos de vista éticos, morales, políticos y económicos (Fowler y Zeidler, 2016; Sadler y Zeidler, 2005; Zeidler y Sadler, 2008, 2011).

Tomar decisiones informadas en relación a las CSC precisa de la negociación de los estudiantes con sus propias decisiones (Fowler y Zeidler, 2016). Mientras discuten y resuelven las complejas CSCs, con frecuencia los estudiantes emplean razonamientos informales para considerar las causas de las diferentes proposiciones y los efectos de las distintas elecciones, lo que, finalmente, deriva en la toma de decisiones informadas (Zohar y Nemet, 2002). Los ejemplos de CSCs tratan una gran variedad de temas, como cambio climático, ingeniería genética, aborto y evolución (Cebesoy y Chang Rundgren, 2021; Fowler y Zeidler, 2016; Sadler y Zeidler, 2004, 2005).

Las CSCs representan una sólida herramienta pedagógica que puede utilizarse para que los estudiantes mejoren sus habilidades de argumentación (Garrecht et al., 2021; Guilfoyle y Erduran, 2021), de toma de decisiones (Cebesoy y Chang Rundgren, 2021; Eggert y Bögeholz, 2009; Fowler y Zeidler, 2010), de juicio reflexivo (Karı an et al., 2018; Zeidler et al., 2009), así como su razonamiento informal (Sadler, 2005) y moral (Lee et al., 2012), su comprensión de la naturaleza de la ciencia (Abd-El-Khalick, 2003) y la calidad de sus habilidades de argumentación (Kolstø, 2006; Zohar y Nemet, 2002).

## 1.1 Cuestiones sociocientíficas y evolución

Se consideran las CSCs como una vía importante para mejorar la alfabetización científica de los estudiantes a través de los currículos escolares (Chen y Xiao, 2021; Fowler y Zeidler, 2016; Zeidler et al., 2019; Zeidler y Sadler, 2008). En términos de conocimiento de contenidos relacionados con la biología, un individuo con estos conocimientos debe tener una comprensión de los principios y procesos biológicos que dan sentido a las situaciones de la vida diaria. En este sentido, la teoría de la evolución puede considerarse uno de los temas más relevantes de la biología (Fowler y Zeidler, 2010, 2016; Sadler, 2005). Según Hermann (2013), la teoría de la evolución proporciona '*la mejor explicación de la diversidad e interrelación de las especies en la Tierra*' (p. 598).

El término "evolución" ha sido usado durante mucho tiempo en astronomía, geología, antropología, biología y otras disciplinas científicas, para describir muchos tipos de cambios acumulativos a lo largo del tiempo. Sin embargo, el tema de este capítulo es la evolución biológica referida a los cambios en los seres vivos a lo largo de la extensa historia de la vida en la Tierra (National Academy of Sciences, 1998).

## 1.2 Considerando la evolución como una cuestión sociocientífica

La evolución puede describirse como "el cambio biológico en las poblaciones de organismos a lo largo del tiempo y se explica por la teoría científica de la selección natural" (Fowler y Zeidler, 2010, p. 2). El tema de la evolución incluye los conceptos de adaptación, reproducción,

variación genética, secuencias de ADN y proteínas, ancestro común, fósiles y diversidad de plantas y/o animales (Fowler y Zeidler, 2016, p.4).

De entre estos conceptos, la presente actividad educativa se centra en el concepto de la selección natural. El cambio biológico de las poblaciones a lo largo del tiempo se explica por la selección natural, y es uno de los mecanismos fundamentales del cambio evolutivo (Fowler y Sadler, 2016; Gregory, 2009). Puede resultar difícil comprender por qué los seres vivos son tan diversos sin comprender profundamente la selección natural (Gregory, 2009). Por esta razón, el objetivo principal de esta actividad es mejorar la comprensión de la selección natural y cómo facilita la diversidad en los seres vivos.

Fowler y Zeidler (2010) argumentaron que la evolución en sí misma no es una CSC, porque carece de las características básicas, como estar escasamente estructurada o ser un tema controvertido. Dado que la evolución es universalmente aceptada por la comunidad científica, no es estrictamente una CSC. Pero estos autores han insistido en que se trata de una deliberación de CSC, cuando se superponen CSC y evolución. En apoyo de esta afirmación, hay estudios que muestran que la comprensión sobre la evolución de los estudiantes universitarios ha tenido un efecto significativo en sus decisiones al tratar con CSCs (Sadler, 2005; Sadler y Zeidler, 2004; 2005). Así que Fowler y Zeidler (2010) han insistido en la necesidad de realizar investigaciones adicionales sobre la conexión entre conocimiento y aceptación de la evolución. También señalaron que las CSCs basadas en la biología serían beneficiosas para la enseñanza de la evolución.

Por el contrario, Hermann (2008) considera la evolución como una CSC, porque cumple con los cuatro criterios para ser un tema controvertido: (1) hay al menos dos grupos opuestos (por ej., evolucionistas vs. creacionistas); (2) hay un debate acalorado entre los partidarios de grupos opuestos; (3) la respuesta al acalorado debate no es evidente para los partidarios de cada lado; (4)

se acepta que existe incertidumbre y desacuerdo entre los partidarios de cada posición.

Respaldando las afirmaciones de Fowler y Zeidler (2010), hay estudios que han revelado que la evolución es uno de los principales factores expuestos durante las negociaciones sobre CSC (Basel et al., 2013; Brehm et al., 2003; Fowler y Zeidler, 2016; Sadler, 2005). Al explorar el razonamiento informal de los estudiantes universitarios en cuestiones de ingeniería genética, Sadler (2005) descubrió que las decisiones de los estudiantes estaban influidas por conceptos evolutivos como diversidad genética y reproducción, que destacaban como componentes básicos de la evolución. Aun así, algunos estudiantes adoptaron en sus decisiones puntos de vista teleológicos (por ej., tener un propósito o principio directivo) o deterministas de la evolución.

En otro estudio Fowler y Zeidler (2016) exploraron cómo la aceptación de la evolución influyó en las decisiones sobre CSC relacionadas con la biología, tanto de los estudiantes universitarios de biología como de otras titulaciones. Descubrieron que la aceptación de la evolución es un factor moderador en cómo el conocimiento científico se vincula a la evolución, cuando es enunciado durante la negociación sobre una CSC. En general, los estudiantes utilizaron conceptos como diversidad de poblaciones, herencia de rasgos, éxito diferencial y cambio a lo largo del tiempo, durante sus discusiones.

Como se desprende de los estudios antes mencionados, la evolución y los conceptos evolutivos pueden ser una consecuencia o un factor de influencia durante las deliberaciones sobre CSC. También podría usarse como un tema de CSC, si se diseña cuidadosamente e incluye los cuatro criterios de Hermann (2008).

Después de exponer la argumentación como una herramienta para abordar la evolución como una CSC, en la siguiente subsección se presentan breves descripciones de los componentes de la argumentación y de cómo podría usarse ésta como contexto.

### 1.3 Argumentación como herramienta para abordar la evolución como CSC

En las últimas décadas la argumentación ha surgido como un campo significativo de la investigación en educación científica (Lin et al., 2014). Se puede definir como el proceso por el que un grupo de personas proponen, sustentan y analizan pruebas (además de su conexión con diferentes teorías) para convencer a la comunidad científica (Kuhn, 1993). Mientras que la afirmación/ argumento se refiere a “la conjetura, conclusión, explicación, declaración descriptiva o respuesta a una pregunta de investigación”, la prueba se refiere a “las razones utilizadas por los científicos, incluidas mediciones, observaciones o, incluso, hallazgos de otros estudios” (Sampson y Gerbino, 2010, p. 428).

Las pruebas se pueden presentar en múltiples formatos: (a) teorías aceptadas; (b) leyes; (c) modelos en ciencia; (d) los resultados de otras investigaciones. Los individuos utilizan estas pruebas para respaldar sus afirmaciones. En particular, estos se usan comúnmente como datos. Existiría un tercer componente, la “fundamentación” en la argumentación científica, es decir, el porqué la prueba debería considerarse como tal y cómo sustenta una afirmación (Sampson y Gerbino, 2010). El respaldo proporciona un apoyo adicional al argumento.

Por último, un calificador identifica los límites de un argumento mediante el uso de palabras como “siempre”, “a veces” o “generalmente”, entre otras (von Aufschnaiter et al., 2008). Dado que la argumentación se usa a menudo en la literatura sobre CSC, (Garrecht et al., 2021; Kolstø, 2006; Zohar y Nemet, 2002), puede resultar una herramienta útil para descubrir las habilidades de razonamiento y toma de decisiones de los estudiantes en las CSCs. Además, la argumentación también se utiliza en el contexto de la evolución (Basel et al., 2013; Guilfoyle y Erduran, 2021).

Por ejemplo, Basel et al. (2013) exploraron las habilidades de argumentación del alumnado en el contexto de la evolución. Descubrieron que los estudiantes tendían a generar una sola afirmación respaldada por una única prueba, incluyendo datos o garantía, mostrando así un bajo nivel de complejidad en sus argumentos. Es bastante escaso el número de estudiantes que utilizan varios tipos de pruebas, calificadores/respaldos o refutaciones (contraargumentos).

En otro estudio, realizado por Guilfoyle y Erduran (2021), se usó la argumentación durante una discusión sobre la evolución frente al creacionismo. Así, la argumentación puede ser una herramienta útil para abordar la evolución en las materias científicas.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA PRÁCTICA

Esta actividad ha sido planificada e implementada en contextos formales, es decir, aulas, etc.

### 2.1 Materiales

Para esta actividad los participantes utilizan tres materiales de lectura, que pueden consultarse en el Apéndice.

- 1.
- 2.
- 3.

## 2.2 Tiempo

El tiempo estimado para completar esta actividad son 6 horas de clase (por ej., 6 x 50 minutos = 5 horas). Si es posible después de las 2 primeras horas de clase (por ej., tras 100 minutos), se puede hacer un descanso, o la actividad podría implantarse en días diferentes (por ej., 2 horas de clase durante 3 días), para mejorar así la comprensión de los estudiantes. También podría desarrollarse en días consecutivos.

## 2.3 Público objetivo

Esta actividad se puede realizar, sin cambiar la estructura original, con estudiantes universitarios (de 18 a 22 años) o con estudiantes del último curso de ESO y Bachillerato (de 15 a 17 años).

Si bien la actividad es adecuada para los grupos de mayor edad, también se puede adaptar al resto de los cursos de educación secundaria (de 12 a 14 años).

Para los estudiantes de secundaria los/las educadores/as pueden elegir uno de los materiales de lectura, en especial el número 3, que incluye más gráficos y menos texto.

## 2.4 Objetivos de aprendizaje

Al final de la actividad se espera que los participantes logren lo siguiente:

### 2.4.1 **Objetivos de aprendizaje relacionados con el conocimiento de la CSC**

- Desarrollar su comprensión de CSC;
- Desarrollar sus habilidades para la toma de decisiones;
- Darse cuenta de la existencia de diferentes perspectivas;
- Tomar decisiones informadas.

### 2.4.2 **Objetivos de aprendizaje relacionados con la evolución**

- Reconocer la selección natural como uno de los mecanismos de la evolución. Identificar la variación, heredabilidad/herencia y ventaja reproductiva/reproducción diferencial, como los tres conceptos principales de la selección natural. Discutir el papel de la variación, heredabilidad/herencia y ventaja reproductiva/reproducción diferencial, en la comprensión de la selección natural.
- Reconocer el papel de las mutaciones como fuentes importantes de variación genética.

### 2.4.3 **Objetivos de aprendizaje relacionados con las prácticas científicas**

- Construir explicaciones.
- Participar en argumentaciones y buscar pruebas.
- Obtener, evaluar y comunicar información.
- Comprender que la ciencia se base en pruebas empíricas.

### 2.4.4 **Objetivos de aprendizaje relacionados con habilidades transversales**

- Analizar cuestiones desde múltiples perspectivas.

## 2.5 Descripción de la práctica educativa

El objetivo principal de la actividad es que los participantes se involucren en el tema de la selección natural en el contexto de las bacterias resistentes a los antibióticos.

### Sesión 1 (2 x 50 minutos)

El docente proporciona un formulario escrito en el que constan las preguntas que se pueden ver a continuación. Se pide a los estudiantes que respondan individualmente antes del comienzo de la actividad (30 minutos para esta actividad previa) y que escriban sus respuestas. Las respuestas se discutirán al final de la actividad con toda la clase para determinar si cambiaron sus perspectivas iniciales.

- A1)** ¿Qué sabes sobre la teoría de la evolución?
- A2)** ¿Aceptar la teoría de la evolución?
- A3)** Elige una de las siguientes afirmaciones marcándola (por ej. X)  
  
 ( ) Creo que la teoría de la evolución es válida.  
 ( ) Creo que la teoría de la evolución no es válida.  
 ( ) Creo que la teoría de la evolución es parcialmente válida.
- A4)** ¿Por qué crees que la teoría de la evolución es válida/no válida/parcialmente válida? ¿Puedes explicar las razones de tu posición?
- A5)** Si alguien tiene una posición contraria a la tuya sobre este tema ¿qué argumentos podría tener?
- A6)** Si quieres convencer a un amigo sobre tu posición, ¿qué argumentos le expondrías?

Esta actividad comienza con un escenario sobre la Sra. Jones (ficticio), que estaba usando medicamentos de quimioterapia y tenía su sistema inmunitario comprometido. Después, responderán a las seis preguntas siguientes, para explorar el conocimiento y la experiencia previa de los participantes sobre la resistencia a los antibióticos.

### Escenario

La Sra. Jones (ficticio) tiene comprometido su sistema inmunitario debido a la medicación de la quimioterapia que usaba. Desde su tratamiento contra el cáncer enferma con frecuencia debido a infecciones. Su médico le receta antibióticos como tratamiento.

- B1)** ¿Sabes por qué el médico podría prescribirle antibióticos a la señora Jones?
- B2)** ¿Cómo afectan los antibióticos a las bacterias?
- B3)** ¿Qué sucede si la señora Jones quiere usar los mismos antibióticos para la gripe?
- B4)** ¿Debería el médico recetarle antibióticos para la gripe? ¿Por qué respondes “sí” o “no”?
- B5)** ¿Qué sucede si la señora Jones se siente realmente mal e insiste en tomar antibióticos para la gripe?
- B6)** ¿Qué sabes sobre la resistencia a los antibióticos?

Luego, se les pide que escriban sus respuestas individualmente en la plantilla (30 minutos). Finalmente, el docente organiza una discusión del grupo-aula completo sobre sus respuestas, que muestran sus conocimientos previos sobre los antibióticos y la resistencia a ellos (40 min.). Si es posible, el docente instructor puede usar herramientas digitales como Mentimeter

( ),  
Slido ( ) o Padlet  
( ), que son adecuadas para  
involucrar a todos los estudiantes cuando participan  
en una discusión en conjunto.

Después de la sesión 1 se debe hacer un descanso  
y celebrar, si es posible, la siguiente sesión  
otro día. Mientras, el docente debe revisar las  
respuestas para identificar las ideas previas de los  
participantes sobre resistencia a los antibióticos,  
selección natural y evolución.

## Sesión 2 (2 x 50 minutos)

El docente divide a los estudiantes en grupos de 4  
o 5 y la actividad continúa con trabajo grupal. Se  
les entregan tres textos de lectura (ver Apéndice),  
junto a nuevas preguntas, dándoles tiempo  
para la lectura (los tres textos se deben dar en  
orden). Después de leer los textos, se les pide que  
trabajen en grupos para responder a las siguientes  
preguntas, y que escriban sus respuestas  
colectivas en la plantilla (20 minutos para leer y 30  
para responder):

- C1)** ¿Cómo actúan los antibióticos  
contra las bacterias?
- C2)** ¿Cómo se vuelven las bacterias  
resistentes a los antibióticos?
- C3)** ¿Qué opinas sobre la relación entre  
la selección natural y las bacterias  
resistentes a los antibióticos?
- C4)** ¿Cómo explica la selección natural  
que las bacterias se vuelvan  
resistentes a los antibióticos?

A continuación, el docente explica los  
mecanismos por los que las bacterias se vuelven  
resistentes a los antibióticos y las definiciones de  
los conceptos integrados en la selección natural  
(Tabla 1).

Hay tres componentes esenciales en la  
selección natural: (a) El rasgo debe variar en  
la población; (b) debe ser heredable; (c) los  
individuos con un tipo particular de variación  
deben tener una ventaja reproductiva sobre  
aquellos que no lo tienen (30 minutos).

**Tabla 1**  
Conceptos de selección natural

Concepto	Descripción
<b>Variabilidad</b>	En una población, los individuos pueden presentar variaciones en determinados rasgos. Si esta variación es el resultado de mutaciones aleatorias heredables, representa el sustrato para la selección natural.
<b>Heredabilidad/ Herencia</b>	Algunos rasgos se transmiten de los progenitores a los descendientes y se les denomina hereditarios o heredables. Otros rasgos están muy influenciados por las condiciones ambientales y pueden mostrar una débil componente hereditaria (lo que se denomina familiaridad, como, por ejemplo, en el caso de la diabetes de tipo 2).
<b>Ventaja reproductiva/ reproducción diferencial</b>	Si un individuo posee un rasgo ventajoso, tendrá más probabilidad de reproducirse. Por consiguiente, el propio rasgo tendrá más probabilidad de aumentar su frecuencia en la población a lo largo del tiempo.

Además de estos tres mecanismos, el docente también debe explicar el papel de las mutaciones en la selección natural, porque la variación puede surgir como resultado de las mutaciones (University of Michigan, sf). Las mutaciones son alteraciones estructurales de las moléculas de ADN y representan una fuente importante de variación genética. Pueden ser neutrales, perjudiciales o beneficiosas.

El docente debe aclarar que las mutaciones ocurren aleatoriamente, sin considerar las ventajas o desventajas que producen, es decir, las mutaciones no surgen porque sean necesarias (National Geographic, sf).

### Sesión 3 (2 x 50 minutos)

En la última parte de la actividad, el docente explica cómo la selección natural juega un papel crucial en la teoría de la evolución y les pide que respondan a las siguientes preguntas. Los estudiantes deberán escribir sus respuestas individualmente (20 minutos):

- D1)** ¿Cuál es el papel de la selección natural en la evolución?
- D2)** ¿Has cambiado tus respuestas iniciales a las preguntas A2 y A3 sobre la evolución? Por favor, explica por qué si o por qué no.
- D3)** Si tu compañero/a de clase no está de acuerdo contigo, ¿cuáles podrían ser las razones de su posición?
- D4)** ¿Cómo lo/la convencerías de tu posición? Por favor, explica qué le dirías.

### Debate en grupo (2 x 50 minutos)

Las preguntas (D1–D4) fueron diseñadas para orientar un debate de toda la clase, desde una perspectiva argumentativa. Se espera que los participantes establezcan conexiones explícitas entre la teoría de la evolución y la selección natural, además de entender cómo la selección natural juega un papel crucial en la evolución. Usando las preguntas D1 a D4, el docente desafía las respuestas iniciales que dieron los participantes en la Sesión 1. Pueden revisarlas a la luz de la nueva información proporcionada por las lecturas y el material didáctico del docente.

Un debate final con todo el grupo aula facilitará la comprensión de los participantes de las diferentes perspectivas sobre evolución.

Proponer contraargumentos (refutaciones) y proporcionar justificaciones (pruebas), ante ideas opuestas de evolución, facilitará también la comprensión de la CSC por parte de los participantes. Aunque la teoría de la evolución en sí misma no es científicamente discutible, la aceptación de la evolución entre los participantes es una excelente oportunidad para discutir diferentes perspectivas en relación con la teoría de la evolución, ya que están relacionadas con el trasfondo cultural y social.

El docente puede completar la actividad explicando cómo la aceptación de la evolución puede considerarse como una CSC que requiere de múltiples perspectivas para abordarla y tomar decisiones al respecto. Si es posible, el docente puede utilizar las herramientas digitales ya citadas (Mentimeter, Slido o Padlet), adecuadas para un debate en gran grupo. Puede usar las respuestas escritas de los participantes para evaluarlos. Las respuestas podrían analizarse para determinar las concepciones alternativas que persistan sobre evolución y selección natural.

- A1)** ¿Por qué crees que la teoría de la evolución es válida/no válida/parcialmente válida? ¿Puedes explicar las razones de tu posición?

Esta pregunta sirve para identificar las posiciones (argumentos) de los participantes y que las respalden con justificaciones (razones). Se puede calificar desde 0 puntos (ninguna justificación), 1 punto (1 justificación) o 2 puntos (dos o más).

**D2)** ¿Has cambiado tus respuestas iniciales a las preguntas A2 y A3 sobre la evolución? Por favor, explica por qué sí o por qué no.

Esta pregunta sirve para que los participantes piensen en revisar sus argumentos, con justificaciones, respaldos y, si pueden, calificadores..., esperando que utilicen sus conocimientos sobre la selección natural y la resistencia a los antibióticos. Para el análisis se utilizan los criterios presentados anteriormente.

**A5)** Si alguien tiene una posición opuesta a la tuya en este tema, ¿qué argumentos podría tener?

**D3)** Si tu compañero de clase está en desacuerdo contigo, ¿cuáles podrían ser las razones de su posición?

Se les formulan estas preguntas a los participantes para descubrir si podrían proponer argumentos opuestos y apoyarlos con justificaciones.

Los argumentos opuestos deben analizarse utilizando los mismos criterios aplicados al argumento original. La pregunta A5 fue diseñada para comprobar la capacidad de los participantes para dar contraargumentos antes de realizar la actividad, y la pregunta D3 para comprobarla después de la actividad. El docente puede comparar ambas respuestas, antes y después de la actividad.

**A6)** Si quieres convencer a tu amigo de tu posición ¿qué argumentos le expondrías?

**D4)** ¿Cómo lo convencerías de tu posición? Por favor, explícalo.

A través de estas preguntas se determina si los participantes pueden refutar un argumento contrario y respaldarlo con pruebas, antes (Pregunta A6) y después de la actividad (D4). Se utiliza el mismo patrón de análisis.

### RECOMENDACIÓN 1

*Si es posible, y los recursos están disponibles, la actividad se puede ampliar incluyendo una investigación en el laboratorio sobre el desarrollo de la resistencia a los antibióticos en una población bacteriana (Williams et al., 2018). Así, los participantes pueden establecer un procedimiento experimental para observar la resistencia a los antibióticos. Primero, pueden configurar placas de control y placas de antibióticos (experimentales) bajo la supervisión del docente. Después, toman muestras de un cultivo bacteriano, las colocan en las placas control y en las de antibióticos y agregan un antibiótico apropiado en la placa de antibióticos. Pasado un tiempo, observan el aumento de las colonias bacterianas en la placa de antibióticos debido a mutaciones. Finalmente, pueden debatir en grupo-aula sobre sus observaciones. Los detalles sobre esta actividad se pueden encontrar en el estudio de Williams et al. (2018). Este paso puede ser útil para desarrollar aspectos relacionados con la naturaleza de la ciencia, sobre cómo se crea el conocimiento científico basado en pruebas y observaciones.*

**RECOMENDACIÓN 2**

*Puede ser útil proporcionarles a los estudiantes la actividad con las preguntas por escrito. Recopilar las respuestas escritas de los participantes servirá para analizar sus argumentos, así como las posibles concepciones alternativas.*

## **2.6 Otras perspectivas sobre cómo utilizar esta actividad en otros contextos o con participantes de otras edades**

Esta actividad ha sido planificada e implantada en contextos de educación formal. Por esta razón existe una parte informativa (conceptos de la selección natural, ver Tabla 1) que mejorará la parte de argumentación. En contextos informales esta parte informativa podría reducirse.

### 3. REFERENCIAS

- Abd-El-Khalick, F. (2003). Socioscientific issues in pre-college science classrooms. In D. L. Zeidler (Ed.), *The role of moral reasoning on socioscientific issues and discourse in science education* (pp. 41–61). Springer.
- Basel, N., Harms, U., & Precht, H. (2013). Analysis of students' arguments on evolutionary theory. *Journal of Biological Education*, 47(4), 192–199.
- Brem, S. K., Ranney, M., & Schindel, J. (2003). Perceived consequences of evolution: College students perceive negative personal and social impact in evolutionary theory. *Science Education*, 87(2), 181–206.
- Cebesoy, U. B., & Chang Rundgren, S. N. (2021). Embracing socioscientific issues-based teaching and decision-making in teacher professional development. *Educational Review*, 1–28.
- Chen, L., & Xiao, S. (2021). Perceptions, challenges and coping strategies of science teachers in teaching socioscientific issues: A systematic review. *Educational Research Review*, 32, 100377.
- Eggert, S., & Bögeholz, S. (2009). Students' use of decision-making strategies with regard to socioscientific issues: An application of the Rasch partial credit model. *Science Education*, 94(2), 230–258.
- Fensham, P. J. (2012). Preparing citizens for a complex world: The grand challenge of teaching socio-scientific issues in science education. In A. Zeyer & R. Kyburz-Graber (Eds.), *Science | Environment | Health*. Springer.
- Fowler, S. R., & Zeidler, D. L. (2010, March). *College students' use of science content during socioscientific issues negotiation: Evolution as a prevailing concept* [Paper presentation]. The Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching (NARST), Philadelphia, USA.
- Fowler, S. R., & Zeidler, D. L. (2016). Lack of evolution acceptance inhibits students' negotiation of biology-based socioscientific issues. *Journal of Biological Education*, 50(4), 407–424.
- Garrecht, C., Reiss, M. J., & Harms, U. (2021). 'I wouldn't want to be the animal in use nor the patient in need'—The role of issue familiarity in students' socioscientific argumentation. *International Journal of Science Education*, 43(12), 2065–2086.
- Gregory, T. R. (2009). Understanding natural selection: Essential concepts and common misconceptions. *Evolution: Education and Outreach*, 2(2), 156–175.
- Guilfoyle, L., & Erduran, S. (2021). Recalibrating the evolution versus creationism debate for student learning: Towards students' evaluation of evidence in an argumentation task. *International Journal of Science Education*, 43(18), 2974–2995.
- Hermann, R. S. (2008). Evolution as a controversial issue: A review of instructional approaches. *Science & Education*, 17, 1011–1032.
- Hermann, R. S. (2013). High school biology teachers' views on teaching evolution: Implications for science teacher educators. *Journal of Science Teacher Education*, 24(4), 597–616.
- Karışan, D., Yılmaz-Tüzün, Ö., & Zeidler, D. L. (2018). Pre-service teachers' reflective judgment skills in the context of socio-scientific issues based inquiry laboratory course. *Turkish Journal of Education*, 7(2), 99–116.
- Kolstø, S. D. (2006). Patterns in students' argumentation confronted with a risk-focused socio-scientific issue. *International Journal of Science Education*, 28(14), 1689–1716.
- Kuhn, D. (1993). Science as argument: Implications for teaching and learning scientific thinking. *Science Education*, 77(3), 319–337.
- Lee, H., Chang, H., Choi, K., Kim, S.W., & Zeidler, D.L. (2012). Developing character and values for global citizens: Analysis of pre-service science teachers' moral reasoning on socioscientific issues. *International Journal of Science Education*, 34(6), 925–953.
- Lin, T.-C., Lin, T.-J., & Tsai, C.-C. (2014). Research trends in science education from 2008 to 2012: A systematic content analysis of publications in selected journals. *International Journal of Science Education*, 36(8), 1346–1372.
- National Academy of Sciences (1998). *Teaching about evolution and the nature of science*. The National Academies Press.
- National Geographic (n.d). *Natural selection*.

- Sadler, T. D. (2005). Evolutionary theory as a guide to socioscientific decision-making. *Journal of Biological Education*, 39(2), 68–72.
- Sadler, T. D. (2011). Situating socio-scientific issues in classrooms as a means of achieving goals of science education. In T. D. Sadler (Ed.), *Socio-scientific issues in the classroom: Teaching, learning and research* (pp. 1–9). Springer.
- Sadler, T. D., & Zeidler, D. L. (2004). Patterns of informal reasoning in the context of socioscientific decision-making. *Journal of Research in Science Education*, 42(1), 112–138.
- Sadler, T. D., & Zeidler, D. L. (2005). The significance of content knowledge for informal reasoning regarding socioscientific issues: Applying genetics knowledge to genetic engineering issues. *Science Education*, 89(1), 71–93.
- Sampson, V., & Gerbino, F. (2010). Two instructional models that teachers can use to promote & support scientific argumentation in the biology classroom. *The American Biology Teacher*, 72(7), 427–431.
- University of Michigan (n.d.). *Evolution and natural selection*.
- von Aufschnaiter, C., Erduran, S., Osborne, J., & Simon, S. (2008). Arguing to learn and learning to argue: Case studies of how students' argumentation relates to their scientific knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(1), 101–131.
- Williams, M. A., Friedrichsen, P. J., Sadler, T. D., & Brown, P. J. (2018). Modeling the emergence of antibiotic resistance in bacterial populations. *The American Biology Teacher*, 80(3), 214–220.
- Zeidler, D. L., Herman, B. C., & Sadler, T. D. (2019). New directions in socioscientific issues research. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(11), 1–9.
- Zeidler, D. L., & Sadler, T. D. (2008). The role of moral reasoning in argumentation: Conscience, character, and care. In S. Erduran & M.P. Jimenez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in science education: Perspectives from classroom-based research* (pp. 201–216). Springer.
- Zeidler, D. L., & Sadler, T. D. (2011). An inclusive view of scientific literacy: Core issues and future directions of socioscientific reasoning. In C. Linder, L. Ostman, D. A. Roberts, P. Wickman, G. Erickson, & A. MacKinnon (Eds.), *Promoting scientific literacy: Science education research in transaction* (pp. 176–192). Routledge.
- Zeidler, D. L., Sadler, T. D., Applebaum, S., & Callahan, B. E. (2009). Advancing reflective judgment through socioscientific issues. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(1), 74–101.
- Zohar, A., & Nemet, F. (2002). Fostering students' knowledge and argumentation skills through dilemmas in human genetics. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(1), 35–62.

## 4. APÉNDICE

Los tres materiales de lectura usados en esta actividad son los siguientes:

### Material de Lectura 1

#### **Superbacteria: las bacterias resistentes a los antibióticos pueden ser un riesgo mayor que el coronavirus\***

Después de tres años de trabajo en Fiji, el investigador Paul De Barro concluyó que las bacterias resistentes a los antibióticos (conocidas como “superbacterias”) son “la mayor amenaza para la salud humana, sin excepción”.

Según The Guardian, el científico australiano Dr. Paul De Barro argumentó que las bacterias resistentes a los antibióticos podrían ser una amenaza muy grave para la salud, que podría devolver la medicina moderna a “la Edad Media”. El Dr. De Barro dijo: “Si crees que el COVID es malo, entonces nunca querrás encontrarte con bacterias resistentes a los antibióticos”. Y añadió: “No creo que esté exagerando cuando digo, sin dudar, que esta es la mayor amenaza para la salud. La COVID ni siquiera puede acercarse a los efectos de la resistencia a los antimicrobianos”. Aunque las bacterias resistentes amenazan la salud pública en todo el mundo, los efectos son más evidentes en el Pacífico, donde el riesgo se ha vuelto aún más grave. Esta situación podría llevar a los frágiles sistemas de salud de la región a un punto de ruptura.

\*El artículo original está en turco y fue traducido al inglés por la autora; la presente traducción al español se ha hecho a partir del texto en inglés.

Enlace:

### Material de Lectura 2

#### **¿Qué es la Resistencia a los antibióticos?\***

Los antibióticos son medicamentos que se utilizan para matar bacterias, y algunas pueden resistir naturalmente a los antibióticos. Con el tiempo, algunas bacterias pueden adaptarse a ciertos antibióticos. Esa resistencia es un ejemplo de este proceso de adaptación: la resistencia a un antibiótico específico significa que el antibiótico no puede matar o prevenir la reproducción de las bacterias resistentes con la dosis terapéutica. Así, estas bacterias obtienen una ventaja sobre las no resistentes en presencia de antibióticos. Como resultado, la mayoría de las bacterias del medio ambiente se vuelven resistentes a esos antibióticos después de un cierto período.

Además, las bacterias pueden transferir el material genético que causa resistencia a diferentes bacterias, lo que contribuye significativamente a la propagación de la resistencia a los antibióticos. Las enfermedades causadas por bacterias resistentes representan una grave amenaza para la salud, especialmente en entornos de cuidados intensivos y en pacientes con sistemas inmunitarios comprometidos. En las enfermedades causadas por bacterias resistentes, el tratamiento no funciona y provoca largas hospitalizaciones, la aparición de complicaciones relacionadas, y el aumento de las tasas de mortalidad y dolencias. Si no se previene la resistencia a los antibióticos, el peligro que nos espera en el futuro es mucho mayor. Pronto, los antibióticos podrían volverse completamente ineficaces en el tratamiento de enfermedades infecciosas, lo que provocaría que simples infecciones de heridas pudieran provocar la muerte.

***La resistencia a los antibióticos como un problema global:***

Los antibióticos son fármacos importantes desde el punto de vista clínico, ya que se utilizan en el tratamiento y profilaxis de enfermedades infecciosas causadas por microorganismos. El descubrimiento de los antibióticos ha supuesto un importante punto de inflexión en términos de salud humana, pues las tasas de mortalidad y morbilidad debidas a las enfermedades infecciosas han disminuido drásticamente desde el uso clínico de estos medicamentos. Sin embargo, casi al mismo tiempo del descubrimiento de los antibióticos, también se predijo que los microorganismos podrían adquirir resistencia a estos fármacos. Así que, si no se toman las precauciones necesarias, los antibióticos existentes perderán su eficacia en el tratamiento de enfermedades infecciosas, lo que podría llevar a la humanidad a encontrarse una vez más en la era anterior a los antibióticos. Las iniciativas globales relevantes para prevenir la resistencia a los antibióticos no son nuevas. En 1998, la Asamblea General de la Organización Mundial de la Salud (OMS) concluyó que los países miembros deberían tomar medidas contra la resistencia a los antibióticos. En 2001 se publicó la Estrategia mundial de la OMS para limitar la resistencia a los antibióticos, pero cuatro años después, la Asamblea General de la OMS llamó la atención sobre el lento progreso en la limitación, y reclamó a los proveedores y consumidores un uso racional de los antibióticos. Para llamar la atención sobre la importancia de la amenaza para la salud pública, la OMS determinó que el tema del Día Mundial de la Salud 2011 sería la resistencia a los antibióticos y pidió a todo el mundo que pensara en este tema y se tomaran medidas y responsabilidades para detener el desarrollo de la resistencia. Es un problema de salud muy grave que preocupa al mundo entero hoy y en el futuro.

Actualmente, los mecanismos de resistencia a los antibióticos son aceptados como parte de los procesos evolutivos de las bacterias. En consecuencia, se prevé que la resistencia a los antibióticos siempre existirá y que no hay, ni habrá, antibiótico que no sea resistente a su efecto, así que el plan de lucha contra esa resistencia debería basarse en este supuesto.

Además, se cree que los mecanismos de resistencia de importancia clínica y las especies bacterianas resistentes pueden variar con el tiempo. Por estas razones, la producción regular de nuevos antibióticos sugiere que estos deberían ser específicos para ciertos mecanismos de resistencia y que su uso debería limitarse a estas condiciones.

\*El artículo original está en turco y fue traducido al inglés por la autora; la presente traducción al español se ha hecho a partir del texto en inglés.

Enlace:

### Material de lectura 3

#### Bacteria vs. antibióticos\*

Si has visitado a un médico/a recientemente, es posible que hayas visto una advertencia en las paredes del hospital: "No insistas en que tu médico/a te recete antibióticos".

¿Por qué se hace esta advertencia?

¿Por qué usamos antibióticos?

¿Son peligrosos los antibióticos?

Veamos juntos las respuestas a estas preguntas. Aunque hay muchas bacterias en nuestro cuerpo, no todas son dañinas. Por ejemplo, las bacterias beneficiosas que viven en el intestino ayudan a que nuestro metabolismo funcione. Por otro lado, las bacterias dañinas pueden provocar diversas infecciones en el organismo y los antibióticos se utilizan para combatirlas.

Los antibióticos combaten las infecciones matando las bacterias o impidiendo que crezcan y se reproduzcan.

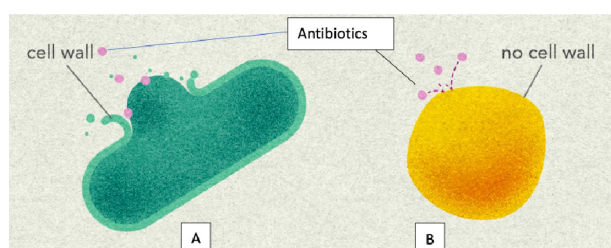
Por otro lado, los antibióticos no afectan a los virus. Dado que el origen de enfermedades como resfriados, gripe, faringitis (infección de garganta) y bronquitis es mayoritariamente vírica, los antibióticos son inútiles contra estas infecciones. Las bacterias ganan resistencia en algunos casos, y los antibióticos no pueden destruir las bacterias de manera efectiva. Esta condición se llama "resistencia a los antibióticos". Ocurre cuando las bacterias desarrollan la capacidad de sobrevivir frente a los antibióticos. Este proceso puede ocurrir de varias maneras.

#### Resistencia natural (intrínseca)

A veces, las bacterias continúan viviendo y creciendo a pesar del tratamiento con antibióticos. Por ejemplo, mientras que muchas bacterias tienen una pared celular formada por aminoácidos y azúcares que las rodean (Figura 1, A), algunas no tienen pared celular (Figura 1, B). La penicilina, el primer antibiótico del mundo (descubierto en 1927) previene la formación de paredes celulares en las bacterias. Por lo tanto, la penicilina, o un antibiótico con un mecanismo de efecto similar, no puede dañar a las bacterias que ya no tienen pared celular (Figura 1, B). Como resultado, mientras que la bacteria A se verá afectada por la penicilina, la bacteria B seguirá creciendo en presencia del antibiótico. En la Figura 1, la bacteria B ya es naturalmente resistente a la penicilina.

**Figura 1**

Figura que muestra la bacteria A (con pared celular) y la bacteria B (sin pared celular) y cómo la penicilina afecta a ambas bacterias (adaptada de



### **Resistencia adquirida**

Las bacterias también pueden volverse resistentes a los antibióticos con el tiempo. Esto ocurre cuando un tipo de bacteria cambia la forma en que se protege de los antibióticos. Las bacterias pueden adquirir resistencia de dos maneras: al sufrir un nuevo cambio genético (mutación espontánea) que ayuda a la bacteria a sobrevivir, o adquiriendo un gen de resistencia de otra bacteria resistente a los antibióticos (transferencia genética horizontal). Mientras que las mutaciones espontáneas

puede resultar en resistencia a los antibióticos al alterar el objetivo del antibiótico, su nivel de expresión o la regulación de genes resistentes, el mecanismo de transferencia horizontal de genes es otra forma de adquirir genes resistentes. La transferencia horizontal de genes permite a las bacterias compartir su material genético, incluidos los genes de resistencia a los antibióticos. Ya sea que se adquieran por transferencia horizontal de genes o por mutación, las bacterias resistentes pueden continuar creciendo en presencia de antibióticos, mientras que las bacterias sensibles finalmente se detienen. Por lo tanto, las bacterias resistentes pueden superar rápidamente en número a las más sensibles y propagarse por toda la población.

### **¿Por qué la resistencia a los antibióticos es importante?**

La resistencia a los antibióticos es una de las amenazas más importantes para la salud humana, porque las enfermedades que causan infecciones peligrosas, y que pueden tratarse fácilmente con estos medicamentos, se vuelven incurables con el tiempo debido a la resistencia a los antibióticos. Las enfermedades causadas por bacterias resistentes a los antibióticos son muy difíciles de tratar, ya que es mucho más difícil destruir a las bacterias resistentes. Como resultado, es necesario desarrollar nuevos antibióticos para las bacterias resistentes a los antibióticos. Así que la resistencia a los antibióticos pone en peligro la vida de los pacientes y encarece el tratamiento

de las enfermedades. Los antibióticos no sólo se utilizan para el tratamiento, sino también para prevenir enfermedades. Por ejemplo, los pacientes sometidos a tratamientos de quimioterapia tienen sistemas inmunitarios debilitados, y un mayor riesgo de infección. Por lo tanto, los médicos pueden recomendar el uso de antibióticos para prevenir enfermedades en estos pacientes. Además, después de cirugías abiertas (por ej., cirugía cardíaca o trasplantes de órganos), a los pacientes se les pueden administrar antibióticos para prevenir infecciones, como las causadas por bacterias, o reducir sus efectos. Esto ayuda a disminuir el número de muertes por infección.

\*El artículo original está en turco y fue traducido al inglés por la autora; la presente traducción al español se ha hecho a partir del texto en inglés.

Enlace:

Fuentes adicionales usadas para el material 3:  
La Figura 1 está adaptada de:

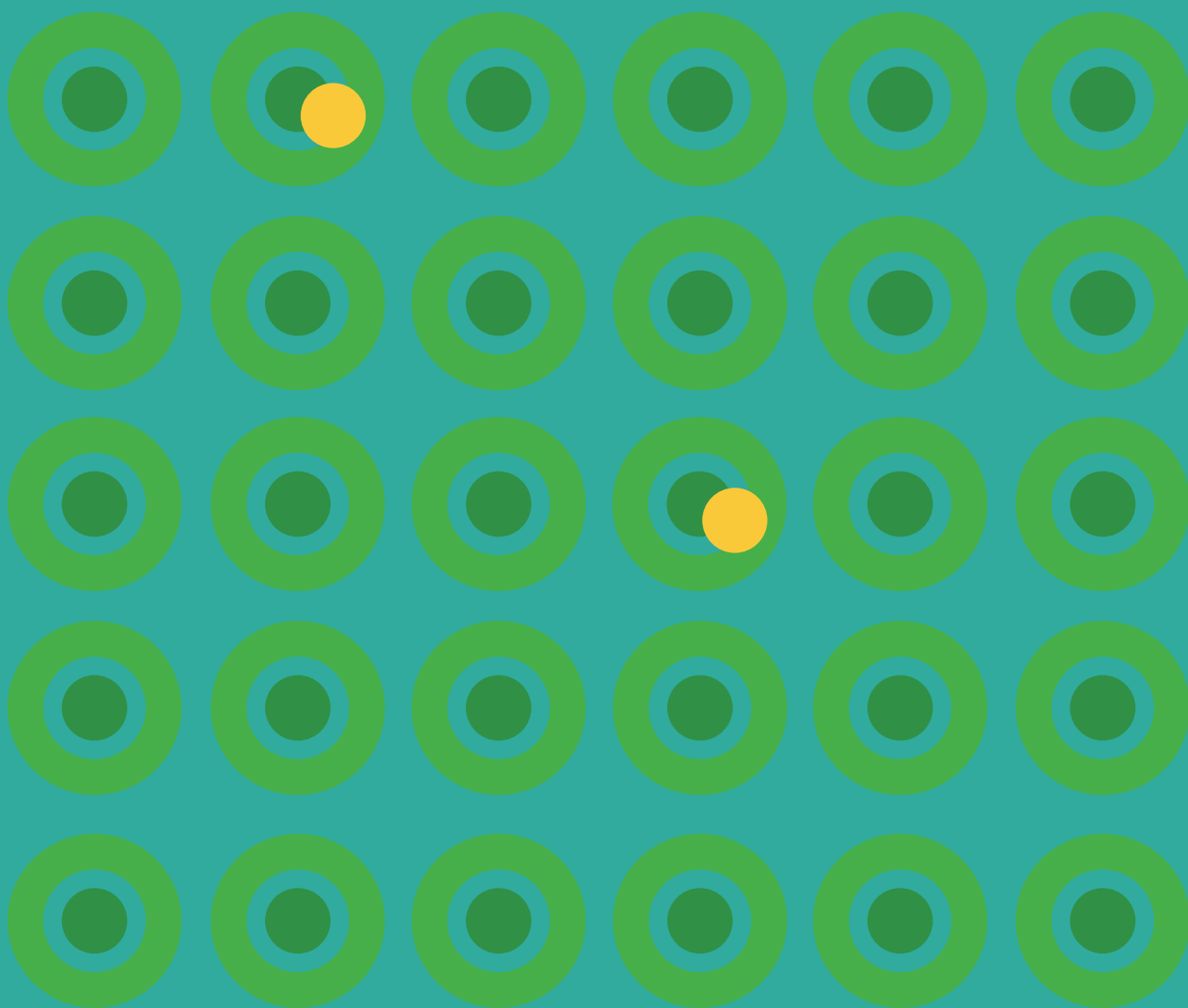
Le Roux, F., & Blokesch, M. (2018). Eco-evolutionary dynamics linked to horizontal gene transfer in *Vibrios*. *Annual Review of Microbiology*, 72, 89–110.

Baym, M., Stone, L. K., & Kishony, R. (2016). Multidrug evolutionary strategies to reverse antibiotic resistance. *Science*, 351(6268), aad3292.



## Capítulo 10

**¿Por qué están disminuyendo los polinizadores? Equilibrio entre la salud de los polinizadores y el margen de beneficios de las partes interesadas**



## ¿Por qué están disminuyendo los polinizadores? Equilibrio entre la salud de los polinizadores y el margen de beneficios de las partes interesadas

**Rebecca Lewis<sup>1</sup>**  
**Ellen Bell<sup>1</sup> & Eleanor Kent<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> University of East Anglia, Norwich, UK

### Resumen:

Los insectos conforman el mayor grupo de animales del planeta, con un millón de especies descritas y una estimación de 5 millones o más que permanecen sin identificar (Stork, 2017). Los insectos proporcionan una amplia gama de servicios ecosistémicos, entre ellos la polinización. Debido a las actividades antropogénicas que causan la pérdida y fragmentación del hábitat, los efectos de los plaguicidas y el cambio climático, los polinizadores están disminuyendo, lo que puede ocasionar una reducción del rendimiento agrícola y afectar al funcionamiento de los ecosistemas. Esta actividad pretende ilustrar cómo las decisiones que toman los agricultores pueden influir en el ritmo y la gravedad del declive de los polinizadores, al tiempo que pone de manifiesto las dificultades a las que se enfrentan los agricultores para gestionar sus explotaciones óptima y respetuosamente con el medio ambiente, sin dejar por ello de ganarse la vida en el contexto socioeconómico actual. En esta actividad, el alumnado desempeñará el papel de un/a agricultor/a que intenta encontrar un equilibrio entre los beneficios de su explotación y la salud de los polinizadores mientras enfrenta una tormenta de imprevistos que pueden afectar su éxito. Esta actividad está dirigida a estudiantes adolescentes entre 11 y 14 años.

#### **PALABRAS CLAVE**

*cultivos, diversidad, insectos, cambio climático, agricultura*

# 1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA SOCIOCIENTÍFICO

Los insectos se encuentran en todo el mundo y se han adaptado a vivir en muchos entornos, desde desiertos calurosos y áridos hasta bosques tropicales y praderas alpinas de montaña.

Los insectos que viven en estos diferentes hábitats presentan adaptaciones morfológicas y de comportamiento que les permiten sobrevivir y reproducirse con éxito en su entorno.

## 1.1 Plantas y polinizadores

Las relaciones entre plantas y polinizadores son una parte esencial del ecosistema. Sin plantas, los polinizadores tendrían menos alimento y su número disminuiría, lo que afectaría a otras especies animales. Además, muchas plantas no podrían reproducirse sexualmente sin polinizadores. La abundancia de flores silvestres y otros taxones autóctonos está disminuyendo debido a la pérdida de hábitat, lo que otorga una mayor importancia a los animales que intervienen en sus ciclos vitales (Cane, 2008).

Existen diversos tipos de polinizadores, tales como aves, murciélagos, polillas, mariposas, escarabajos y abejas (Halder et al., 2019). El proceso de polinización animal se produce cuando un polinizador visita una flor en busca de alimento (es decir, néctar o polen). Cuando el animal se acerca a la flor, roza las partes florales masculinas (anteras), que producen miles de granos de polen. Los granos de polen quedan pegados al cuerpo del animal, de modo que cuando visita la siguiente flor, el polen entra en contacto con la parte floral femenina (el estigma), lo que da lugar a la fecundación. No todas las plantas con flores son polinizadas por animales; por ejemplo, en algunas plantas es el viento quien transporta el polen de una flor a otra (Culley et al., 2002).

Se estima que el 87,5% de las especies de plantas con flores dependen de los animales para

transferir el polen de una flor a otra, lo que ha promovido la evolución de diversas estrategias para atraer a los polinizadores (Ollerton et al., 2011). La forma, el color y el olor de las flores actúan como señales para atraer a distintos grupos de polinizadores. Por ejemplo, las flores polinizadas por murciélagos y polillas suelen ser blancas y muy perfumadas porque estos animales son más activos por la noche, momento en el que la baja luminosidad disminuye la importancia de las señales visuales - identificación de pétalos de colores vivos - e incrementa la importancia de las señales olfativas (Halder et al., 2019).

Una vez fecundadas, las flores completan su ciclo reproductivo y producen semillas, que pueden convertirse en plantas maduras en las condiciones adecuadas. El ser humano lleva miles de años cultivando plantas para cosechar sus frutos o semillas. Alimentos como el chocolate, el café, las nueces, los tomates y las bayas proceden de plantas polinizadas por insectos. De hecho, aproximadamente un tercio de los alimentos que comemos proceden de una planta polinizada por insectos, lo que resalta el gran valor económico de los insectos polinizadores en todo el mundo (Klein et al., 2007).

El cuajado es la proporción de flores de una planta que se convierte en fruto o en semilla y que depende de la polinización. Se ha demostrado que las explotaciones con una elevada diversidad de polinizadores producen mayores cosechas y frutos de mayor calidad que las que tienen una baja diversidad de insectos polinizadores. En un estudio de 41 cultivos polinizados por animales, la visita de insectos silvestres mejoró la fructificación en todos los cultivos (Garibaldi et al., 2013), lo que resalta la importancia de la conservación de los polinizadores silvestres.

## 1.2 Especialización y generalismo

Como señaló Darwin en 1876, las abejas tienden a “visitar las flores de la misma especie todo el tiempo que pueden antes de ir a otra especie” (Darwin, 1876). Esta tendencia a especializarse temporalmente es beneficiosa para las plantas que requieren polen de sus conespecíficos para que se produzca la fecundación; sin embargo, esto también es beneficioso para las abejas, ya que la fidelidad floral puede mejorar la eficiencia del forrajeo (Chittka et al., 1999). A pesar de ello, la especialización tiene un costo para las especies, ya que los altos niveles de especialización en un ecosistema pueden provocar fragilidad en épocas de cambio ambiental. Una planta que sólo puede ser polinizada por una única especie de polinizador amarra su destino al de su polinizador. Por lo tanto, existe un equilibrio crucial entre los niveles de especialización para preservar la resiliencia de los ecosistemas (Brosi, 2016).

Un ejemplo de un polinizador especialista es *Peponapis pruinosa*, la abeja calabacera, que puede polinizar calabazas más rápida y eficazmente que las abejas melíferas introducidas (Tepedino, 1981). Sin embargo, actividades agrícolas como el uso de pesticidas y la labranza pueden dañar las poblaciones de abejas calabaceras. Así pues, es importante conservar las especies polinizadoras especialistas, ya que suelen ser polinizadores más eficaces (Larsson, 2005). Además, hay pruebas que sugieren que los niveles de especialización pueden cambiar, ya que el cambio climático, la fragmentación del hábitat y el desplazamiento del área de distribución conducen a una disminución de la aptitud entre las especies especialistas. En Colorado, la longitud de la lengua de las abejas parece estar evolucionando rápidamente, pasando de lenguas largas, especializadas en la recolección de néctar de flores profundas, a lenguas más cortas, adaptadas para la recolección eficaz de una gama más amplia de flores (Miller-Struttman et al., 2015). Esto deja a las flores tubulares profundas en peligro de extinción al no haber polinizadores especialistas que las polinicen.

## 1.3 Causas del declive de los polinizadores

Las especies domésticas de abejorros y abejas melíferas se utilizan habitualmente para complementar el trabajo de polinización realizado por los polinizadores silvestres. Los abejorros y las abejas melíferas presentan un manejo muy conveniente en las explotaciones agrícolas porque son sociales, viven en colmenas compuestas por miles de individuos, y además son de bajo costo y fáciles de utilizar. Sin embargo, estas especies no son tan eficaces para polinizar las flores de ciertos cultivos en comparación con las especies de polinizadores silvestres. En un estudio sobre 41 cultivos, los investigadores descubrieron que las abejas melíferas (*Apis mellifera* L.) producían un menor cuajado de frutos y eran menos constantes en la producción de frutos que las abejas silvestres (Garibaldi et al., 2013).

Las abejas domésticas pueden afectar negativamente a las poblaciones de polinizadores silvestres de varias maneras, por ejemplo, al competir por recursos como el néctar, el polen o los hábitats de nidificación. En presencia de abejas melíferas domésticas, las abejas silvestres pueden verse obligadas a buscar alimento en plantas de menor calidad nutricional o a dedicar más tiempo -y, por tanto, más energía- a buscarlo en flores que se encuentran a mayor distancia de su nido (Mallinger et al., 2017). Las abejas domésticas suelen vivir almacenadas en grandes cantidades, lo que las hace más propensas a albergar patógenos que las abejas silvestres solitarias. La transmisión de patógenos de las abejas domésticas puede producirse a través del polen contaminado, las heces o el contacto con recursos florales compartidos (Graystock et al., 2016).

La medida en que la propagación de enfermedades afecte a la salud de los polinizadores silvestres dependerá de la densidad de polinizadores domésticos y del tipo de patógeno. Con el crecimiento de las poblaciones humanas, se ha ejercido una mayor presión sobre la tierra, provocando así una disminución de la abundancia de insectos. El cambio en el uso de la tierra es un factor clave del declive de muchos grupos de polinizadores, incluidas las abejas, las

mariposas y las falsas abejas (sírfidos) (IPBES, 2016; Powney et al., 2019).

El aumento de la urbanización del suelo ha provocado la eliminación y fragmentación de hábitats naturales para dar lugar a la construcción de viviendas, infraestructuras, granjas y otras estructuras. Además, la agricultura ha cambiado radicalmente en el último siglo. Históricamente, las tierras de cultivo eran un mosaico de hábitats que incluían prados ricos en flores, setos y maleza en flor. Más recientemente, las explotaciones agrícolas se han ampliado a grandes extensiones de monocultivos que utilizan pesticidas y fertilizantes. Además, muchas han eliminado hábitats seminaturales, creando así entornos inhóspitos para las comunidades de insectos silvestres.

Por otro lado, el cambio climático trae consigo condiciones meteorológicas extremas y el calentamiento del planeta, y existe evidencia del impacto de las temperaturas elevadas en las poblaciones de insectos. Las áreas de distribución de algunos insectos han empezado a cambiar, y algunas especies norteamericanas y europeas se han alejado del sur de su área de distribución y empiezan a ocupar elevaciones mayores de las regiones montañosas (Pyke et al., 2016). También hay indicios de un desajuste fenológico, en el que los tiempos de floración de las plantas y la aparición de insectos se han desacoplado (Kudo y Cooper, 2019).

Por ejemplo, hay pruebas que sugieren que algunas plantas florecen antes de la hibernación invernal de las abejas, lo que se traduce en menos recursos para las primeras abejas reinas (Kudo y Cooper, 2019; Kudo e Ida, 2013). Son difíciles de determinar los efectos a largo plazo provocados por el aumento de las temperaturas sobre los insectos debido a la dificultad de desvincularlos de otros factores como la pérdida de hábitats y la intensificación de la agricultura.

En Puerto Rico, la temperatura de los bosques ha aumentado 2 °C en los últimos 50 años, lo que ha coincidido con una drástica disminución de la biomasa de insectos (Lister y García, 2018). Ha

habido pocas alteraciones en los bosques de esta región durante dicho periodo, lo que sugiere que el cambio climático ha sido el factor registrado más importante en el declive de insectos en dicha área.

## 1.4 Agricultura respetuosa con los polinizadores

Dado que el 75% de los cultivos requieren polinización por insectos en algún grado, se calcula que los servicios ecosistémicos que proporcionan los polinizadores tienen un valor de entre 235.000 y 577.000 millones de dólares al año en todo el mundo (IPBES, 2016). Los insectos contribuyen a la producción agrícola que alimenta a millones de personas en todo el mundo; por lo tanto, un descenso de su población afecta la producción de alimentos para el consumo local y el comercio mundial.

En particular, se han propuesto ciertas estrategias y políticas para combatir el declive de los insectos. En primer lugar, la tierra puede gestionarse de tal forma que ayude a la conservación de los polinizadores. Por ejemplo, la siembra de cercas vegetales alrededor de los cultivos, la provisión de recursos de nidificación, la diversificación del sistema agrícola y la provisión de incentivos económicos a los agricultores por prácticas que favorezcan a los polinizadores, son acciones que podrían aumentar y mantener la abundancia y diversidad de polinizadores en la agricultura (IPBES, 2016).

Europa, Australia y Estados Unidos utilizan programas agroambientales que ofrecen a los agricultores ayudas económicas directas por la implementación de determinadas prácticas de gestión, como la creación y restauración de hábitats seminaturales, la reducción del uso de productos químicos en sus tierras y el establecimiento de cercas florales. Estos planes financieros son costosos de aplicar en los países menos desarrollados económicamente, en donde la conservación dirigida por la comunidad podría ser una medida alternativa (Khadse y Rosset,

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA PRÁCTICA

### 2.1 Materiales

- Agricultura respetuosa con los polinizadores (presentación en PowerPoint).
- Un dado de seis caras. Fichas para representar monedas (suficientes para que cada participante/grupo tenga hasta 35 fichas de \$1).
- Fichas para representar puntos de polinizadores (suficientes para que cada participante/grupo tenga hasta 30 fichas).

### 2.2 Tiempo

- Introducción al tema y explicación del juego (30 minutos).
- Desarrollo del juego (30 minutos).
- Debates posteriores a la partida (30 minutos).

### 2.3 Destinatarios

Esta actividad puede adaptarse a casi todos los grupos de edad. Sin embargo, en la actualidad, es recomendable para mayores de 11 años.

Los participantes más jóvenes pueden jugar con fichas de mayor tamaño adecuado (para evitar el riesgo de asfixia), pero es posible que no comprendan completamente los matices del juego.

2019). La reducción de plaguicidas también ha sido un punto central de la conservación de los polinizadores.

El aumento en la concientización sobre el uso responsable de los plaguicidas, así como el incremento de los estándares globales, las regulaciones y las evaluaciones de riesgos relacionados con los plaguicidas, son factores importantes para cambiar la forma en que se utilizan los productos químicos en las explotaciones agrícolas. Investigaciones sobre plaguicidas (por ejemplo, neonicotinoides) han revelado que estos causan una amplia gama de problemas para la salud de las abejas (Blacquiè et al., 2012).

En presencia de neonicotinoides, el aprendizaje, la memoria, el comportamiento de forrajeo y la capacidad de polinización de las abejas se ven afectados negativamente. Además, se ha observado que los residuos de neonicotinoides en las flores silvestres de los bordes de los campos contienen una concentración de sustancias químicas lo suficientemente alta como para afectar a los polinizadores que se alimentan del néctar y el polen de estas flores (Botías et al., 2015), lo que sugiere que la exposición de los polinizadores a los productos químicos es generalizada y va más allá de los límites de las explotaciones agrícolas.

En la Unión Europea, en 2018 se prohibió la pulverización de esta familia de productos químicos en las explotaciones agrícolas, lo que supuso un paso importante hacia el reconocimiento de la importancia de la salud de los polinizadores en los sistemas agrícolas (Butler, 2018).

Sin embargo, aunque hay pruebas sustanciales de los efectos negativos que estos productos químicos causan en el medio ambiente, muchos entes gubernamentales se han negado a prohibirlos, lo que resalta los retos de una agricultura respetuosa con los polinizadores (Sonne y Altrup, 2019).

## 2.4 Objetivos de aprendizaje

### 2.4.1 **Objetivos de aprendizaje relacionados con la concientización sobre cuestiones sociocientíficas (CSC)**

- Comprender el problema del declive de los polinizadores y que la diversidad de polinizadores es tan importante como su abundancia absoluta.
- Apreciar la importancia y la dificultad de equilibrar un ecosistema sano y rico en polinizadores con unos márgenes de beneficio aceptables para las partes interesadas (es decir, los agricultores).
- Apreciar que las mejoras de los servicios ecosistémicos (por ejemplo, los polinizadores) a menudo se producen a costa del rendimiento o producción (es decir, beneficios económicos) de las partes interesadas (es decir, los agricultores).
- Apreciar el impacto de los cambios medioambientales o sociales a gran escala, como la sequía o los incentivos gubernamentales, tanto en los servicios ecosistémicos (en este caso, los polinizadores) como en el rendimiento de los cultivos (y, por tanto, en los beneficios de las partes interesadas).

### 2.4.2 **Objetivos de aprendizaje relacionados con la evolución**

- Reconocer que los humanos impactan directamente la biodiversidad y que esto puede repercutir en el potencial evolutivo futuro.
- Reconocer las funciones de las especies especialistas y generalistas en los ecosistemas.

### 2.4.3 **Objetivos de aprendizaje relacionados con las prácticas científicas**

- Reconocer los beneficios y limitaciones de utilizar modelos conceptuales para comunicar y examinar principios complejos.

### 2.4.4 **Objetivos de aprendizaje relacionados con la naturaleza de la ciencia**

- Comprender cómo la ciencia puede informar a la política, lo que a su vez puede repercutir en la gestión de la tierra por parte de los interesados y conducir a cambios valiosos que benefician a los ecosistemas al tiempo que crean un modo de vida más sostenible.

### 2.4.5 **Objetivos de aprendizaje relacionados con las competencias transversales**

- Apreciar la compleja interacción entre diferentes perspectivas, como las de los entes gubernamentales, las partes interesadas – agricultores/as- y los/las defensores/as de los servicios ecosistémicos.
- Desarrollar la capacidad de resolver problemas en equipo.

## 2.5 Descripción de la práctica educativa

Recomendamos que los responsables de las sesiones comiencen con una breve descripción de la importancia de los polinizadores como servicio ecosistémico esencial y no sólo como medio para mantener un medio ambiente sano y diverso o para mejorar el rendimiento de los cultivos (Hoehn et al., 2008). También sugerimos que se debata la importancia de la diversidad de polinizadores, ya que es un error común pensar que la crisis de los polinizadores puede evitarse aumentando la abundancia de abejas domésticas.

A continuación, el/la responsable de la sesión puede presentar algunos aspectos de la agricultura convencional y sus repercusiones en la abundancia y diversidad de polinizadores. Estos debates se ilustrarán y reforzarán con la actividad principal, que adopta la forma de un “juego de estrategia de colección de sets”. Dado que este juego es un modelo simple de una problemática compleja, el juego tiene limitaciones importantes. Después de participar en el juego, recomendamos a los/las educadores/as examinar este modelo con los estudiantes. Los estudiantes pueden ser guiados para identificar las simplificaciones en el juego y discutir cómo pueden darse en la vida real. Otra sugerencia es que los participantes exploren cómo añadir complejidad al juego, valorando qué complejidad puede ser añadida al juego y cómo esta puede afectar la manera en la que se juega. También recomendamos la discusión del uso de modelos como herramienta desde un punto de vista más general.

¿Pueden los estudiantes proponer razones de por qué los científicos usan modelos? Al igual que se emplean modelos en el juego, los estudiantes también pueden implicarse en discusiones sobre cómo los modelos pueden ser usados para entender cuestiones complejas o hacer predicciones/estimaciones.

### (i) Preparación del juego y objetivos principales

El juego del polinizador busca ilustrar la interacción entre las partes interesadas (representados aquí por los agricultores), los servicios ecosistémicos (la polinización) y la gestión política. En el escenario del juego, el gobierno ha declarado que el país está pasando por una crisis de polinizadores y que una multa de \$20 será aplicada a las explotaciones agrícolas que tengan una puntuación en la salud de polinizadores inferior a 3 puntos.

Cada jugador/a empieza con \$10. Por lo tanto, la multa del gobierno representa una sanción significativa que puede eliminar al participante del juego. Adicionalmente, cada explotación agrícola tiene una puntuación de salud de los polinizadores inicial de 5 puntos. Los/las jugadores/as deben distribuir apropiadamente el dinero y las fichas de salud del polinizador. El objetivo del juego es incrementar los beneficios de su explotación agrícola a la vez que se incrementa la salud de los polinizadores, ya que la puntuación de salud de los polinizadores contribuye directamente al valor total de la explotación agrícola al final del juego.

### (ii) Partida del juego

La partida completa consiste en 7 turnos (representando 7 años de cultivo). Cada turno está compuesto por dos tomas de decisiones y un evento (aleatoriamente escogido o seleccionado por el/la responsable de la sesión).

**Tabla 1**

Costos, beneficios e impactos en la puntuación de la salud de los polinizadores al cultivar uno de los tres cultivos de la explotación agrícola. El beneficio es obtenido utilizando un dado para representar la variabilidad anual de los beneficios de los agricultores

Número de cultivos	Costo	Beneficio	Número de puntos de polinizador
1 – Colza	\$3	\$4 o \$6	-2
2 –Tomate y colza	\$4	\$4 o \$6	No cambia
3 – Fresa, tomate y colza	\$5	\$4 o \$6	+1

**Paso 1: ▲**

Los/las jugadores/as eligen cuántos cultivos diferentes quieren cultivar en su tierra. Esta elección influye en los beneficios de la explotación agrícola y en los puntos de polinizador (Tabla 1). Los responsables de la sesión deben tener en cuenta que los beneficios de los agricultores a partir de ahora no dependerán del número de cultivos plantados sino de las fluctuaciones en la economía local definidas por el lanzamiento del dado. Si se obtiene un 1 o un 2 en el lanzamiento del dado, significa que existe una economía recesiva o un año con bajo rendimiento productivo, por lo que el beneficio de todos los cultivos será de \$4. Mientras que, si se obtiene un número del 3 al 6 en el lanzamiento del dado, significa que existe una economía sólida y boyante, con un rendimiento elevado, por lo que los beneficios de todos los cultivos serán \$6. Esto añade un elemento imprevisible al juego, que refleja algunas de las dificultades a las que se enfrentan los agricultores cuando se someten a este proceso de toma de decisiones. Dado que el coste de plantar más de un cultivo aumenta de forma gradual, si un/a jugador/a opta por plantar más de un cultivo, los beneficios serán menores y vendrán acompañados de un mayor riesgo de pérdidas durante el año en el que se opte por plantar más de un cultivo.

En los años que se opta por monocultivo los beneficios son potencialmente mayores y los riesgos financieros menores, pero la salud de los polinizadores de la explotación se resentirá. Además, las explotaciones de monocultivo perderán 2 puntos de polinizador, para reflejar el impacto negativo que tienen los monocultivos en la salud de los servicios ecosistémicos. Por otra

parte, las explotaciones agrícolas que opten por plantar tres cultivos ganarán puntos de polinizador, lo que implica una mejora de la salud de los polinizadores de su explotación, pero con un costo económico asociado. Una vez que los/las jugadores/as hayan elegido cuántos cultivos desean plantar, deben prestar atención a sus decisiones y realizar el pago en ficha de moneda y/o en fichas de puntos de polinizador según corresponda. A continuación, el/la responsable de la sesión debe lanzar el dado para definir el clima económico del año. Un lanzamiento de 1 o 2 da un rendimiento menor, mientras que un lanzamiento de 3, 4, 5 o 6 da un rendimiento mayor.

**RECOMENDACIÓN 1**

*En lugar de intentar trabajar con pérdidas/ganancias netas (que suele ser el instinto de la gente), hemos descubierto que es más eficaz que los/las jugadores/as paguen el dinero y los puntos de polinizador necesarios al principio de una “ronda” después del Paso 1 y que luego reciban sus ganancias al final de la ronda. Esto también refleja más fielmente la experiencia real de los agricultores, que pagan semillas y los productos químicos, pero no ven los resultados hasta la cosecha.*

**Tabla 2**

Medidas opcionales adicionales con su respectivo impacto en los beneficios y los puntos de polinizador

Medidas adicionales	Efecto en el beneficio	Puntos de polinizador
Dedicar tierra a los polinizadores	-\$1	+2
Introducir lindes	-\$1	+1
Agricultura sin productos químicos	-\$2	+3
Uso de pesticidas	+\$1	-2

**Paso 2: ▲**

En el primer paso se toman las decisiones básicas sobre la plantación, mientras que en el segundo paso los/las jugadores/as deciden si desean introducir medidas adicionales para mejorar su puntuación en salud de los polinizadores (puntos de polinizador) o sus beneficios (Tabla 2). Estas medidas adicionales se basan en prácticas reales empleadas por el sector agrario y se ponderan en consecuencia. Los responsables de la sesión deben tener en cuenta que los costos o beneficios de estas medidas adicionales afectan a la rentabilidad de cada explotación agrícola y no requieren un desembolso al principio de la ronda. Los/las jugadores/as pueden optar por aplicar varias medidas adicionales si lo desean, con una excepción: los/las jugadores/as no pueden optar por introducir la agricultura sin productos químicos y al mismo tiempo optar por utilizar pesticidas, ya que estas dos medidas son contradictorias. Además, los/las jugadores/as no pueden obtener un rendimiento negativo, por lo que cualquier medida adicional que resulte en un rendimiento menor que \$0, resultará en una ausencia de beneficio. Una vez que hayan decidido las medidas adicionales, los/las jugadores/as deben prestar atención a las elecciones que han hecho y a los respectivos costos y beneficios de estas decisiones. Mientras los grupos se familiarizan con el formato del juego, recomendamos que durante las dos primeras rondas solamente se realicen los Pasos 1 y 2.

**RECOMENDACIÓN 2**

*Los responsables de la sesión pueden seleccionar que los eventos ocurran al azar o estratégicamente, dependiendo de cómo los/las jugadores/as estén realizando la partida. Por ejemplo, si los/las jugadores/as han monopolizado repetidamente el cultivo de una sola cosecha (por ejemplo, colza), puede ser instructivo introducir el evento “La colza ha crecido extremadamente bien este año”.*

**Paso 3 (eventos): ▼**

A partir de la ronda 3, los/las responsables de sesión introducirán un evento (Tabla 3) después del Paso 2. Estos eventos representan el impacto de los cambios medioambientales locales (por ejemplo, inundaciones, plagas, o enfermedades), los cambios en la política gubernamental (por ejemplo, la introducción de incentivos financieros), los cambios económicos (por ejemplo, los impactos de la oferta y la demanda y la percepción pública) y los cambios introducidos por los competidores locales (por ejemplo, las explotaciones agrícolas vecinas). Los/las jugadores/as deben fijarse en las repercusiones de estos acontecimientos en términos de costos o beneficios para sus explotaciones, que a menudo dependerán de las decisiones que hayan tomado en los pasos 1 o 2 de la partida.

**Tabla 3**

Una selección de eventos y su posible impacto, a introducir por el/la responsable de la sesión tras el Paso 2.

Evento	Impacto del evento
Tu granja se ha inundado.	Todo el mundo recupera solamente un máximo de \$2, menor cualquier deducción obtenida de las medidas adicionales introducidas en el paso 2.
Ha aparecido una enfermedad que mata la colza.	Si plantas un cultivo, obtienes un beneficio de \$0. Si plantas dos cultivos, obtienes \$2. Si plantas tres cultivos, obtienes \$4.
El Gobierno concede una subvención a las explotaciones con tierras dedicadas a los polinizadores.	Si este año decides dedicar algo de tierra a los polinizadores, ganarás \$2 extra.
Las plantas de tomate han sido atacadas por escarabajos.	Si has utilizado pesticidas este año, tus cultivos son seguros y tu beneficio es de \$7. Si has plantado un solo cultivo (por ejemplo, colza), tu beneficio es de \$7. Si has plantado dos cultivos, tu beneficio es de \$3. Si has plantado tres cultivos, tu beneficio es de \$4.
Noticias de última hora: ¡El declive de los polinizadores es noticia! El público opta por comprar productos respetuosos con los polinizadores.	Si tienes 4 o menos puntos de polinizador, pierdes \$2 de tus beneficios. Si tienes 9 o más puntos de polinizador, ganas un extra de \$2. Si tienes entre 5 y 8 puntos de polinizador, tu beneficio no varía.
Ha habido una ola de calor.	Todos pierden 2 puntos de polinizador.
El gobierno ofrece subvenciones para la agricultura ecológica.	Si tienes más de 7 puntos de polinizador, obtienes un pago de \$3.
Un famoso ha tuiteado (incorrectamente) que las fresas no son saludables. Ya nadie quiere comprarlas.	Si plantaste uno o dos cultivos, esto no te afecta. Si plantaste tres cultivos, pierdes \$1 de tus beneficios.
La colza ha crecido muy bien este año. La oferta ha superado a la demanda y su valor es inferior al habitual.	Si has plantado un cultivo, tu rendimiento se reduce en \$2. Si has plantado dos cultivos, tu margen de beneficios se reduce en \$1. Si has plantado tres cultivos, tu rendimiento no se ve afectado.
Un agricultor vecino ha traído abejas melíferas para mejorar la polinización. Están superando a los polinizadores locales.	Todos pierden 2 puntos de polinizador.
El invierno fue muy frío, lo que provocó un descenso del número de abejorros. Los abejorros son necesarios para polinizar las plantas de tomate.	Todos pierden 1 punto de polinizador. Los que plantaron tomates también pierden \$2 de sus beneficios.

### RECOMENDACIÓN 3:

*Animamos encarecidamente a los responsables de las sesiones a que incorporen sus propias ideas para los eventos que puedan estar más relacionados con la cultura popular, los acontecimientos del mundo real o las condiciones locales. Estaremos encantados/as de escuchar sus ideas. Finalización de una ronda: Una vez establecidos los impactos del evento, los/las jugadores/as deben calcular el rendimiento que le corresponde a su granja, tanto en términos de rendimiento económico, como en puntos de polinizador. Los/las jugadores/as deben tomar las fichas de moneda y las fichas de puntos de polinizador correspondientes y establecer el nuevo valor de su explotación agrícola. Finalización del juego: Al final de las siete rondas, los/las jugadores/as deben sumar sus fichas de moneda y de puntos de polinizador. La salud del polinizador de su explotación agrícola se suma al valor global final de su explotación. Así, por cada 3 puntos de polinizador obtenidos por el/la jugador/a, él/ella añade un dólar adicional al valor de su explotación agrícola. El/la jugador/a/equipo cuya explotación agrícola tenga el mayor valor final, gana.*

**Reflexiones finales y debate:**

Este juego se ha diseñado para ilustrar las dificultades a las que se enfrentan las comunidades de agricultores y para demostrar, de forma simplificada, lo difícil que puede ser equilibrar los beneficios económicos y la salud de los polinizadores con economías fluctuantes en la agricultura. También pretende llamar la atención sobre las repercusiones que las políticas gubernamentales pueden tener en las prácticas agrícolas, así como sobre los efectos impredecibles de los factores medioambientales y socioeconómicos en los beneficios y la salud de los polinizadores. Se anima a los responsables de las sesiones a que las cierren a través de discusiones sobre los temas abordados. Algunas sugerencias sobre puntos de discusión y conclusiones clave se encuentran en la tabla 4.

También sería beneficioso debatir por qué cada acontecimiento que el alumnado encontró en el juego afecta a los puntos de polinizador. Esto podría hacerse durante el juego, cuando se produce un acontecimiento o después, como parte del debate de síntesis. Animamos a los responsables de las sesiones a que, en la medida de lo posible, establezcan vínculos con la evolución y la ecología (por ejemplo, se habló de las abejas melíferas en un acontecimiento) y observar los efectos que los cambios sociales pueden tener en el mundo natural para mostrar al alumnado el alcance que pueden tener los efectos de sus decisiones (por ejemplo, el acontecimiento del tuit de un famoso).

A continuación, y en la tabla 4, se proponen algunas sugerencias para el debate. Prevemos que los estudiantes se quejarán de la “justicia” cuando no obtengan los beneficios que esperaban. Creemos que esta sería una excelente oportunidad para debatir con ellos cómo la naturaleza no es justa, ya que los fenómenos naturales dejan a los/las agricultores/as en desventaja, viéndose obligados a hacer lo que pueden para mantenerse a flote, aunque sea a expensas de la salud de los polinizadores.

**(iii) Vincular el juego a la evolución biología**

Muchos de los “acontecimientos” de este juego tienen resultados que pueden parecer contraintuitivos. Sin embargo, en estos escenarios, los resultados se basan en conceptos de biología evolutiva (principalmente especialización, generalismo y coevolución). Por lo tanto, serían excelentes puntos de debate o de profundización.

Por ejemplo, si un/a agricultor/a vecino incorpora abejas melíferas, el número de polinizadores alrededor de sus explotaciones agrarias aumentaría, por ello el alumnado podría esperar que sus puntos de polinizador aumentaran. Sin embargo, esto se traduce en una reducción de los puntos de polinizador. Es posible que se desee analizar esta cuestión con los estudiantes. Inundar el entorno con abejas generalistas importadas puede hacer que superen en competencia a las especies autóctonas especialistas (Ings et al., 2006) y dominen el entorno (Garibaldi et al., 2021). Si los polinizadores especialistas llegan a estar en peligro de extinción o se extinguen, puede tener consecuencias para las plantas especializadas, ya que los invasores generalistas pueden no polinizarlas o hacerlo de forma ineficaz (Larsson, 2005).

Un ejemplo de especialización de los polinizadores es la polinización por zumbido (polinización vibratoria). Algunas plantas, como los tomates, se polinizan mucho mejor cuando se utiliza la polinización por zumbido (Cooley y Vallejo-Marín, 2021). Esto también está relacionado con otro acontecimiento del juego (un invierno frío que provoca la disminución de

**RECOMENDACIÓN 4**

*Es posible que los responsables de la sesión deseen construir una tabla de clasificación de los/las jugadores/as/equipos que se actualice cada dos rondas para aumentar el entusiasmo y la actitud competitiva del alumnado. Si se desea incluir esta opción, prevéase más tiempo.*

abejorros). Cabe destacar que otro juego ofrece la oportunidad de explorar otras especializaciones en plantas y polinizadores y las utilizada para relacionar plantas especialistas con sus polinizadores (véase

).

Estas especializaciones surgen a través de un proceso de coevolución, en el que las plantas y los polinizadores evolucionan en respuesta mutua (Johnson y Anderson, 2010). La coevolución es un tema fascinante para explorar con los estudiantes, ya que suelen responder bien a los apasionantes rasgos seleccionados por este proceso. Los siguientes artículos sugieren diversas formas de guiar al alumnado hacia la comprensión de la coevolución: Brockhurst (2010), Gibson et al. (2015), Thanukos (2010).

Otro aspecto de debate que se podría explorar con los estudiantes es la idea de la resistencia diferencial a las enfermedades entre especies. Esto es relevante para muchos de los acontecimientos (las abejas importadas pueden ser portadoras de enfermedades; las plantas de tomate y los escarabajos; la colza y enfermedades). Considérese realizar un experimento mental con el alumnado que incluya la modelización del proceso de adaptación de las especies salvajes a una nueva enfermedad.

Puede pedirse al alumnado que imagine una gran población de una especie de polinizador silvestre (si es necesario, dibuje los individuos de esa población en una pizarra y utilícela para representar el cambio a través de las generaciones). La mayoría de los individuos de esa especie no son resistentes a una determinada enfermedad, mientras que unos pocos de ellos portan alelos que les confieren resistencia a esa enfermedad (puede representar a estos individuos con un color diferente, por ejemplo) debido a la variación natural dentro de la población.

Pregunte al alumnado qué creen que ocurrirá con esta población durante las generaciones siguientes a la introducción de la enfermedad. En la primera generación se espera que la mayoría de los individuos que no portan el alelo de resistencia mueran. Los portadores del alelo de resistencia sobrevivirán y producirán descendencia, de la que se

espera que la mayoría sea portadora de los alelos de resistencia.

Sin embargo, no todos estos descendientes serán necesariamente portadores del alelo de resistencia; por lo tanto, los descendientes no resistentes morirán. En general, es probable que aumente la frecuencia de la resistencia.

Repita estos pasos a través de algunas generaciones y discuta con los estudiantes el impacto de este proceso: i) el número de polinizadores silvestres individuales durante los años siguientes a la introducción, así como el impacto de esto en términos de producción de fruta; ii) la frecuencia de individuos resistentes en la población. Discuta también qué ocurriría si no hubiera diversidad intraespecífica en la población inicial de polinizadores silvestres. Esta actividad explora el proceso de selección natural, que se explica en el siguiente vídeo:

Aunque este vídeo utiliza la depredación como presión selectiva, está claro cómo la depredación actúa como presión selectiva del mismo modo que lo haría una enfermedad. En este vídeo, el fenotipo de color oscuro es más apto, al igual que el alelo de resistencia de nuestro ejemplo.

**Tabla 4**

Sugerencias para el debate posterior e indicaciones para facilitar la comprensión de por qué esta cuestión sociocientífica es tan compleja desde una perspectiva social. A continuación, se recoge una selección de eventos y su impacto, que el/la responsable de la sesión de juego puede introducir después del Paso 2.

Puntos de debate	Consideraciones clave
<b>¿Tienen realmente los famosos tanto impacto en la sociedad? (incluye un enlace a un evento tuiteado por famosos).</b>	Para debatir este punto, pueden buscarse algunos casos nacionales reales de famosos que no apoyen la ciencia y comentarlos con el alumnado. Incluso se podría encargar a los estudiantes la tarea de encontrar algunos ejemplos. Por ejemplo, sobre negocios de medicina alternativa (véase p.ej. Arnocky et al., 2018).
<b>¿Por qué el Gobierno o los responsables políticos concederían subsidios o subvenciones a las explotaciones agrarias que respeten los polinizadores?</b>	Aquí se podría fomentar un debate sobre quién elige a los que están en el poder. Considérense los compromisos que asumen los gobiernos para preservar el medio ambiente. ¿Qué importancia tiene la opinión pública para los gobiernos?
<b>Aparte del rendimiento de los cultivos, ¿hay algo más que pueda afectar a los beneficios económicos de los agricultores?</b>	En este punto se puede discutir los costos económicos iniciales de las medidas adicionales. Es posible que el alumnado tenga otras ideas válidas. Por ejemplo: <ul style="list-style-type: none"> <li>● Los pesticidas tienen un costo inicial asociado.</li> <li>● Tierra dedicada a los polinizadores: ¿Hasta qué punto sería eficaz en la vida real hacerlo sólo durante 1 año? ¿Se necesitan varios años para “recuperar la naturaleza”?</li> <li>● ¿Hay que pagar para plantar flores silvestres en los campos/terrenos dedicados a los polinizadores? Hay un costo por las semillas de flores silvestres y una reducción del beneficio por no cultivar en estas tierras.</li> </ul>
<b>En este juego, cultivabas de uno a tres cultivos y podías elegir entre cuatro posibles medidas especiales para aumentar el rendimiento o los puntos de polinización. En la vida real, ¿crees que la agricultura es así? ¿Hay algo más en lo que los agricultores deban pensar que no se haya representado en este juego (es decir, las limitaciones de este modelo)?</b>	El alumnado puede tener muchas ideas válidas al respecto. Algunos ejemplos de aspectos de la agricultura que no están representados en este modelo son: <ul style="list-style-type: none"> <li>● Para un/a agricultor/a es más sencillo y eficiente cultivar un solo tipo de cosecha; sin embargo, esta estrategia también conlleva un mayor nivel de riesgo (por ejemplo, debido a la susceptibilidad a enfermedades o sequías; Balough, 2021). Al cultivar varios tipos de productos, los agricultores deben tener en cuenta los plazos de las cosechas, el equipo necesario, el impacto medioambiental y la posibilidad de venta (Navarette et al., 2015).</li> <li>● Algunas medidas especiales tienen un coste económico inicial importante, por lo que los/las agricultores/as tienen que poder permitírselas.</li> <li>● Los distintos cultivos valen distintas cantidades de dinero.</li> </ul>

## **2.6 Otras perspectivas sobre cómo utilizar esta actividad en otros contextos o con participantes de otras edades.**

Esta actividad podría modificarse para adaptarla a una serie de cuestiones que abarquen otras crisis ecológicas, grupos de interés y entes gubernamentales (por ejemplo, la disminución de la pesca, los pescadores y un gobierno nacional, respectivamente). La modificación requeriría que los responsables de las sesiones investiguen las respectivas crisis ecológicas y editen la sección de eventos en consecuencia.

Sería muy interesante jugar a este juego con alumnado que tiene diferentes enfoques/disciplinas. Sugerimos dos formas alternativas de hacerlo:

- i) jugando a este juego con alumnos/as más mayores y con una mayor especialización se podrían mantener debates multidisciplinarios;
- ii) el alumnado de mayor edad que se haya especializado podría actuar como mentor/a especialista y guiar a los equipos debatiendo con ellos las repercusiones de los acontecimientos.

Cualquier aspecto de este juego puede editarse para adaptarlo a la actualidad o a diferentes grupos de edad. Por ejemplo, se pueden incorporar nuevos acontecimientos, añadir más opciones para medidas adicionales y cambiar los cultivos utilizados como ejemplo.

Animamos encarecidamente a los/las educadores/as a realizar estos cambios para maximizar la relevancia de los escenarios en su país/localidad.

### 3. REFERENCIAS

- Arnocky, S., Bozek, E., Dufort, C., Rybka, S., & Hebert, R. (2018). Celebrity opinion influences public acceptance of human evolution. *Evolutionary Psychology*, 16(3).
- Balough, A. (2021). The rise and fall of monoculture farming. Horizon. The EU Research and Innovation Magazine. Available at
- Blacquiè, T., Smagghe, G., van Gestel, C. A. M., & Mommaerts, V. (2012). Neonicotinoids in bees: A review on concentrations, side-effects and risk assessment. *Ecotoxicology*, 21(), 973–992.
- Botías, C., David, A., Horwood, J., Abdul-Sada, A., Nicholls, E., Hill, E., & Goulson, D. (2015). Neonicotinoid residues in wildflowers, a potential route of chronic exposure for bees. *Environmental Science and Technology*, 49(), 12731–12740.
- Brockhurst, M. (2010). Using microbial microcosms to study host-parasite coevolution. *Evolution: Education and Outreach*, 3() 14–18.
- Brosi, B. (2016). Pollinator specialization: From the individual to the community. *New Phytologist*, 210(4), 1190–1194.
- Butler, D. (2018). Scientists hail European ban on bee-harming pesticides. *Nature*.
- Cane, J. (2008). Pollinating bees crucial to farming wildflower seed for U.S. habitat restoration. In R. James, & T. Pitts-Singer (Eds.), *Bee pollination in agricultural ecosystems*. Oxford University Press.
- Chittka, L., Thomson, J., & Waser, N. (1999). Flower constancy, insect psychology, and plant evolution. *The Science of Nature*, 86(8), 361–377.
- Cooley, H., & Vajello-Marín, M. (2021). Buzz-pollinated crops: A global review and meta-analysis of the effects of supplemental bee pollination in tomato. *Journal of Economic Entomology*, 114(2), 505–519.
- Culley, T., Welle, S., & Sakai, A. (2002). The evolution of wind pollination in angiosperms. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(8), 361–369.
- Darwin, C. (1876). *The effects of cross and self fertilisation in the vegetable kingdom*. J Murray.
- Garibaldi, L., Pérez-Méndez, N., Cordeiro, G., Hughes, A., Orr, M., Alves-dos-Santos, I., Freitas, B., Freitas de Oliveira, F., LeBuhn, G., Bartomeus, I., Aizen, M., Andrade, P., Blochtein, B., Boscolo, D., Drumond, P., Gaglianone, M., Gemill-Herren, B., Halinski, R., Krug, C., Motta Maués, M., Piedade Kiill, L., Pinheiro, M., Pires, C., & Viana, B. (2021). Negative impacts of dominance on bee communities: Does the influence of invasive honey bees differ from native bees? *Ecology*, 102(12), e03526.
- Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M. A., Bommarco, R., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Klein, A. M. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science*, 339(6127), 1608–1611.
- Gibson, A., Drown, D., & Lively, C. (2015). The red queen's race: An experimental card game to teach coevolution. *Evolution: Education and Outreach*, 8(10), .
- Graystock, P., Blane, E. J., McFrederick, Q. S., Goulson, D., & Hughes, W. O. H. (2016). Do managed bees drive parasite spread and emergence in wild bees? *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife*, 5(1), 64–75.
- Halder, S., Ghosh, S., Khan, R., Ali Kan, A., Perween, T., & Hasan, A. (2019). Role of pollination in fruit crops: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 8(5), 695–702.
- Hoehn, P., Tscharnkte, T., Tylanakis, J., & Steffan-Dewenter, I. (2008). Functional group diversity of bee pollinators increases crop yield. *Proceedings Biological Sciences*, 275(), 2283–2291.
- Ings, T., Ward, N., & Chittka, L. (2006). Can commercially imported bumble bees outcompete their native conspecifics? *Journal of Applied Ecology*, 43(5), 940–948.
- IPBES. (2016). *The assessment report on pollinators, pollination and food production*. Retrieved from
- Johnson, S., & Anderson, B. (2010). Coevolution between food-rewarding flowers and their pollinators. *Evolution: Education and Outreach*, 3(), 32–39.
- Kassen, R. (2002). The experimental evolution of specialists, generalists, and the maintenance of diversity. *Journal of Evolutionary Biology*, 15(2), 173–190.

- Khadse, A., & Rosset, P. M. (2019). Zero budget natural farming in India – From inception to institutionalization. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 43(1), 7–8.
- Klein, A. -M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings Biological Sciences*, 274(1608), 303–313.
- Kudo, G., & Cooper, E. J. (2019). When spring ephemerals fail to meet pollinators: Mechanism of phenological mismatch and its impact on plant reproduction. *Proceedings of the Royal Society B*, 286(1904).
- Kudo, G., & Ida, T. Y. (2013). Early onset of spring increases the phenological mismatch between plants and pollinators. *Ecology*, 94(10), 2311–2320.
- Kula, A. (2015). *Experimental evolution of specialism in a wild virus*. Loyola University Chicago.
- Larsson, M. (2005). Higher pollinator effectiveness by specialist than generalist flower-visitors of unspecialized *Knautia arvensis* (Dissacaceae). *Oecologia*, 146(3), 394–403.
- Lister, B. C., & Garcia, A. (2018). Climate-driven declines in arthropod abundance restructure a rainforest food web. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(44), .
- Miller-Struttman, N., Geib, J., Franklin, J., Kevan, P., Holdo, R., Ebert-May, D., Lynn, A., Kettenbach, J., Hedrick, E., & Gaeln, C. (2015). Functional mismatch in a bumble bee pollination mutualism under climate change. *Science*, 349(6255), 1541–1544.
- Mallinger, R. E., Gaines-Day, H. R., & Gratton, C. (2017). Do managed bees have negative effects on wild bees?: A systematic review of the literature. *PLoS ONE*, 12(12), .
- Navarette, M., Dupré, L., & Lamine, C. (2015). Crop management, labour organisation and marketing: Three key issues for improving sustainability in organic vegetable farming. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 13(3), 257–274.
- Oliver, T., Heard, M., Isaac, N., Roy, D., Proctor, D., Eigenbrod, F., Freckleton, R., Hector, A., Orme, D., Petchey, O., Proença, V., Raffaelli, D., Suttle, B., Mace, G., Matín-López, B., Woodcock, B., & Bullock J. (2015). Biodiversity and resilience of ecosystem functions. *Trends in Ecology and Evolution*, 30(11), 673–684.
- Ollerton, J., Winfree, R., & Tarrant, S. (2011). How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos*, 120(3), 321–326.
- Powney, G. D., Carvell, C., Edwards, M., Morris, R. K. A., Roy, H. E., Woodcock, B. A., & Isaac, N. J. B. (2019). Widespread losses of pollinating insects in Britain. *Nature Communications*, 10(1038), .
- Pyke, G., Thomson, J., Inouye, D., & Miller, T. (2016). Effects of climate change on phenologies and distributions of bumble bees and the plants they visit. *Ecosphere*, 7(3), .
- Sonne, C., & Alstrup, A. O. (2019). Denmark defies EU neonicotinoid ban. *Science*, 363(6430), 938.
- Stork, N. E. (2017). How many species of insects and other terrestrial arthropods are there on Earth? *Annual Review of Entomology*, 63(1), 31–45.
- Tepedino, V. (1981). The pollination efficiency of the squash bee (*Peponapis pruinosa*) and the honey bee (*Apis mellifera*) on summer squash (*Cucurbita pepo*). *Journal of the Kansas Entomological Society*, 54(2), 359–3717.
- Thanukos, A. (2010). Coevolution in the classroom. *Evolution: Education and Outreach*, 3(1), 71–77.

## 4. APÉNDICE

En puede encontrar un archivo de PowerPoint creado para ayudarle a realizar el juego en su clase. Contiene instrucciones sencillas y varias páginas de “eventos”

Por favor, invierta un poco de tiempo en familiarizarse con este material, dado que puede que desee excluir algunos de estos “eventos” o editar/eliminar el elemento competitivo de la diapositiva de “tabla del líder” situada al final.



## Capítulo 11

# Los impactos de la radiación solar en nuestra salud



# Los impactos de la radiación solar en nuestra salud

**Rita Ponce<sup>1,2</sup>,  
Susana Carneiro<sup>3</sup>,  
André Rodrigues<sup>4</sup>,  
Mustafa Sami Topcu<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ciências da Vida, Escola de Psicologia e Ciências da Vida, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisbon, Portugal

<sup>2</sup>iNOVA Media Lab/ICNOVA, Universidade Nova de Lisboa, Lisbon, Portugal

<sup>3</sup>Secondary School of Trofa, Portugal

<sup>4</sup>Independent researcher

<sup>5</sup>Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey

## Resumen:

La correlación entre la distribución geográfica del color de la piel humana y la intensidad de la radiación solar es uno de los ejemplos más notables de cómo la selección natural ha moldeado la evolución de nuestra especie y la divergencia entre las poblaciones humanas. Las presiones selectivas que dan forma a esta distribución todavía están actuando hoy en día, lo que resulta en problemas de salud para las personas cuyo color de piel no está adaptado al entorno en el que viven. Los hábitos saludables de exposición al sol dependen tanto del color de piel del individuo como del entorno en el que viven. Por lo tanto, las estrategias de comunicación en salud deben reconocer y reflejar esta diversidad. Sin embargo, aunque es una característica importante, a veces no se menciona el color de piel, posiblemente debido a una asociación histórica con el racismo. En este sentido, proponemos una actividad dirigida a estudiantes de 9º a 12º grado (14 a 18 años) en la que se les propone planificar e implementar una campaña de divulgación para informar a su comunidad escolar sobre los impactos en la salud de la radiación solar. Durante este proceso, los/as estudiantes aprenderán sobre la selección natural, cómo causa la divergencia entre poblaciones y cómo esta divergencia está relacionada con los procesos evolutivos. Además, los/as estudiantes explorarán los conceptos de subespecies y razas (y cómo este último no tiene un significado biológico real). También debatirán las consecuencias éticas y médicas de utilizar información étnica para diagnosticar y comunicar problemas de salud mientras aprenden sobre la naturaleza de la ciencia. Además, el alumnado desarrollará prácticas científicas como hacer preguntas y obtener, evaluar y comunicar información.

### **PALABRAS CLAVE**

*Educación en salud, evolución humana, racismo, color de piel, exposición a la luz solar.*

# 1. ¿QUÉ SABEMOS SOBRE ESTA CUESTIÓN SOCIO-CIENTÍFICA Y CÓMO PODEMOS INFORMAR SOBRE ELLA CON UNA PERSPECTIVA EVOLUTIVA?

El 1 de junio de 1858, la teoría de la evolución por selección natural de Charles Darwin y Alfred Russell Wallace se presentó en la Sociedad Linneana de Londres. Esta idea revolucionaría no solo la biología, sino también la sociedad en su conjunto. Actualmente, la evolución es uno de los conceptos centrales de la biología y es esencial para comprender el mundo que nos rodea y nuestros orígenes, con implicaciones a la hora de entender nuestra salud y bienestar. Una contribución importante de la biología evolutiva ha sido permitirnos comprender el origen y las implicaciones del color de piel humano. El color del cuerpo es una característica importante en el reino animal que desempeña muchos roles, desde la selección sexual hasta la adaptación al entorno.

El color de la piel es una de las características que muestra la mayor variación entre las poblaciones humanas, con una correlación significativa entre el grado de pigmentación de la piel de las poblaciones nativas de una región y la intensidad de la radiación ultravioleta (UV). Las pruebas actuales sugieren que esta distribución se debe a diferentes presiones selectivas que actuaron sobre las poblaciones humanas ancestrales debido a la variación latitudinal en la intensidad y estacionalidad de la radiación UV (Crawford et al., 2017; Jablonski y Chaplin, 2000).

Cuando la radiación UV llega a nuestra piel (especialmente UVB), parte de la energía se utiliza para producir vitamina D. La vitamina D es un nutriente esencial para el desarrollo humano y tiene efectos importantes en la salud humana. Sin embargo, la exposición intensa a la radiación UV puede causar daño celular, incluido daño al ADN y la destrucción de nutrientes (por ejemplo, ácido fólico) que son esenciales para la supervivencia y

reproducción de los individuos.

Las capas más externas de la piel sirven como barrera contra los efectos dañinos de la radiación solar, disminuyendo así la intensidad de la radiación UV que llega a las capas más internas de la piel y del cuerpo. Los melanocitos, que son células ubicadas en la capa basal de la epidermis, producen un protector solar natural conocido como melanina, capaz de absorber y disipar entre el 50 y el 75% de la radiación UV incidente (Brenne y Hearing, 2007; Solano, 2020).

En los seres humanos, se producen dos tipos de melanina en los melanocitos: (a) eumelanina marrón/negra, que tiene una mayor capacidad para absorber y proteger contra la radiación UV; (b) feomelanina roja/amarilla más clara, que tiene una menor capacidad para absorber y proteger contra la radiación UV. Además de proteger contra la radiación UV, la melanina también es responsable de la pigmentación de la piel, que depende de la ubicación, la cantidad total y la proporción de los dos tipos de melanina producidos. Es importante destacar que la distribución del color de la piel en el planeta se debe a esta función dual de la melanina (es decir, pigmentación y protección) (Schlessinger et al., 2021).

La especie humana se originó en África, cerca del ecuador, donde la intensidad de la radiación UV (tanto UVA como UVB) es alta durante todo el año. Sin ropa o protector solar, la principal barrera contra los efectos nocivos de la radiación UV en la piel era la melanina (especialmente la eumelanina). Por lo tanto, los individuos que la tenían en mayor cantidad sobrevivían más tiempo y, lo que es más importante, dejaban más descendientes que también llevarían los genes de sus progenitores que codificaban un mayor contenido de melanina. Así, en cada generación, los individuos con un tono de piel más oscuro se beneficiaban. Con el tiempo, debido a la selección natural, el número de individuos con piel más oscura aumentó en las poblaciones ecuatoriales.

Aunque una mayor cantidad de melanina en la piel reduce la cantidad de radiación UVB disponible para producir vitamina D, la alta intensidad de este tipo de radiación durante todo el año en esta área del mundo permitiría aún la síntesis necesaria de esta molécula.

Sin embargo, cuando los humanos comenzaron a dispersarse por todo el mundo, comenzaron a vivir en áreas donde la radiación UV (especialmente la UVB) es menos intensa y tiene importantes variaciones estacionales. De hecho, en algunas áreas de Asia, Europa y América, la radiación UVB incidente no es suficiente para producir la cantidad necesaria de vitamina D durante la mayoría de los meses del año. Es importante destacar que esta producción es mucho menor en individuos con un tono de piel más oscuro. Bajo estas circunstancias, cuanto más claro sea el tono de piel de los individuos, mayor será la probabilidad de producir suficiente vitamina D para su desarrollo saludable y reproducción. Así, a lo largo de las generaciones, los individuos con un tono de piel más claro dejaron más descendientes que heredaron su tono de piel más claro, un efecto que condujo a la despigmentación de las poblaciones más al norte. Esta despigmentación ocurrió de manera independiente en las poblaciones europeas y asiáticas, con genes diferentes involucrados en ambos casos (Crawford et al., 2017; Jablonski y Chaplin, 2017).

Sin embargo, más allá de la curiosidad histórica, ¿cuál es la relevancia de conocer los procesos evolutivos involucrados en la distribución actual del color de piel? La relevancia radica en que los factores que actuaron en el pasado para causar mortalidad y fertilidad selectiva en los humanos siguen actuando hoy en día, lo que provoca problemas de salud y fertilidad en individuos de todo el mundo. Comprender que la propensión a sufrir estos problemas depende, entre otros factores, del color de piel y del entorno en el que viven permite a las personas tomar decisiones informadas para prevenirlos. Es importante destacar que esto también es relevante

para los profesionales de la salud al comunicar información sobre estos temas.

Sin embargo, el color de piel humano es una característica que históricamente ha estado asociada a problemas sociales complejos como el racismo y la discriminación (Jones, 2001; Pew Research Center, 2021). La discusión sobre si y cómo utilizar características como el color de piel o el grupo étnico para respaldar diagnósticos y comunicar información sobre la salud sigue siendo un tema ampliamente debatido en comunidades científicas y médicas (Klonoff y Landrine, 2000; Landley et al., 2019). Los propósitos, la ética y los valores que deben guiar la forma en que se utiliza el color de la piel para prevenir o diagnosticar un problema de salud y comunicarse con el público son un debate importante en la sociedad. También es importante comprender las formas más apropiadas de hacerlo para evitar que las personas se sientan perjudicadas, avergonzadas o insultadas por la forma en que se comunica esta información.

En esta actividad, exploramos las relaciones entre la salud y la piel, particularmente la exposición solar y el color de piel. Uno de los factores que afecta las consecuencias de la exposición al sol es el color de piel del individuo. Por lo tanto, el uso de información étnica (por ejemplo, el color de piel) en el diagnóstico de enfermedades podría ser importante en la agenda de las comunidades médicas y científicas. Sin embargo, esta no es una decisión simple ni un debate fácil. Se podría argumentar que acceder y compartir esta información podría ofrecer oportunidades, como tomar medidas de salud preventivas, el diagnóstico temprano de enfermedades, identificar y aplicar métodos de tratamiento específicos para ciertos grupos étnicos e incluso trabajar en un empleo adecuado. Sin embargo, también se puede argumentar que esto implica clasificar a ciertos grupos como más fuertes o más débiles en relación con un problema de salud en particular, lo que podría llevar a posibles consecuencias no deseadas, como discriminación en la contratación o condiciones de

seguro de salud basadas en información genética compartida. Por lo tanto, “dejar de usar el color de piel para determinar la tendencia de salud” y “el diagnóstico temprano salva vidas” son dos perspectivas comunes y opuestas.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA PUESTA EN PRÁCTICA

### 2.1 Recursos materiales

Un proyector, una pizarra y computadoras con acceso a Internet (para que los/as estudiantes realicen investigaciones en línea).

Los guiones editables para los/as estudiantes, traducidos al español, se pueden encontrar al final de este capítulo. Su versión original en inglés puede consultarse en el siguiente enlace:

### 2.2 Temporalización

Esta actividad se puede llevar a cabo en cuatro sesiones de 90 minutos, que coinciden con las cuatro etapas de la actividad. Sin embargo, según el entorno en el que te encuentres, la duración puede ser extendida (como se describe en los consejos) o adaptada.

### 2.3 Alumnado

Audiencia objetivo sugerida: Estudiantes de noveno a duodécimo grado (de 14 a 18 años de edad).

## 2.4 Objetivos de aprendizaje

### 2.4.1 *Objetivos de aprendizaje relacionados con la creación de conciencia de la cuestión Socio-Científica*

- Comprender las relaciones dinámicas entre la ciencia, la tecnología y la sociedad.
- Muchas decisiones no se toman únicamente basadas en la ciencia, sino que dependen de los contextos sociales y culturales para resolver problemas.
- Argumentar, criticar y tomar decisiones informadas sobre los efectos de la ciencia y la tecnología en la sociedad.
- Reconocer la naturaleza compleja de las cuestiones relacionadas con la ciencia, basadas en la investigación científica, el escepticismo y las múltiples perspectivas.
- Discutir las dimensiones epistemológicas, éticas y morales de los problemas sociales relacionados con la ciencia en el contexto de la vida cotidiana.

### 2.4.2 *Objetivos de aprendizaje relacionados con las prácticas científicas*

- Proponer preguntas.
- Obtener, evaluar y comunicar información.
- Analizar e interpretar datos.
- Prácticas basadas en la investigación científica.

### 2.4.3 **Objetivos de aprendizaje relacionados con la evolución**

- Reconocer la existencia de diversidad heredable dentro de una misma especie.
- Describir el proceso de selección natural, mencionando explícitamente cómo el entorno afecta la supervivencia y reproducción de organismos con características distintas.
- Describir cómo las diferencias en las características ambientales pueden llevar a la divergencia de poblaciones.
- Discutir los conceptos de especie y subespecie como conceptos biológicos, su relación con los procesos evolutivos y el concepto de raza como un concepto no biológico.

### 2.4.4 **Objetivos de aprendizaje relacionados con la naturaleza de la ciencia**

- La ciencia se basa en evidencia empírica.
- El conocimiento científico está sujeto a revisión a la luz de nueva evidencia.
- La ciencia modela leyes, mecanismos y teorías para explicar fenómenos naturales.
- Los siguientes objetivos se encuentran en la interfase entre la naturaleza de la ciencia y las cuestiones socio-científicas:
- La ciencia y la ingeniería son influenciadas por la sociedad, mientras que la sociedad es influenciada por la ciencia y la ingeniería.
- No todas las preguntas pueden ser respondidas por la ciencia.
- El conocimiento científico puede predecir lo que puede suceder en sistemas naturales, pero no indica lo que debería suceder. Esto último implica ética, valores y decisiones humanas relacionadas con el uso del conocimiento.

### 2.4.5 **Objetivos de aprendizaje relacionados con las destrezas transversales**

- Analizar cuestiones desde múltiples perspectivas.
- Identificar aspectos de las cuestiones que están sujetos a una investigación continua.
- Explorar cómo la ciencia puede contribuir a abordar problemas de salud actuales en los seres humanos y comprender las limitaciones de la ciencia.
- Adoptar diferentes perspectivas.
- Habilidades de resolución colaborativa de problemas.

## 2.5 Descripción de la práctica educativa

### A. Antes de las sesiones

Si es posible, es deseable establecer conexiones con las asignaturas de artes y humanidades, ya que se pueden encontrar conexiones con estos currículos. Nuestra experiencia nos ha demostrado que, además de estas asignaturas, se puede fomentar la interdisciplinariedad efectiva con asignaturas como geografía, historia, filosofía, biología, artes, historia de la ciencia y educación religiosa. De ser necesario/pertinente, puede preguntarse al consejo escolar del centro si está de acuerdo con la carta de presentación destinada a los estudiantes (ver Figura 1) y que puede encontrarse en la página 2 del guion de los estudiantes (incluido al final del documento en su versión en español). Si están de acuerdo, se les pediría que la firmen.

**Figura 1**

Carta de presentación

Queridos/as estudiantes:

Os solicitamos vuestra ayuda para llevar a cabo un proyecto de divulgación relacionado con los impactos de la radiación solar en la salud, dirigido a la comunidad de su escuela. Con este proyecto, nuestro objetivo es alertar a las personas sobre las consecuencias de la exposición al sol e informarles sobre los cuidados que deben tener en su vida diaria para evitar problemas de salud. Con este propósito, nos gustaría pedirlos que investiguéis los impactos de la exposición al sol en la salud de las personas y que discutáis qué información consideráis pertinente divulgar, teniendo en cuenta las características del alumnado, profesorado y personal de la escuela, así como sus hábitos de vida. También os pedimos que penséis en cómo divulgar esta información. Después de recopilar información y discutirla, nos gustaría que desarrolléis un proyecto de divulgación dirigido a promover hábitos saludables en la comunidad de la escuela. Os agradecemos de antemano vuestra colaboración, que estamos seguros contribuirá a cambiar estilos de vida y, de esta manera, prevenir enfermedades y/o salvar vidas.

Atentamente,

En nombre del consejo escolar,

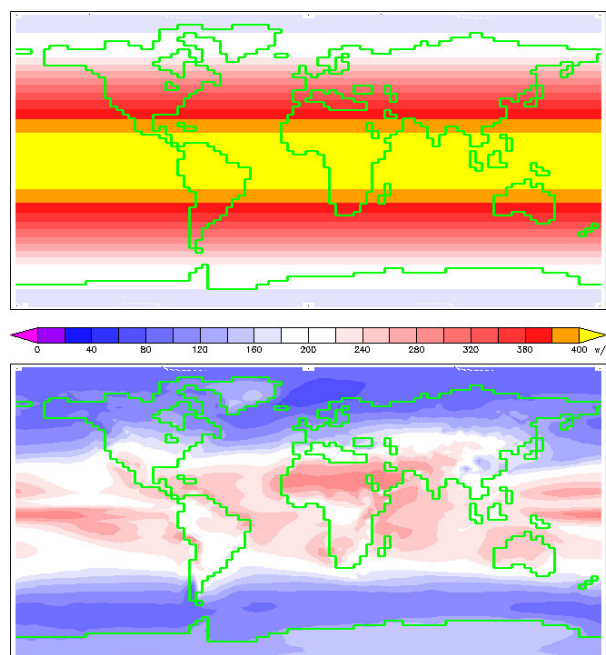
Lugar y fecha

(Firma)

## B. En la primera sesión (o primera fase) - Introducción

Presenta la carta anterior (Figura 1) para introducir el proyecto y el problema que se abordará.

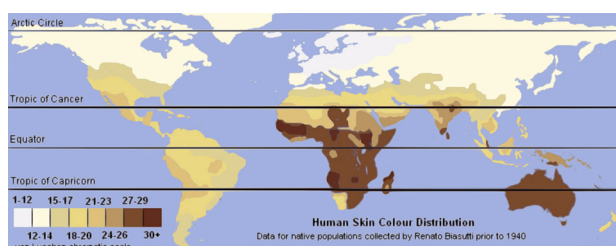
Luego, presenta los mapas de radiación UV y distribución del color de piel (Figuras 2 y recogidos en el guion del estudiante). Estos mapas proporcionarán información importante para su proyecto y ayudarán a contextualizar el tema de la exposición solar y sus impactos en la salud.

**Figura 2**

**Insolación anual que llega a la superficie de la Tierra después de pasar a través de la atmósfera.** Créditos: Esta imagen fue producida por William M. Connolle y utilizando datos de HadCM3 y está disponible en

Figura 3

**Distribución del color de piel en poblaciones indígenas antes de los procesos de colonización basada en la escala cromática de Von Luschian (datos de Biasutti, 1940; disputados).** Créditos: Esta imagen fue subida por primera vez a Wikipedia por The Ogre y fue remodelada y coloreada por Crisco 1492. Datos de: Jablonski y Chaplin (2000).



Para fomentar la discusión, puedes hacer las siguientes preguntas a los/as estudiantes:



¿Cuál es la relación entre la pigmentación de la piel y la radiación UV?



¿Qué crees que puede ser la causa de la distribución global del color de piel?

Luego, en grupos pequeños, pide a los/as estudiantes que primero piensen en estas preguntas por sí mismos. Luego, pídeles que compartan y discutan sus ideas dentro del grupo y registren las ideas del grupo en las secciones 'Tu idea' y 'Otras ideas en el grupo' (ver Tabla 1) de su guión.

Esta actividad puede tomar de 5 a 10 minutos. A continuación, pide a los grupos que compartan sus ideas con toda la clase, lo cual puede llevar otros 5 minutos.

Tabla 1

Hipótesis para la distribución del color de piel

Distribución del color de la piel
<p><b>¿Cuál es la relación entre la pigmentación de la piel y la radiación UV?</b></p> <p>Tu idea:</p> <p>Otras ideas del grupo:</p> <p>Después de ver el vídeo:</p>
<p><b>¿Cuáles crees que pueden ser las causas de la distribución mundial de los tonos de piel?</b></p> <p>Tu idea:</p> <p>Otras ideas del grupo:</p> <p>Después de ver el vídeo:</p>
<p><b>Preguntas y observaciones.</b></p>

Con tus estudiantes mira la Ted Talk de Nina Jablonski en

En este vídeo, la investigadora Nina Jablonski reflexiona sobre la evolución del color de piel y cómo los colores de piel son una adaptación a diferentes niveles de exposición a la radiación ultravioleta (UV).

En grupos pequeños, pide al alumnado que compare sus ideas iniciales con lo que se describió en el vídeo. Luego, pídeles que discutan estas diferencias dentro de sus grupos, registren sus nuevas ideas y respondan a las preguntas en la Tabla 1 de su guion. A continuación, pide a los grupos que compartan sus ideas con toda la clase y fomenta una discusión en el aula (esto puede llevar de 15 a 20 minutos).

En esta etapa, asegúrate de que los/as estudiantes comprendan que la selección natural no proporciona a los individuos lo que necesitan para sobrevivir, sino que actúa causando mortalidad y fertilidad reducida en individuos con características menos adaptadas. El color de piel es una consecuencia de la presencia de melanina, que puede tener dos roles importantes: proteger de los efectos perjudiciales de la luz UV e influir en la producción de vitamina D. Asegúrate también de que noten que esto está relacionado con problemas de salud que todavía afectan a las personas hoy en día.

En una discusión en clase, pregunta a los/as estudiantes qué saben sobre el impacto de la radiación solar en la salud humana, qué información sienten que les falta para prepararse para la campaña de divulgación y cómo buscarán esta información. Registra esta información en la pizarra y pide a cada grupo que la registre en la Tabla 2 de su guion. Luego, puedes motivarlos a decidir qué información buscarán hasta la próxima clase.

**Tabla 2**  
Recogiendo información adicional

Los impactos de la radiación solar en nuestra salud
¿Qué sabemos?
¿Qué necesitamos saber?
¿Cómo buscaremos esta información?
<p>¿Qué información has recopilado?</p> <p>¿Es fiable esta información? (Comprueba si tu fuente de información es fiable. Cuantas más casillas marques, se espera que la información sea más fiable. Consulta la prueba CRAP de fiabilidad en</p> <p>La información proviene de un artículo científico o libro.</p> <p>La fuente que encontré cita las fuentes de la información y proporciona una lista de referencias.</p> <p>La fuente es una organización bien conocida y creíble.</p> <p>Entrevisté a un especialista en el campo (en este caso, díganos quién y pídale que verifique lo que escribió) _____.</p> <p>La información que recopilé está respaldada por más de una fuente de información confiable.</p> <p>La información que recopilé parece imparcial, objetiva y sin sesgos.</p> <p>Es creíble porque... (proporcione una explicación adicional si es necesario). _____</p>

Trabajo autónomo: Cada grupo buscará la información requerida y preparará una presentación de 5 a 10 minutos (dependiendo del número de grupos en la clase) para compartir su información con los demás grupos.




### C. En la segunda sesión (o segunda fase) - Reflexión

Pide a cada grupo que presente la información que recopilaron a los demás grupos.

Después de las presentaciones, en una discusión en clase, pregunta al alumnado cuáles son los mensajes clave que deben formar parte de la campaña de divulgación que prepararán para su comunidad escolar con el fin de promover estilos de vida saludables, así como quién será su público objetivo (los estudiantes pueden completar luego la Tabla 3).

Después de elegir los mensajes clave, pídeles que discutan cómo los comunicarán a la comunidad escolar. Durante estas discusiones, presenta las siguientes preguntas (ver Tabla 4):

Preguntas relacionadas con problemas médicos y éticos:

-  ¿Deberíamos usar información sobre grupos étnicos para informar a las personas sobre cuestiones de salud?
-  ¿Cuál es la diferencia entre una 'raza', una 'subespecie' y una 'especie'? ¿Por qué no existen razas en los seres humanos?
-  ¿Cómo se relacionan estos conceptos con la evolución?

**Tabla 3**  
Mensajes clave y público objetivo.

Los impactos de la radiación solar en nuestra salud
¿Cuáles son los mensajes clave importantes para difundir en nuestra comunidad?
¿Cuál debería ser nuestro grupo(s) objetivo?

Preguntas que invitan a los estudiantes a replantearse la mala interpretación de la asociación entre el color de piel y la raza:



-  ¿Qué problemas éticos y médicos están asociados con la posición mantenida por los/las autores/as de los artículos?
-  ¿Qué buenas prácticas mencionan los/las autores/as de los artículos para comunicar cuestiones de salud humana que son diferentes para individuos con características distintas?

Tabla 4

Cómo comunicar sobre problemas de salud relacionados con el color de piel.

Los impactos de la radiación solar en nuestra salud
¿Cuál es la diferencia entre una “raza”, una “subespecie” y una “especie”? ¿Y por qué no existen razas en los seres humanos?
¿Cómo están relacionados estos conceptos con la evolución?
¿Deberíamos usar la información étnica para informar sobre cuestiones de salud?
¿Cuáles son los problemas éticos y médicos asociados con la posición mantenida por los/las autores/as?
¿Qué buenas prácticas mencionan los/las autores/as para comunicar cuestiones de salud humana que son diferentes para individuos con características distintas?
¿Qué decisión tomó tu grupo sobre la mejor manera de comunicar los problemas de salud? ¿Por qué tomasteis esa decisión? ¿Cuáles son los posibles problemas éticos y médicos que surgen de esta decisión?

Para una exploración más profunda de estos temas, es posible que también se desee introducir las siguientes preguntas (adaptadas de Sadler y Zeidler, 2005). Estas son adecuadas para estudiantes mayores y/o cuando se relaciona la actividad con otras materias (por ejemplo, filosofía).



¿Qué opinas sobre el uso de la información del color de piel para investigaciones médicas, comunicación, diagnóstico y tratamiento? ¿Qué factores influyeron en determinar tu posición sobre este tema?



Si alguien está de acuerdo con tu decisión, ¿cuáles podrían ser los argumentos que él/ella tenga?



Si alguien no está de acuerdo contigo, ¿qué argumentos podría sostener? ¿Por qué estás de acuerdo o en desacuerdo con el uso del color de piel para prevenir o diagnosticar un problema de salud y/o comunicar con el público? Explica tu posición.



¿Crees que el uso del color de piel, tal como se describe en este caso, está sujeto a algún tipo de reglas o principios morales? Si es así, ¿cómo afectó esto a tu toma de decisiones?



¿Sentiste de inmediato que el uso del color de piel para prevenir o diagnosticar un problema de salud y/o comunicar con el público era la acción correcta/incorrecta en este contexto? ¿Sabías tu posición sobre el tema antes de tener que reflexionar conscientemente sobre ello?



¿Hay algo más que deba saber sobre tu proceso de pensamiento o toma de decisiones al considerar este tema?

Divide a tus estudiantes en grupos y pídele a cada grupo que busque información para responder a las preguntas anteriores en los documentos compartidos con ellos. Pide a tus estudiantes que completen la Tabla 4 con la información que recopilaron. Basándose en eso, pide a los estudiantes que debatan y decidan si y cómo usarían la información étnica en su propuesta y las implicaciones que esta decisión podría tener.

#### D. En la tercera sesión (o tercera fase) - Desarrollo de la campaña de divulgación

Basándote en sus hallazgos y debates previos, pide a cada grupo que desarrolle una propuesta y un producto para la campaña de divulgación de la comunidad escolar utilizando la Tabla 5 para describirlo. Pide al alumnado que prepare una presentación de 5 minutos de su propuesta y la presenten a sus compañeros/as. Al presentar, el alumnado debe pedir retroalimentación de sus compañeros/as y considerar incorporarla en su producto final. Además, pídeles que planifiquen la campaña de divulgación y se aseguren de que tenga una alta visibilidad.

**Tabla 5**

Tabla para planificar tu propuesta de proyecto de divulgación.

Los impactos de la radiación solar en nuestra salud.
<p><b>¿Qué haremos en nuestra campaña de divulgación?</b> (describe aquí lo que haréis para vuestra campaña de divulgación)</p>
<p><b>¿Cómo comunicaremos los mensajes clave?</b> ? (describe aquí cómo tu proyecto comunicará los mensajes clave que deseáis compartir)</p>
<p><b>¿Por qué creemos que el formato que proponemos será efectivo para llegar a nuestro grupo(s) objetivo?</b></p>
<p><b>¿Qué necesitamos y cómo lo conseguiremos?</b></p>
<p><b>¿Cuál fue la retroalimentación de nuestros colegas y qué cambiamos en nuestra propuesta inicial para incorporarla?</b></p>

#### E. En la cuarta sesión (cuarta etapa) - Presentación de la campaña de divulgación:

En la sesión final, el alumnado debe presentar su producto final y plan para la campaña de divulgación.

### RECOMENDACIÓN 1

*El color de piel es un rasgo que a menudo no se analiza a fondo en el contexto escolar. Sin embargo, parece importante explorar la biología detrás de este rasgo muy diverso, abordar problemas de salud y promover una deconstrucción de las ideas racistas asociadas con el color de la piel. Según nuestra experiencia, el curso natural de una discusión abierta generalmente conduce a la deconstrucción de ideas racistas. Sin embargo, deseamos alertar a los líderes de la discusión que puede ser importante considerar que estamos abordando el color de piel como un rasgo físico y que la raza y otras clasificaciones son constructos sociales. Como tal, podría ser bueno estar preparado/a para hablar sobre el tema.*

### RECOMENDACIÓN 2

*Hemos implementado esta actividad en un entorno de educación formal (es decir, en el aula) y en un entorno de educación informal (es decir, en un club de ciencias) con estudiantes de noveno grado (14-15 años). Sin embargo, encontramos que esta actividad es adecuada para estudiantes de noveno a duodécimo grado (14 a 18 años). Además, según el entorno, esta actividad puede extenderse a más de cuatro sesiones. En particular, esto sería necesario si las sesiones son más cortas (por ejemplo, de 50 a 60 minutos). Si las sesiones son más cortas, es posible que se desee explorar un tema por sesión. Cuando se coordina la actividad con otros cursos, y en un entorno de aprendizaje basado en problemas, pueden ser necesarias más sesiones (consideramos que se puede extender hasta 12 sesiones de 60 minutos).*

### RECOMENDACIÓN 3

*Durante la primera sesión, al preguntar al alumnado que piense en la relación entre la pigmentación de la piel y la radiación UV, así como en las causas de la distribución global de los tonos de piel, los/las estudiantes pueden responder que los humanos desarrollaron características para protegerse de la radiación UV porque las necesitaban. Esto corresponde a una concepción alternativa frecuente sobre la evolución.*

### RECOMENDACIÓN 4

*Ten en cuenta que la forma en que Nina Jablonski presenta este tema en la charla TED puede reforzar la concepción alternativa frecuente de que la selección natural proporciona a los individuos lo que necesitan.*

### RECOMENDACIÓN 5

*Esta actividad puede servir como base para reflexiones interesantes cuando las escuelas tienen estudiantes de diversos orígenes, valorando la diversidad del grupo.*

**RECOMENDACIÓN 6**

*Cuando nos articulamos con cursos de arte, hemos complementado esta actividad con otra charla TED.*

(  
).

*Además, los/las estudiantes también intentaron utilizar diferentes técnicas de pintura para reproducir sus propios colores de piel.*

**RECOMENDACIÓN 7**

*En el guion del alumnado indicamos cuatro artículos como lectura sugerida. Aquí proporcionamos una lista de artículos que se pueden considerar como alternativa.*

### 3. REFERENCIAS

Barsh, G. S. (2003). What controls variation in human skin color? PLoS Biology, 1(1), e27.

Brenner, M., & Hearing, V. J. (2008). The protective role of melanin against UV damage in human skin. Photochemistry and Photobiology, 84(3), 539–549.

Crawford, N. G., Kelly, D. E., Hansen, M. E. B., Beltrame, M. H., Fan, S., Bowman, S. L., Jewett, E., Ranciaro, A., Thompson, S., Lo, Y., Pfeifer, S. P., Jensen, J. D., Campbell, M. C., Beggs, W., Hormozdiani, F., Mpoloka, S. W., Mokone, G. G., Nyambo, T., Meskel, D. W., ... Tishkoff, S. A. (2017). Loci associated with skin pigmentation identified in African populations. Science, 358(6365), eaan8433.

Jablonski, N. G., & Chaplin, G. (2000). The evolution of skin coloration. Journal of Human Evolution. 39, 57–106.

Jablonski, N. G., & Chaplin, G. (2017). The colours of humanity: The evolution of pigmentation in the human lineage. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 372 (1724): 20160349.

Jones, T. (2001). Shades of brown: The law of skin color. Duke Law Journal, 49(1487).

Klonoff E. A., & Landrine, H. (2000). Is skin color a marker for racial discrimination? Explaining the skin color-hypertension relationship. Journal of Behavioral Medicine, 23(4), 329–338.

Pew Research Center. (2021). Majority of Latinos say skin color impacts opportunity in America and shapes daily life.

Sadler, T. D., & Zeidler, D. L. (2005). Patterns of informal reasoning in the context of socioscientific decision making. Journal of Research in Science Teaching, 42(1), 112–138.

Schlessinger, D. I., Anoruo, M. D. & Schlessinger, J. (2022) Biochemistry, Melanin. [Updated 2022 May 8]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.

Solano, F. (2020). Photoprotection and skin pigmentation: Melanin-related molecules and some other new agents obtained from natural sources. Molecules, 25(7), 1537.

Laidley, T., Domingue, B., Sinsub, P., Harris, K. M. & Conley, D. (2019). New evidence of skin color bias and health outcomes using sibling difference models: A research note. Demography, 56 (2), 753–762.

### 4. AGRADECIMIENTOS:

Los autores agradecen a los estudiantes que participaron en esta actividad, a los revisores anónimos por sus aportaciones y a los editores que hicieron posible este libro, con un agradecimiento muy especial a Xana Sá Pinto por su contribución al convertir la idea de esta actividad en una realidad.

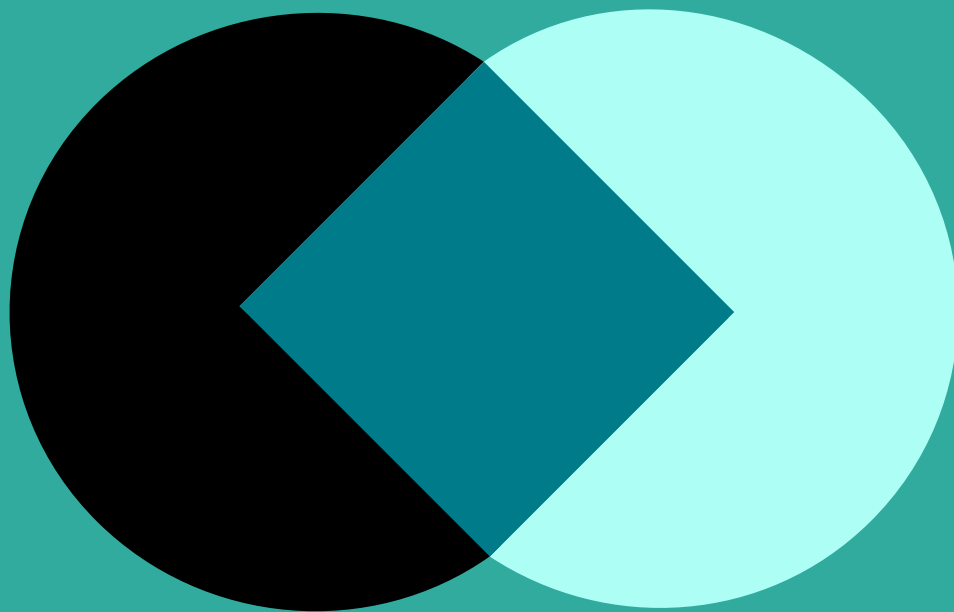
### 5. APÉNDICE

Los guiones editables en su versión en inglés se pueden encontrar en el siguiente enlace:



## Capítulo 12

**¿Se nos permite  
jugar con el ADN  
(humano)? Abordando  
las cuestiones  
sociocientíficas a través  
del diálogo filosófico -  
el caso de la ingeniería  
genética**



## ¿Se nos permite jugar con el ADN (humano)? Abordando las cuestiones sociocientíficas a través del diálogo filosófico - el caso de la ingeniería genética

**Jelle De Schrijver**<sup>1,2,</sup>

**Stefaan Blancke**<sup>3,</sup>

**Eef Cornelissen**<sup>2,</sup>

**Jan Sermeus**<sup>4,</sup> **Lynda Dunlop**<sup>5</sup>

<sup>1</sup>University of Antwerp, Belgium

<sup>2</sup>Odisee University of Applied Sciences, Belgium

<sup>3</sup>Tilburg University, the Netherlands

<sup>4</sup>KULeuven & Royal Observatory of Belgium

<sup>5</sup>University of York, United Kingdom

### Resumen:

La educación sobre cuestiones sociocientíficas (CSC) puede ser un desafío, ya que pueden surgir tensiones subyacentes. Al discutir el tema de la ingeniería genética, estas tensiones pueden estar relacionadas con (1) la biología molecular de la genética y la ingeniería genética, (2) los aspectos evolutivos de la ingeniería genética, (3) la naturaleza de la ciencia y (4) la comprensión ética de las CSC. Tales tensiones pueden conducir a confrontaciones, ya sea entre estudiantes o entre estudiantes y profesorado. La práctica de la “investigación filosófica” proporciona un enfoque pedagógico para ayudar a explorar estas tensiones y entablar diálogos. La investigación filosófica implica un enfoque dialógico en el que un facilitador ayuda a un grupo de estudiantes a descubrir presupuestos ocultos y generar una conversación argumentativa. Estímulos como imágenes, casos o citas proporcionan un contexto para ayudar a los estudiantes a participar en diálogos sobre cuestiones filosóficas. De esta manera, los estudiantes pueden reflexionar sobre la relación entre ciencia y evolución, la naturaleza de la ciencia y las tensiones entre la ingeniería genética y la sociedad. En este capítulo, primero exploramos diferentes sensibilidades relacionadas con la ingeniería genética. Luego, mostramos material de aprendizaje para estudiantes de educación secundaria para enfrentar estos problemas. Nos centramos en un enfoque que utiliza grandes preguntas e incentiva el diálogo para explorar las sensibilidades. Finalmente, brindamos consejos para tener en cuenta al abordar las CSC a través del diálogo filosófico.

#### **PALABRAS CLAVE**

*investigación filosófica, naturaleza de la ciencia, preguntas, ética*

## 1. PREGUNTAS SOBRE LA INGENIERÍA GENÉTICA

Durante décadas, la práctica de la ingeniería genética (IG), que es la manipulación o modificación de la composición genética de un organismo, ha dado lugar a nuevos cultivos y terapias para las personas. En el campo médico, millones de personas con diabetes son tratadas con insulina producida por bacterias modificadas genéticamente. La ingeniería genética estimula nuestra imaginación, pero también puede conducir a prácticas cuestionables.

Por ejemplo, se crearon ratones Schwarzenegger mediante ingeniería genética para que tuvieran un mayor crecimiento muscular, y los investigadores buscan protegernos del VIH modificando genéticamente embriones humanos. Estos y muchos otros ejemplos demuestran cómo los/las científicos/as podrían verse tentados a modificar genéticamente a los humanos para que posean ciertos rasgos deseados. Sin embargo, ¿es esto lo que queremos? ¿Es moralmente aceptable? Los debates sobre la IG suscitan fácilmente cientos de cuestiones éticas.

El impacto de la IG no puede entenderse sin una perspectiva evolutiva. En este sentido, la IG puede considerarse un instrumento para seleccionar artificialmente organismos que se adapten a las necesidades humanas; por lo tanto, puede verse como un instrumento para “dirigir” la evolución. La introducción de nuevas tecnologías para alterar códigos genéticos y reparar genes con deficiencias (CRISPR-Cas) hace que estas discusiones sean aún más urgentes. Esto plantea las siguientes preguntas: ¿Se le permite a la gente jugar con los acervos genéticos? ¿Se nos permite manipular el ADN humano y redirigir el curso de la evolución?

La IG es un ejemplo típico de una cuestión sociocientífica (CSC; SSI por sus siglas en inglés) en la educación científica. Esto significa que es un asunto social (potencialmente) controvertido relacionado con la ciencia, que está abierto y tiene múltiples soluciones (Sadler 2004; Zeidler y Keefer, 2003). Abordar cuestiones socialmente agudas es una de las muchas maneras de equipar a los estudiantes para participar en discusiones

sobre las CSC. Este tipo de preguntas son abiertas e involucran problemas poco estructurados que integran conocimientos de las humanidades y las ciencias (Morin et al., 2017).

La IG permite explorar cuestiones (de gran relevancia social) relacionadas con la producción de alimentos, la identidad, la dirección de la evolución, el intercambio entre ciencia y tecnología, la ética de la investigación y la relación entre ciencia y sociedad. Además, el tema de la IG ofrece un sinfín de oportunidades para promover la alfabetización científica.

La alfabetización científica es relevante para las preguntas que los estudiantes pueden encontrar como ciudadanos/as y para las implicaciones socioéticas del conocimiento científico (es decir, la alfabetización sobre las implicaciones de la ciencia para la sociedad). Por lo tanto, brinda la oportunidad no solo de ayudar al alumnado a comprender los problemas en juego y estimular sus habilidades de razonamiento sociocientífico, sino también de contribuir a la educación para la ciudadanía, ya que ayuda a los estudiantes a tomar decisiones informadas y los faculta para participar en debates (Sadler et al., 2007; Simonneaux y Simonneaux, 2008).

Cabe destacar que la IG puede despertar emociones en el aula. La cantidad de (grandes) preguntas que pueden surgir al discutir la modificación genética parece interminable: ¿Se nos permite modificar genéticamente a los humanos? ¿Están los humanos jugando a ser Dios cuando lo hacen? ¿Podemos mejorar la naturaleza? ¿Algunas personas necesitan ser “arregladas”? ¿La modificación genética solo favorece a las personas ricas? Si permitimos la modificación genética, ¿qué sigue? ¿Podemos mejorar la naturaleza? ¿Está bien manipular el ADN? ¿Estamos seguros/as de que nuestras células funcionan como creemos? ¿Las grandes compañías farmacéuticas saben qué es lo mejor? ¿Podemos prohibir una tecnología, aunque tenga mucho potencial? La amplia variedad de grandes preguntas que se pueden plantear en el contexto de la IG se pueden categorizar en diferentes dominios (ver Tabla 1).

**Tabla 1**  
Tipos de grandes preguntas en el campo de la ingeniería genética.

Conceptos científicos	Evolución	Naturaleza de la ciencia	Ética
¿Qué es un gen?	¿Puede existir la evolución sin modificación genética?	¿Estamos seguros/as de que nuestras células funcionan como creemos que lo hacen?	¿Deberíamos modificar genéticamente a los humanos?
¿Cómo funciona CRISPR-Cas para cambiar la composición genética de los organismos?	¿Es antinatural manipular el ADN?	¿Se excluyen entre sí la ciencia y la religión?	¿Están los humanos jugando a ser Dios cuando modifican genéticamente a los organismos?
¿Cómo pueden las disfunciones genéticas conducir a enfermedades?	¿Se puede mejorar la evolución?	¿Tenemos que conocer todas las posibles consecuencias de introducir una tecnología antes de implementarla?	¿Está permitido a los/las científicos/as mejorar la naturaleza?
¿Cuál es la relación entre genotipo y fenotipo?	¿Cuál es la diferencia entre evolución, cambio e ingeniería?	¿Cómo podemos conocer las funciones de los genes en los procesos evolutivos?	¿Podemos prohibir una tecnología incluso si tiene mucho potencial?

Mientras que algunas de las preguntas se centran en el conocimiento científico involucrado en la ingeniería genética (IG), otras se centran en la relación entre la evolución y la IG, los aspectos epistemológicos de la ciencia y los aspectos socioéticos de la IG. En cada uno de estos dominios, los estudiantes pueden experimentar dificultades y desafíos que obstaculizan la comprensión de los problemas en juego. En este capítulo, exploramos cómo la práctica de la indagación filosófica permite a los docentes abordar estos diferentes aspectos. Primero, analizaremos en detalle los desafíos que enfrentan los estudiantes en cada uno de estos dominios.

## 1.1 La biología molecular de la ingeniería genética

La ingeniería genética (IG) de organismos es un campo amplio. Abarca la producción de cultivos modificados genéticamente, el uso de la

modificación genética para “mejorar” organismos y las discusiones sobre la modificación genética de humanos para curar enfermedades o promover características más deseables. En cualquiera de estas aplicaciones, es relevante comprender la genética.

Esto no solo implica un conocimiento de la biología celular, la herencia y la genética, sino también un entendimiento de las técnicas de la IG (por ejemplo, el uso de CRISPR-Cas para lograrlo). También implica una comprensión fundamental de las relaciones entre los organismos y sus genes, es decir, el grado en que los genes son simplemente planos o esenciales.

Una amplia gama de conceptos erróneos (concepciones alternativas) sobre la biología de la IG pueden surgir en el aula (Aldahmash et al., 2012; Briggs et al., 2016; Wisch et al., 2018). Por ejemplo, estos pueden relacionarse con el significado de palabras como “ADN recombinante”, la idea de que un rasgo corresponde a un solo gen, que un alelo es un subcomponente de un gen y

que las proteínas almacenan información genética. Las preguntas formuladas en este dominio son preguntas científicas que se pueden responder mediante estudio o investigación. Cabe destacar que nuestro enfoque en este capítulo se centra en el diálogo filosófico y no en este tipo de preguntas.

## 1.2 Aspectos evolutivos de la ingeniería genética

Dobzhanski escribió la famosa frase: “nada tiene sentido en biología, excepto a la luz de la evolución”. Desde Darwin, la teoría de la evolución, en constante evolución, ha tenido profundas implicaciones en nuestra comprensión de la diversidad biológica, nuestra cosmovisión y cuestiones más específicas como la resistencia a los medicamentos y los brotes pandémicos. La evolución también nos ayuda a comprender las sensibilidades relacionadas con la ingeniería genética (IG).

Una conexión importante entre la evolución y la IG es que podemos pensar en la IG como una nueva forma de selección artificial. La selección artificial se ha practicado durante siglos tanto en plantas como en animales, dando como resultado nuevas variedades. Sin darse cuenta, los/las agricultores/as y criadores/as modificaron así la composición genética de los organismos. En el caso de la IG, los/las científicos/as son ciertamente conscientes de que están seleccionando genes y modificando genomas, siendo el proceso y los resultados esencialmente los mismos (es decir, organismos evolucionados por selección artificial).

Darwin (1859) se basó en la analogía de la selección artificial para explicar la selección natural. Como Dawkins (2009) aclaró más tarde, esta analogía tiene sentido porque podemos entender la selección artificial como un caso especial de selección natural en el que los organismos se adaptan a un entorno en el que las necesidades y gustos de los humanos ejercen

una fuerte presión selectiva. Los organismos con los rasgos más deseables son los que tienen más éxito reproductivo.

Por tanto, la IG se puede usar para aclarar el mecanismo evolutivo central. Los estudiantes aún podrían argumentar que los productos de la IG son artificiales o no naturales en el sentido de que, a diferencia de la selección natural, intervenimos en la naturaleza para producirlos. Estas consideraciones brindan la oportunidad ideal para discutir dos dimensiones importantes de la evolución.

Una es que la evolución es un proceso ciego que no tiene en cuenta nuestros mejores intereses. Por lo tanto, lo natural no es necesariamente bueno. La evolución produce rasgos que favorecen el éxito reproductivo de sus portadores, no nuestro bienestar. Estos rasgos adaptativos a menudo incluyen defensas o armas dirigidas a otros organismos, incluidos nosotros. Por ejemplo, muchas plantas producen toxinas que son dañinas y a veces incluso letales, lo que evita que se las coman.

Dado que la naturaleza no nos provee, debemos hacerlo nosotros mismos, lo que implica que debemos alterar nuestro entorno ecológico. Sin embargo, como las especies continuarán adaptándose a los cambios en el medio ambiente a través de la selección natural en formas que las favorezcan a ellas y no a nosotros, esta es una lucha continua. Por ejemplo, considérese que los insectos pueden volverse resistentes a los pesticidas.

Otra dimensión es que los humanos no estamos separados de la naturaleza, sino que somos parte de ella. Esto significa que, como cualquier otro organismo, los humanos aprovecharemos al máximo nuestro entorno. Aunque los humanos pueden ser excepcionales en este sentido, sus diferencias con otros organismos no son esenciales sino graduales. Como tal, la selección artificial puede considerarse como una forma de selección natural, ya que nuestros intereses y gustos son parte del entorno natural al que se adaptan otras especies.

La IG es diferente de las formas tradicionales de cría en el sentido de que la tecnología nos permite modificar los genomas de los organismos introduciendo genes de diferentes especies. Este cruce de barreras entre especies representa una preocupación importante entre el público en general. Sin embargo, esta práctica puede ayudar a explicar que la transferencia horizontal de genes es bastante común en la naturaleza y que el proceso juega un papel importante en la evolución, un punto del que los/las científicos/as ahora son cada vez más conscientes. Por ejemplo, aproximadamente el 8% del ADN humano es de origen viral. Además, la tecnología de la IG utiliza un proceso natural mediante el cual las bacterias introducen su material genético en las células de sus huéspedes. Ciertamente, la transferencia horizontal de genes sólo es posible porque el código genético es universal. Como tal, la IG también proporciona un contexto para discutir el origen común de las especies.

### 1.3 La naturaleza de la ciencia de la ingeniería genética

¿Cómo llegamos a entender la ingeniería genética (IG) en la actualidad? Nuestro conocimiento actual de la IG se ha logrado a través de un proceso continuo de investigación científica. Sin embargo, surgen preguntas importantes: ¿Es posible que nuestra comprensión de la IG esté sesgada? ¿De qué manera? Estos interrogantes, junto con la relación entre tecnología y ciencia, se relacionan directamente con la naturaleza de la ciencia (NdC). NdC explora cómo se genera el conocimiento científico y cómo difiere de otros tipos de conocimiento.

Estos temas se relacionan con la naturaleza de la ciencia (NOS) y abarcan cuestiones de metafísica (es decir, qué es real; esto incluye la realidad de los genes, la evolución y las especies); epistemología (es decir, cómo sabemos; aquí se considera cómo obtenemos conocimiento sobre la IG, incluyendo los límites de lo que podemos saber acerca de los genes y los procesos evolutivos) y axiología (es decir, qué se valora; se refiere a los valores que

entran en juego en la IG). Responder preguntas de esta naturaleza requiere lógica y diferentes formas de razonamiento.

Hay varias razones por las cuales es importante considerar las cuestiones filosóficas (es decir, NdC) en la educación sobre la ingeniería genética (IG). En términos de conocimiento: es fundamental que los estudiantes comprendan la base sobre la cual se construyen las afirmaciones sobre la IG y la evolución. Al explorar la naturaleza de la ciencia en la IG (sección 1.3), los estudiantes pueden entender cómo funciona la ciencia y abordar las cuestiones sociales y éticas desde una posición informada.

Debido a que la IG puede ser un tema controversial, es necesario establecer una buena comprensión de lo que se conoce, cuál es la evidencia y cuáles son las limitaciones e incertidumbres. La IG es un campo de investigación “candente”, donde la gobernanza y las regulaciones apenas pueden seguir el ritmo de los avances. Por lo tanto, es importante que la sociedad responda a la pregunta “¿solo porque podemos hacerlo, significa que debemos hacerlo?”. También es crucial generar espacios donde los estudiantes puedan estar de acuerdo o en desacuerdo con la dirección que está tomando la ciencia.

Al abordar preguntas que vinculan la ciencia con la sociedad y crear espacios para el diálogo, empoderamos al alumnado para manejar los problemas basados en la ciencia que determinarán su mundo futuro.

Finalmente, es importante prestar atención al pensamiento crítico sobre lo que se conoce y cómo podemos ayudar a los estudiantes a comprender mejor cómo funciona la ciencia en el laboratorio y más allá, evitando argumentos basados en información errónea o falacias lógicas.

Los/las críticos/as de la enseñanza de las ciencias en las escuelas se han centrado en el énfasis en la ciencia “final” o “predefinida”, que resalta los productos por encima del proceso científico. Al considerar la “ciencia en desarrollo”, como en las fronteras de la IG, es importante comprender no solo lo que se conoce, sino también cómo se ha obtenido ese conocimiento y cuál es el estado y la certeza de las verdades científicas. Enseñar y aprender sobre la naturaleza de la ciencia (NdC) es una forma de responder a esta crítica, ya que pone de relieve el proceso de creación de conocimiento y la ciencia como una práctica humana.

Clough (2020) argumentó que la naturaleza de la ciencia (NdC) debería enmarcarse y enseñarse como preguntas en lugar de declaraciones por dos razones principales: (i) reflejar con más precisión el contexto, el arraigo cultural y los matices necesarios para la comprensión y (ii) priorizar el proceso de investigación. El uso de preguntas para investigar NdC en relación con IG permite a profesorado y alumnado abordar cuestiones contemporáneas, incluida la política, democracia, capitalismo, subjetividad, capacidad de la agencia y ética.

Por ejemplo: ¿Estamos seguros/as de que los organismos genéticamente modificados no dañan el planeta? ¿Cómo se deberían tomar las decisiones sobre IG cuando hay incertidumbre acerca de sus consecuencias? ¿Funcionan las células como creemos que lo hacen? ¿Qué significa “poseer” un gen? ¿Puede la naturaleza enseñarnos acerca de lo bueno? ¿Deberíamos considerar el impacto de la IG de cultivos en la calidad del trabajo de los/las agricultores/as? ¿Quién se beneficia de la IG? En la siguiente sección se describe cómo se pueden utilizar preguntas de esta manera.

### 1.4 La ética de la ingeniería genética

La ingeniería genética (IG) es un desafío en nuestra sociedad contemporánea. Abre un mar de posibilidades y a la vez suscita numerosas discusiones. Ha generado mucha preocupación, especialmente en el ámbito de la agricultura. Las aplicaciones médicas, como la producción de insulina, suelen ser menos controvertidas entre el público. Las inquietudes relacionadas con la IG abarcan la seguridad de la tecnología, sus amenazas al medio ambiente y sus consecuencias socioeconómicas.

Dada la alta complejidad del tema, al evaluar los impactos ambientales y socioeconómicos, es importante considerar no solo la seguridad de la tecnología en sí, sino también cómo se usa y regula, así como el impacto en diferentes grupos de interés en la sociedad. La IG es una herramienta popular utilizada para desarrollar cultivos más tolerantes a condiciones extremas, resistentes a plagas y virus o capaces de combatir

la desnutrición (por ejemplo, el arroz dorado). Sin embargo, esta tecnología también suele despertar interrogantes sobre la participación de multinacionales, las patentes y la agroindustria.

No obstante, en el futuro, la IG podría tener otras aplicaciones. La posibilidad del mejoramiento humano plantea distintos tipos de preocupaciones. Por ejemplo: ¿La IG es segura? ¿Beneficia a todas las personas o solo a un grupo selecto? ¿Debería usarse la IG para mejorar a los seres humanos? ¿Cuál es la diferencia entre terapia y mejora en el uso de la IG? ¿Qué responsabilidad tenemos hacia las generaciones futuras? ¿La IG es diferente de otras terapias y mejoras? ¿La IG humana es una ‘eugenesia de mercado’?

Un amplio abanico de marcos éticos resuena en las discusiones sobre la IG. En cierto modo, lo que se considera “bueno” y por qué se considera así depende del marco ético que se adopte. El consecuencialismo propone un enfoque de costos y beneficios para evaluar el impacto de la IG. Por otro lado, un enfoque deontológico se centra en los principios que sustentan el acto de la IG y lo que se debe hacer.

Reflexionar sobre el mejoramiento humano también suscita interrogantes sobre la naturaleza humana, la identidad personal, la autonomía, los valores y la desigualdad social. Filósofos/as y bioeticistas aportan diversas perspectivas a estos temas. Los transhumanistas argumentan que los modos de mejora humana, incluida la IG, deberían considerarse seriamente como un medio para mejorar la calidad de vida humana (por ejemplo, Bostrom, 2003). Otros, como el influyente bioeticista Hans Jonas, sostienen que, al tratar con tales tecnologías, uno debería “actuar de manera que los efectos de su acción sean compatibles con la permanencia de la vida humana genuina” (Jonas, 1984, p. 11). Las bioeticistas feministas se centran en las relaciones de poder y el impacto del mejoramiento humano en las mujeres y otros grupos marginados (por ejemplo, Simonstein, 2019).

## 2. INDAGACIÓN FILOSÓFICA SOBRE LA INGENIERÍA GENÉTICA

La idea central de esta práctica educativa es ayudar a los estudiantes a reflexionar sobre la naturaleza de la ciencia (NdC), así como sobre la ética y los aspectos evolutivos de la ingeniería genética (IG). En este contexto, la indagación filosófica (y los diálogos filosóficos) son los medios para lograr este objetivo.

### 2.1 Materiales

- Incentivo para iniciar el diálogo (ver más abajo)
- Preguntas filosóficas (ver más abajo)
- Una sala en la cual los estudiantes se sienten en círculo

### 2.2 Tiempo

Las indagaciones filosóficas pueden durar de 10 a 30 minutos (o incluso más si los estudiantes están familiarizados con este método de enseñanza).

### 2.3 Público Objetivo

Las actividades se centran en estudiantes de 12 a 18 años en el contexto de la educación científica formal (es decir, escuelas) y contextos informales (es decir, museos de ciencia, centros de ciencia, etc.).

### 2.4 Objetivos de Aprendizaje

#### 2.4.1 **Objetivos de aprendizaje relacionados con la conciencia de las Cuestiones Sociocientíficas**

1. Las cuestiones sociales, éticas y morales que surgen en el contexto de la ingeniería genética (IG) y otros temas sensibles de Cuestiones Sociocientíficas (CSC).

#### 2.4.2 **Objetivos de aprendizaje relacionados con la evolución**

2. La evolución no implica progreso en una dirección determinada.

#### 2.4.3 **Objetivos de aprendizaje relacionados con las prácticas científicas**

3. Hacer preguntas

#### 2.4.4 **Objetivos de aprendizaje relacionados con Naturaleza de la Ciencia**

4. Las ideas científicas pueden cambiar con el tiempo.
5. La ciencia es un esfuerzo humano.

#### 2.4.5 **Objetivos de aprendizaje relacionados con las competencias transversales**

6. Analizar los problemas desde múltiples perspectivas.
7. Explorar cómo la ciencia puede contribuir a la comprensión de los problemas y sus limitaciones.

## 2.5 Descripción de la práctica educativa

En una indagación filosófica, los participantes buscan respuestas a preguntas desafiantes (filosóficas) bajo la supervisión de un facilitador. El facilitador estructura el diálogo y estimula una investigación lógica sin proporcionar ninguna respuesta. Esto ayuda a crear un espacio para que los estudiantes indaguen sobre los fundamentos epistemológicos de la ciencia y la relación entre la ciencia y los valores humanos.

El uso de diálogos filosóficos se inspira en el filósofo John Dewey. Él abogó por una forma de educación centrada en los estudiantes, donde estos últimos asuman la responsabilidad de su propio proceso de aprendizaje (Dewey, 1997). Siguiendo esta línea, el filósofo estadounidense Matthew Lipman desarrolló la metodología de la “filosofía para niños/as” en la década de 1960 (Lipman, 1988). Lipman consideraba la filosofía no sólo como una disciplina académica para especialistas, sino también como una forma de pensamiento dialógico (Lipman, 2003).

En las indagaciones filosóficas es fundamental inducir el “pensamiento crítico y creativo” en los estudiantes. La lógica juega un papel central en este proceso (por ejemplo, explorando cómo distinguir argumentos de falacias). Este proceso ocurre en un contexto social (por ejemplo, una clase), al que se denomina “comunidad de indagación”. En esta comunidad, un grupo de estudiantes puede buscar respuestas a preguntas filosóficas bajo la guía de un facilitador. Se les cuestiona sobre la coherencia y relevancia de los argumentos, así como las premisas o consecuencias (ocultas) de las afirmaciones.

En las últimas décadas, se ha investigado de manera más sistemática el impacto de las conversaciones filosóficas en el comportamiento de los jóvenes (Reznitskaya, 2005). Los diálogos filosóficos no sólo estimulan la curiosidad y la capacidad de análisis de los jóvenes, sino que también agudizan sus habilidades sociales, de discusión y de razonamiento (Lafortunate, 2003; Lipman, 2003). Los diálogos filosóficos permiten al alumnado explorar los significados de conceptos

(filosóficos) y distintas perspectivas para comprenderlos mejor.

El uso de diálogos filosóficos puede ser prometedor para ayudar a los estudiantes a reflexionar críticamente y desarrollar una comprensión ecológicamente válida del conocimiento, especialmente porque este proceso de desarrollo del conocimiento se vuelve a representar durante el propio diálogo. De esta forma, los estudiantes pueden llegar a entender las ideas, las relaciones entre estas ideas y la realidad, y cómo estas comprensiones pueden diferir para diferentes personas (Worley, 2016). Los estudios sobre la implementación de indagaciones filosóficas en el contexto de la educación científica muestran cómo estas indagaciones se pueden utilizar para ayudar al alumnado a reflexionar sobre conceptos científicos, cuestiones éticas o la naturaleza de la ciencia (De Schrijver et al., 2018; Dunlop y De Schrijver, 2020).

### 2.4.1 **Objetivos de aprendizaje relacionados al conocimiento de Cuestiones Sociocientíficas (CSC)**

Durante una indagación filosófica, los estudiantes se sientan en círculo y son guiados por las preguntas del maestro/a (facilitador) para explorar distintas respuestas. Una indagación filosófica implica diferentes fases (figura 1): (i) estímulo; (ii) planteamiento de preguntas filosóficas; (iii) diálogo; (iv) metareflexión.

Dependiendo de tu enfoque como docente, podrás trabajar en diferentes objetivos de aprendizaje a lo largo de las fases (por ejemplo, mientras que la fase de estímulo brinda excelentes oportunidades para crear conciencia sobre el tema, la fase de diálogo permite analizar un tema desde múltiples perspectivas).

**Figura 1**  
Fases de una indagación filosófica.



### (i) Estímulo

Un diálogo filosófico a menudo comienza después de presentar un problema filosófico con un estímulo que provoque la reflexión. Los estímulos pueden incluir videos cortos, canciones, caricaturas, textos, experimentos extraños, casos, imágenes o historias.

Típicamente, el material del estímulo se comparte con el grupo y se les pide a los estudiantes que reflexionen sobre lo que han visto, leído, escuchado o compartido. Esto podría incluir identificar conceptos problemáticos, responder al estímulo usando una cantidad limitada de palabras o pedir a los estudiantes que identifiquen ideas con las que están de acuerdo o en desacuerdo.

Además, un caso de estudio corto o una imagen pueden funcionar como estímulo para iniciar el diálogo. Una imagen (figura 2) puede servir como estímulo para iniciar un diálogo, como se muestra en el siguiente ejemplo.

**Facilitador** ¿Qué piensas al ver esta imagen?

**Estudiante 1** Un dedo, ADN.

**Estudiante 2** Una persona que cree ser Dios.

**Estudiante 3** Lo peligroso que es cambiar el ADN.

**Facilitador** ¿Eso es lo que piensas o lo que ves?

**Estudiante 1** Es lo que pienso, creo.

**Facilitador** ¿Cuáles son los temas de esta imagen?

**Estudiante 2** Modificación genética, Dios, ciencia.

**Estudiante 5** Peligro, porque veo nubes oscuras.

**Estudiante 6** Oportunidades... para crear lo que queremos.

**Facilitador** ¿Qué piensan los demás?

**Figura 2**  
Ejemplo de un estímulo para una indagación filosófica.



### (ii) Preguntas Filosóficas

#### ¿Qué es una pregunta filosófica?

Las preguntas filosóficas se pueden describir como aquellas que están “abiertas al desacuerdo informado, racional y honesto...” (Floridi, 2013); es decir, están abiertas y se prestan a una exploración auténtica a través del razonamiento. Utilizar preguntas filosóficas (por ejemplo, ¿se puede probar alguna vez el conocimiento científico?) como foco de la indagación permite a los estudiantes explorar, discutir y desarrollar sus propias ideas sobre la naturaleza de la ciencia

(NdC). Estas preguntas filosóficas pueden surgir de los propios estudiantes o del docente. La interacción entre los participantes y la facilitación por parte del maestro/a permite al alumnado reflexionar sobre NdC y desarrollar sus propios argumentos.

Como docente, puedes describir estas grandes preguntas filosóficas como cuestiones que son interesantes para explorar juntos/as, preguntas a las que es difícil dar una respuesta definitiva y/o preguntas cuya respuesta no se encuentra en Google.

### ***¿Cómo formular preguntas filosóficas?***

A la hora de crear el ambiente para un diálogo filosófico, existen distintos enfoques para generar preguntas. Esto incluye (i) el desarrollo y/o la selección de la pregunta por parte del docente/facilitador y (ii) la creación y/o la selección de la pregunta por parte de los estudiantes. La creación y/o selección de la pregunta por parte del profesor(a)/facilitador(a) puede ser importante cuando hay una pregunta o tema específico que el docente quiere que la clase explore; por ejemplo, ¿cuál es la diferencia entre ciencia y tecnología? ¿Están los/las científicos/as jugando a ser Dios? ¿Cuál es la diferencia entre ciencia y religión? Esto puede dar lugar a un diálogo filosófico que se centre en lo que el profesorado quiere que su alumnado aprenda. Sin embargo, los estudiantes pueden no sentirse dueños ni comprometidos con las preguntas que se les han seleccionado.

La creación y/o selección de preguntas por parte de los estudiantes puede ser importante cuando el docente quiere involucrarlos estableciendo conexiones entre la ciencia, ellos mismos y el mundo. Puede además darles a los estudiantes la propiedad de la indagación y asegurar que la indagación filosófica sea relevante para ellos/as. También, puede ayudarles a desarrollar su capacidad para formular preguntas (filosóficas). Además, le da al profesor/a una idea de los (pre)conceptos que viven en la mente de los estudiantes. Como se ha dicho anteriormente,

un estímulo puede ser útil para plantear una pregunta filosófica. Por ejemplo, después de un breve diálogo sobre una imagen, el/la profesor/a puede pedir a los estudiantes que formulen preguntas filosóficas. Puede ser útil pedirles que escriban todas las preguntas que se les ocurran y luego buscar las más interesantes. También podría ser útil recalcar que las preguntas filosóficas son abiertas, fáciles de entender y suscitan un conflicto cognitivo.

**Tabla 2**

Ejemplos de preguntas filosóficas que (no) funcionan en un diálogo filosófico

Ejemplos de grandes preguntas	¿Es esta una pregunta útil para un diálogo filosófico?
¿Por qué es bueno modificar organismos genéticamente?	Esta pregunta no es abierta. Es manipuladora porque ya sugiere que la modificación genética es algo bueno. Por lo tanto, no permite a los estudiantes explorar todas las opciones.
¿Qué es la modificación genética?	Esta es una pregunta fáctica. Sin embargo, no es muy útil como pregunta filosófica porque solo tiene una respuesta clara (o consenso científico).
¿Puede la naturaleza mejorarse a sí misma?	Esta sí es una pregunta filosófica útil ya que permite explorar el significado de “mejora/progreso” y “naturaleza.” No conduce a una única explicación científica, sino que invita a indagar en diferentes puntos de vista.
¿Es mejor modificar genéticamente una planta o una hormiga?	La pregunta hace sonreír a los estudiantes y estimula la curiosidad. Los invita a buscar las diferencias entre la ingeniería de las hormigas y las plantas. Usar organismos específicos ayuda a los estudiantes a ser más concretos.
¿Se puede mejorar la evolución?	Esta es una pregunta filosófica útil. Se centra en el significado de “mejora” en el contexto de la evolución. Provoca un conflicto cognitivo al mezclar dos tipos de pensamiento: el pensamiento científico (evolución) y el pensamiento ético (mejora)
¿Está permitido alterar los planos de los seres humanos?	Esta es una pregunta filosófica (ética) útil que invita a los estudiantes a debatir si están de acuerdo o en desacuerdo, y a explicar sus razones. Una pregunta de sí o no es útil porque facilita la reacción inicial de los participantes. Luego de esa reacción inicial, los estudiantes tendrán que profundizar en su argumento.

### (iii) Diálogo

Durante la facilitación de un diálogo filosófico, normalmente se aplican las siguientes reglas (Rondhuis, 2005):

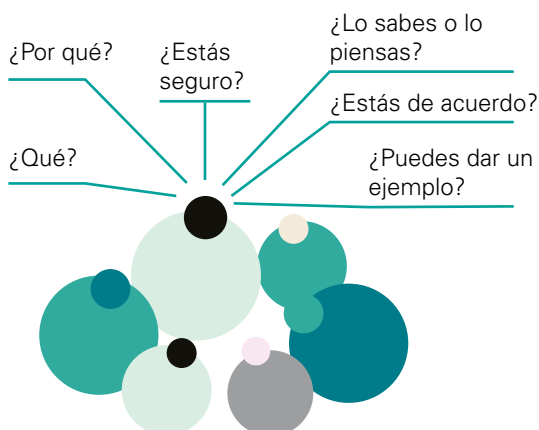
- Solo se permiten las opiniones respaldadas por argumentos.
- Los participantes pueden responder a los argumentos de los demás, pero no a sus opiniones.
- Las afirmaciones y argumentos deben ser comprensibles y accesibles para todos.
- No se permiten dogmas, certezas irracionales ni argumentos basados en autoridades externas.
- El razonamiento debe ser estructurado de manera consistente y sistemática.
- De esta forma, el facilitador ayuda a los estudiantes a estructurar y clarificar sus puntos de vista, suposiciones y conceptos.

Las preguntas filosóficas pueden generar nuevas preguntas (de seguimiento) que ayudan a profundizar en la investigación. En la siguiente tabla, mostramos cómo una gran pregunta puede dar lugar a preguntas adicionales que un/a facilitador/a puede formular.

**Tabla 3**  
Preguntas filosóficas y preguntas de seguimiento

Preguntas filosóficas	Preguntas filosóficas de seguimiento
¿Es mejor modificar genéticamente una planta que modificar genéticamente una hormiga?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Quién decide qué es bueno y qué es malo?</li> <li>• ¿Son los animales más importantes que las plantas?</li> <li>• ¿Podemos modificarlo todo?</li> <li>• ¿Deberíamos seguir reglas (éticas) para la modificación genética?</li> <li>• ¿Es mejor modificar una oveja que modificar a un humano?</li> </ul>
¿Se puede mejorar la evolución?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Está un ser humano mejor adaptado a su entorno que una bacteria?</li> <li>• ¿La evolución conduce al progreso?</li> <li>• ¿La mejora es siempre la mejor opción?</li> <li>• ¿Cómo sabes que algo es mejor?</li> <li>• ¿Puede el progreso retroceder?</li> <li>• ¿Tiene la evolución objetivos finales?</li> </ul>
¿Es la IG una forma de evolución?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Es posible la vida sin cambios?</li> <li>• ¿Es posible la vida sin evolución?</li> <li>• ¿Es posible la IG sin un/a ingeniero/a?</li> <li>• ¿Es la naturaleza una ingeniera?</li> <li>• ¿Puede ocurrir IG por coincidencia?</li> </ul>
¿Se puede tener evolución sin modificar genéticamente organismos?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Existe alguna diferencia entre ingeniería y modificación y cambio?</li> <li>• ¿Qué elementos son necesarios para poder hablar de evolución?</li> <li>• ¿Se puede tener evolución sin cambio?</li> </ul>
¿Sería el mundo un mejor lugar si la IG no existiera?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Es la IG una buena tecnología? ¿Si es así por qué?</li> <li>• ¿IG tiene más ventajas que desventajas?</li> <li>• ¿Es la IG lo mismo que jugar a ser Dios?</li> <li>• ¿Podemos interferir en la naturaleza?</li> </ul>

**Figura 3**  
Preguntas del facilitador en una indagación filosófica



## El rol del facilitador

El facilitador no proporciona respuestas, sino que formula preguntas. Estas preguntas animan a los estudiantes a explorar diversos puntos de vista. El énfasis no radica en encontrar una única respuesta final, sino en explorar el tema de manera colectiva. A continuación, se presentan los tipos de preguntas que puede formular un facilitador.

### 1. Preguntas del facilitador para mayor claridad

Estas preguntas ayudan a los participantes a profundizar en el significado de las palabras y conceptos que se están usando.

- ¿Qué quieres decir con...?
- ¿Puedes dar un ejemplo?
- ¿Puedes resumir de qué está hablando...?
- ¿Cuál es la pregunta principal de esta discusión?
- ¿Puedes reformular la respuesta de él/ella/usted?

### 2. Preguntas del facilitador para fomentar la argumentación

Todas las personas hacemos juicios constantemente. Sin embargo, rara vez nos detenemos a pensar de dónde vienen estos juicios y si se basan en fundamentos válidos. En una conversación filosófica, buscamos la base de nuestros juicios y examinamos las hipótesis y suposiciones sobre las que se construyen.

- ¿Por qué piensas eso?
- ¿Por qué es así?
- ¿Cómo sabemos que esto es verdad?
- ¿En qué se basa esto?
- ¿Qué sabemos con certeza sobre esto?
- ¿Cómo podemos probarlo?
- ¿Es un hecho o una opinión?

### 3. Preguntas del facilitador para fomentar la consideración de perspectivas alternativas

Estas preguntas nos invitan a examinar y cuestionar nuestras propias perspectivas, que por lo general damos por sentadas en el día a día. Nuestras experiencias y puntos de vista cotidianos suelen parecernos evidentes. Sin embargo, es posible experimentar y comprender las mismas cosas de manera diferente si las observamos desde un ángulo distinto. Las preguntas sobre el cambio de perspectiva también sirven para exponer argumentos u opiniones infundadas sin actuar explícitamente como un “corrector” de contenido en la conversación.

- ¿Puedes imaginar lo contrario?
- ¿Existen otras opciones que también podrían ser verdaderas?
- ¿Podría ser cierto lo contrario?
- ¿Alguien piensa lo contrario?

### 4. Preguntas del facilitador para explorar las implicaciones y consecuencias

También puedes poner a prueba una afirmación al explicitar sus consecuencias e implicaciones. Por ejemplo, este tipo de preguntas se puede utilizar para exponer contradicciones en una línea de razonamiento.

- ¿Qué podemos deducir de esto?
- ¿Existe una regla general para esto?
- ¿Cómo encaja eso con lo que acabas de decir?

#### (iv) Metareflexión

El objetivo de filosofar es aprender a pensar críticamente en conjunto, en lugar de encontrar una única respuesta correcta. Es raro o nunca ocurre que un grupo llegue a un consenso. La característica de esta actividad es que plantea más preguntas que respuestas. El objetivo principal es aumentar la comprensión de la complejidad del asunto. No es necesario esperar una respuesta con la que todos/as estén de acuerdo antes de concluir la discusión. Sin embargo, es útil realizar una meta-reflexión breve después de la investigación en la que se analiza la conversación en sí.

Durante la meta-reflexión, se resume la conversación, se enumeran las ideas más importantes y se toma una decisión conjunta sobre si debe haber una conversación de seguimiento. También puedes concluir con una ronda de preguntas si hay tiempo suficiente. Las preguntas que quedan después de la discusión se pueden anotar en un cuaderno de filosofía y tratarse en una sesión posterior.

También es útil determinar cómo experimentaron los estudiantes esta actividad, qué salió bien y qué no. En base a esta retroalimentación, es posible que desees revisar el proceso de la discusión.

#### Preguntas del Facilitador para la Meta-reflexión

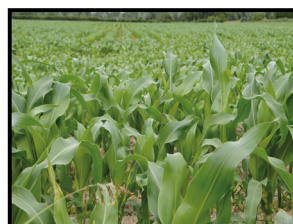
- ¿Qué podemos concluir?
- ¿Qué ideas clave nos quedan?
- ¿Entendemos mejor el tema?
- ¿Fue útil la conversación?
- ¿Están todos de acuerdo con cómo se desarrolló la conversación?
- ¿Qué preguntas no se abordaron?
- ¿Es deseable una conversación de seguimiento?

### 2.5.2 Ejemplos de Diálogo

#### Ejemplo 1: ¿Podemos mejorar la naturaleza?

##### Estímulo

Se pide a los estudiantes que clasifiquen objetos en dos grupos: “naturales” y “artificiales”. El facilitador les pide a los estudiantes que expliquen por qué tomaron esa decisión. Otros estudiantes también pueden responder.



## Diálogo

**Facilitador** ¿Podemos mejorar la naturaleza?

**Estudiante 1** No, no somos Dios.

**Facilitador** ¿Qué piensan los demás? ¿Estáis de acuerdo?

**Estudiante 2** No, lo hacemos todo el tiempo, y eso no nos convierte en Dios.

**Facilitador** ¿Puedes dar un ejemplo?

**Estudiante 2** Mi tía tiene una nueva cadera. Puede volver a caminar.

**Facilitador** **Estudiante 1, ¿qué piensas de este ejemplo?**

**Estudiante 1** Sí, estoy de acuerdo con el Estudiante 2. Pero no es esto a lo que me refería. Pienso más bien en cosas como la clonación.

**Facilitador** ¿Puedes intentar formular tu argumento como una regla?

**Estudiante 1** Si no manipulamos nuestro material genético, está bien.

**Estudiante 3** Entonces, ¿una cadera de plástico está bien, pero una cadera clonada está mal? ¿Por qué?

**Estudiante 1** Porque no queda igual a una cadera natural. Una vez que tengamos la tecnología, querremos modificarlo cada vez más.

**Facilitador** ¿Qué quieres decir con “cada vez más”?

**Estudiante 4** ¿Cómo gente perfecta?

**Estudiante 1** Sí.

**Facilitador** ¿Alguien que no esté de acuerdo?

**Estudiante 5** No sé si eso es verdad. Que podamos mejorar caderas, no significa que vayamos a “querer más”.

**Facilitador** ¿Qué pensáis los demás?

**Estudiante 6** Quizás necesitamos normas, como un límite.

## Ejemplo 2: ¿Se puede dudar de todo en una clase de ciencias?

### Estímulo

Cita: “Dudar de todo y creer en todo son dos soluciones igualmente convenientes; cualquiera de las dos nos ahorra pensar” (Poincaré, 1902).

Se pide al alumnado que diga qué creen que significa esta cita. A continuación, los estudiantes deben justificar su respuesta. A partir de sus ideas, pueden formularse nuevas preguntas filosóficas.

## Diálogo

**Facilitador** ¿Se puede dudar de todo en una clase de ciencias?

**Estudiante 1** Sí, porque a veces descubres algo nuevo y tienes que cambiar tu idea original.

**Facilitador** ¿Estáis todos/as de acuerdo?

**Estudiante 2** Sí, una teoría nunca está realmente acabada. Es como un árbol: sigue creciendo.

**Facilitador** ¿No hay teorías que nunca cambian?

**Estudiante 3** La teoría de la evolución. Esa es una teoría que no puede cambiar.

**Estudiante 4** No estoy de acuerdo. Imagina que descubrimos un planeta donde todos los organismos son idénticos a los que hay en la Tierra. Eso demostraría que la evolución es diferente de lo que entendemos... o imagina que encontráramos un esqueleto de un ser humano en una capa de la Tierra de la era de los dinosaurios... Entonces puede que tuviéramos que adaptar la teoría de la evolución, ¿no? La teoría de la evolución puede cambiar. Pero por el momento, no hemos necesitado cambiarla.

**Estudiante 5** Quizás solo los hechos pueden cambiar.

**Facilitador** ¿Puedes dar un ejemplo de un hecho que nunca cambia?

**Estudiante 3** La Tierra es redonda.

**Facilitador** ¿Qué pensáis los demás? ¿Es “La Tierra es redonda” un hecho que nunca cambia?

**Estudiante 3** Antes pensábamos que la Tierra era plana, así que eso ya ha cambiado.

**Estudiante 5** Pero entonces no era un hecho si podía cambiar.

**Facilitador** **Volvamos al principio. ¿Se puede dudar de todo en clase de ciencias?**

**Estudiante 4** Sí y no. En cierto modo, deberías dudar, porque si crees que algo es cierto, se parece mucho más a un dogma, y la ciencia no es un dogma.

**Estudiante 3** Pero si dudas de todo, nunca serás capaz de saberlo todo. Quizás deberías dudar de todo, pero no del hecho de que la ciencia puede aportarnos conocimiento.

**Estudiante 7** Ay, me duele la cabeza, pero también me siento inspirado.

### Ejemplo 3: ¿Se puede creer en la ciencia?

#### **Estímulo: Estudio de caso**

Los estudiantes leen un caso práctico. Después, responden a las siguientes preguntas en pequeño grupo.

Caso práctico: Durante la lección sobre la modificación genética, Pablo se enfada y sale de clase diciendo: “¡No debemos manipular lo que Dios nos ha dado! Los científicos y científicas trabajan para el diablo”.

- ¿Qué opináis de esta afirmación?
- (¿En qué se diferencian la religión y la ciencia?)
- ¿Se puede hablar de fe en clase de ciencias?
- ¿Se puede creer en la ciencia?
- ¿Puede un científico o científica creer en Dios?
- ¿Pueden los científicos y científicas aprender de la religión?

#### **Diálogo**

**Facilitador** ¿Se puede creer en la ciencia?

**Estudiante 1** No, solo se puede creer en Dios. La ciencia no es algo en lo que se crea, es algo que se sabe.

**Facilitador** ¿Estáis todos/as de acuerdo?

**Estudiante 2** No, creo que se puede creer en la ciencia. Puedes creer que la ciencia te permite comprender mejor el mundo.

**Estudiante 3** Puedes creer que la ciencia es un buen enfoque para conocer algo.

**Facilitador** ¿Cuál es la diferencia entre conocer y creer?

**Estudiante 4** Si sabes algo, es verdad. Pero si lo crees, piensas que es cierto.

**Estudiante 2** No estoy de acuerdo. A veces digo que sé algo, por ejemplo, que mi hermano está en casa, pero al final, resulta que no.

**Estudiante 1** A veces un científico dice que sabe algo cuando en realidad no lo sabe. Simplemente creyó que lo sabía. Nunca puedes estar absolutamente seguro.

**Facilitador** ¿Es posible estar absolutamente seguro/a de algo?

**Estudiante 3** Hmmm, quizás no, pero eso complica las cosas, porque si no estamos seguros, ¿cómo podemos tomar decisiones?

**Facilitador** ¿Podrías dar un ejemplo?

**Estudiante 3** Bueno, si no sabemos realmente si la ingeniería genética es peligrosa, entonces ¿qué deberíamos hacer? ¿Deberíamos quedarnos como estamos o deberíamos empezar con ello en cualquier caso?

**Estudiante 4** Estoy de acuerdo. Si no podemos estar realmente seguros/as de nada, eso es lo que hace que la ciencia sea ciencia. Pero al menos creo que la ciencia es uno de los mejores instrumentos para saber qué es verdad.

#### **CONSEJO 1: Adopta la postura socrática**

*Lo que más les cuesta a los docentes es no responder ellos/as mismos/as a las preguntas o corregir al alumnado. Sin embargo, la mayoría de las veces, el alumnado investiga las ideas de los demás por su cuenta. En cuanto empiezas a corregir al alumnado, el diálogo se evapora y los estudiantes escuchan principalmente tus respuestas. Entonces el proceso de reflexión llega a su fin. Si comienzas el diálogo, deja claro al alumnado que, en una indagación filosófica, no conoces las respuestas. Después, en otra fase de la enseñanza, puedes volver sobre las ideas o concepciones alternativas que hayan surgido en el diálogo.*

**CONSEJO 2: La educación científica es más que el diálogo en sí mismo**

*Estos diálogos filosóficos deberían ser parte de un enfoque más amplio de enseñanza. Por supuesto, una clase de ciencias es más que simplemente tener diálogos y explorar las ideas de los estudiantes. También implica adquirir una comprensión de la biología y la ciencia en su conjunto. Sin embargo, estos diálogos pueden ser útiles instrumentos para estimular la reflexión activa acerca de la ciencia y la ética.*

**CONSEJO 3: La temporalización puede variar**

*Los ejercicios dialógicos pueden cambiar a lo largo del tiempo. A veces es suficiente con plantear la pregunta para que se desencadene todo un diálogo. Otras veces, es más difícil. A veces puede bastar con formular una pregunta y seguir con la clase de ciencias habitual. Por ejemplo, la pregunta "¿Pensáis esto, o lo sabéis?" puede ser una buena pregunta para suscitar un breve momento de reflexión filosófica.*

**CONSEJO 4: La participación no es obligatoria**

*No todos los estudiantes se sienten deseosos de participar en el proceso dialógico. Para algunos/as alumnos/as puede resultar aterrador que sus certezas sean cuestionadas. A menudo damos al alumnado la oportunidad de participar dirigiéndonos activamente a ellos como facilitadores/as. Pero si no quieren responder, no pasa nada. Dar tiempo a los estudiantes para que discutan por parejas una determinada pregunta ayuda a incorporar las ideas de que aquellos/as más tímidos/as para participar.*

## 2.6 Otras perspectivas sobre cómo utilizar la actividad en otros contextos o con participantes de otras edades

En este capítulo hemos proporcionado ejemplos de preguntas, estímulos y diálogos para iniciar un diálogo filosófico sobre ingeniería genética (GE, por sus siglas en inglés) en el aula. El enfoque dialógico puede funcionar en muchos contextos diferentes.

El reto consiste en encontrar preguntas filosóficas estimulantes. Adoptar la postura socrática y cuestionar las respuestas del alumnado creará una comunidad de indagación que potenciará el sentido del asombro y motivará a los estudiantes a pensar y aportar argumentos.

### 3. REFERENCIAS

- Aldahmash, A. H., Alshaya, F. S., & Asiri, A. A. (2012). Secondary school students' alternative conceptions about genetics. *The Electronic Journal for Research in Science & Mathematics Education*, 16(1).
- Bostrom, N. (2003). Human genetic enhancements: A transhumanist perspective. *The Journal of Value Inquiry*, 37(4), 493–506.
- Briggs, A. G., Morgan, S. K., Sanderson, S. K., Schulting, M. C., & Wieseman, L. J. (2016). Tracking the resolution of student misconceptions about the central dogma of molecular biology. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 17(3), 339–350.
- Clough, M. P. (2020). Framing and teaching nature of science as questions. In *Nature of science in science instruction* (pp. 271–282). Springer.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species*. Pan Mac-Millan.
- Dawkins, R. (2009). *The greatest show on Earth: The evidence for evolution*. Bantam Press.
- De Schrijver, J., De Poorter, J., Cornelissen, E., & Anthone, R. (2018). Pilot study on the introduction of philosophical dialogues in Flemish science classes: Can a rabbit be a scientist? In E. Duthie, F.G. Moriyon, & R.R. Loro (Eds.), *Family resemblances: Current trends in philosophy with children* (pp. 239–251). Anaya.
- Dewey, J. (1997). *Democracy and education*. The Free Press.
- Dunlop, L., & De Schrijver, J. (2020). Reflecting about the nature of science through philosophical dialogue. In W. F. McComas & Oramous, J. (Eds.), *The nature of science: Rationales and strategies* (pp. 223–237). Springer.
- Floridi, L. (2013). What is a philosophical question? *Metaphilosophy*, 44(3), 195–221.
- Jonas, H. (1984). *The imperative of responsibility: In search of an ethics for the technological age*. Chicago University Press.
- Lafortunate, L., Daniel, M. F., Mongeau, P., & Pallascio, R. (2003). Philosophy for children adapted to mathematics: A study of its impact on the evolution of affective factors. *Analytic Teaching*, 23(1).
- Lipman, M. (2003). *Thinking in education*. Cambridge University Press.
- Lipman, M. (1988). *Philosophy goes to school*. Temple University Press.
- Morin, O., Simonneaux, L., & Tytler, R. (2017). Engaging with socially acute questions: Development and validation of an interactional reasoning framework. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(7), 825–851.
- Reznitskaya, A. (2005). Empirical research in philosophy for children: Limitations and new directions. *Thinking: The Journal of Philosophy for Children*, 17(4), 4–13.
- Rondhuis, N. T. W. (2005). *Philosophical talent: Empirical investigations into philosophical features of adolescents' discourse*. Veenman.
- Sadler, T. D. (2004). Informal reasoning regarding socioscientific issues: A critical review of research. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(5), 513–536.
- Sadler, T. D., Barab, S. A., & Scott, B. (2007). What do students gain by engaging in socioscientific inquiry? *Research in Science Education*, 37(4), 371–391.
- Simonneaux, L., & Simonneaux, J. (2009). Socio-scientific reasoning influenced by identities. *Cultural Studies of Science Education*, 4(3), 705–711.
- Simonstein, F. (2019). Gene editing, enhancing and women's role. *Science and Engineering Ethics*, 25(4), 1007–1016.
- Wisch, J. K., Farrell, E., Siegel, M., & Freyermuth, S. (2018). Misconceptions and persistence: Resources for targeting student alternative conceptions in biotechnology. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 46(6), 602–611.
- Worley, P. (2016). Ariadne's Clew Absence and presence in the facilitation of philosophical conversations. *Journal of Philosophy in Schools*, 3(2).
- Zeidler, D. L., & Keefer, M. (2003). The role of moral reasoning and the status of socioscientific issues in science education. In *The role of moral reasoning on socioscientific issues and discourse in science education* (pp. 7–38). Springer.

## AGRADECIMIENTOS

Este libro no sería posible sin la revisión científica y técnica realizada por biólogos/as evolutivos/as, investigadores/as educativos, profesores/as y educadores/as de museos de ciencias. Los/as editores/as de este libro desean reconocer el papel fundamental de los revisores/as de este libro que se enumeran a continuación y agradecerles el trabajo que han realizado en este libro.

Nombre de la persona revisora	Afiliación
Alpedrinha, João	cE3c, Ciências ULisboa, Portugal
Carneiro, Susana	Escola Secundária da Trofa, Portugal
Cavadas, Bento	Polytechnic Institute of Santarém; University Lusófona, CeIED, Portugal
Corinne, Fortin	Université Paris-Est Créteil, Laboratoire de didactique André Revuz Université Paris-Cité, France
Dorđević, Mirko	Department of Evolutionary Biology, Institute for Biological Research “Siniša Stanković” - National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade, Belgrade, Serbia
Evangelia, Mavrikaki	National & Kapodistrian University of Athens (NKUA), Greece
Fiedler, Daniela	IPN - Leibniz Institute for Science and Mathematics Education, Kiel, Germany
Fonseca, Maria João	Museu de História Natural e da Ciência da Universidade do Porto, Portugal
Georgiou, Martha	Department of Biology, National and Kapodistrian University of Athens, Greece
Jeffries, Alex	Milner Centre for Evolution, Department of Life Sciences, University of Bath, UK
Jenkins, Tania	University of Geneva, Science II, Quai Ernest Ansermet 30, 1205 Geneva, Switzerland
Kampourakis, Kostas	University of Geneva, Switzerland
Katakos, Stratis	5th high school of Kallithea, Greece
Kristiansen, Kristian Holst	Department of Planning, Aalborg University Copenhagen, Denmark
Magro, Alexandra	1) Laboratoire Évolution et Diversité biologique, UMR 5174 CNRS/UPS/IRD, Toulouse, France 2) Université Fédérale de Toulouse Midi- Pyrénées – ENSFEA, Castanet-Tolosan, France
Mead, Rebecca	Milner Centre for Evolution, Department of Life Sciences, University of Bath, UK
Mira, Sara	Lagos Ciência Viva Science Centre, Portugal

Reviewer's name	Affiliation
Moormann, Alexandra	Museum für Naturkunde - Leibniz Institute for Evolution and Biodiversity Science, Berlin, Germany
Nehm, Ross H.	Department of Ecology and Evolution, Stony Brook University, USA
Pessoa, Patrícia	University of Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal; CIDTFF - Research Centre on Didactics and Technology in the Education of Trainers, Department of Education and Psychology, University of Aveiro, Portugal
Pietrzak, Barbara	Faculty of Biology, Institute of Functional Biology and Ecology, Department of Hydrobiology, University of Warsaw, Warsaw, Poland
Pinho, Catarina	CIBIO, Centro de Investigação em Biodiversidade e Recursos Genéticos, InBIO, Laboratório Associado, Portugal; BIOPOLIS Program in Genomics, Biodiversity and Land Planning, Portugal
Pinxten, Rianne	Affiliation 1: Research group Didactica, Antwerp School of Education, University of Antwerp, Belgium Affiliation 2: Behavioural Ecology & Ecophysiology research group, Department of Biology, University of Antwerp, Belgium
Realdon, Giulia	University of Camerino, Geology Section, UNICAMearth group, Italy
Rodrigues, André	Freelancer educator, Portugal
Sá-Pinto, Xana	CIDTFF, Research Centre on Didactics and Technology in the Education of Trainers, Department of Psychology and Education, University of Aveiro, Portugal
Topcu, Mustafa Sami	Yıldız Technical University, Turkey
Turpin, Sébastien	Muséum National d'Histoire Naturelle, Département Homme et Environnement - Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation, France
Valakos, Stratis	Department of Biology, National and Kapodistrian University of Athens, Greece
Zeidler, Dana L.	Department of Teaching & Learning, College of Education, University of South Florida, Tampa, Florida, USA

El libro APRENDIENDO EVOLUCIÓN A TRAVÉS DE CUESTIONES SOCIOCIENTÍFICAS ha sido amablemente traducido y revisado al español por:

Nombre de la traductora/revisora	Afiliación	
Noa Ageitos Prego	Centro Público Integrado (CPI) Curros Enríquez, España	Capítulos traducidos: 1 y 11 Capítulo revisado: 5
Ánxela Bugallo Rodríguez	Universidade da Coruña, España	Capítulo traducido: 9 Capítulos revisados: 2 y 3
Andrea Fernández Sánchez	Universidade da Coruña, España	Capítulo traducido: 4 Capítulo revisado: 10
Mónica Arias	Organismo francés de investigación en agronomía y de cooperación internacional para el desarrollo durable de las regiones tropicales y mediterráneas (CIRAD UMR PHIM), Montpellier, Francia	Capítulo traducido: 10 Capítulo revisado: 4
Inés Mosquera Bargiela	Facultade de Formación do Profesorado (USC), Lugo, España	Capítulo traducido: 5 Capítulos revisados: 1 y 11
Beatriz Becerra Olguín	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Chile	Capítulo traducido: 6 Capítulo revisado: 8
Paola Andrea Núñez Nieto	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Chile	Capítulo traducido: 8 Capítulo revisado: 6
Carolina Parraguez Morgado	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Chile	Capítulo traducido: 7 Capítulo revisado: 12
Arlette Bassaber Bahamondes	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Chile	Capítulo traducido: 12 Capítulo revisado: 7
Lucía Vázquez Ben	Universidade da Coruña, España	Capítulos traducidos: 2 y 3 Capítulo revisado: 9

El trabajo de traducción y revisión ha sido coordinado por Lucía Vázquez Ben y Noa Ageitos Prego.

