

Diseño y Evaluación de una Experiencia de Aprendizaje para la Enseñanza de la Evolución Biológica en la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural UIS, usando como ejemplo el género *Trichomycterus* (Siluriformes: Trichomycteridae), presente en cuevas de Santander

Diego Alejandro Castro Blanco

Trabajo de Grado para Optar al Título de Biólogo

Director

Sergio Andrés Marchant Rojas

Ph.D. en Ciencias Biológicas

Asesor Pedagógico

Adriana Rocío Lizcano Dallos

Ph.D. en Educación y Sociedad

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Biología

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi mamá, por ser la fuerza que me ha sostenido en cada paso de mi vida, por haberme dado todo lo necesario y más, y por enseñarme con su ejemplo a ser perseverante y valiente. Sin su amor y sacrificio, nada de esto habría sido posible.

A mi hermana, compañera de vida y hoy amiga incondicional, con quien compartí alegrías, retos y aprendizajes que nos han unido de manera única.

Y a mi sobrino, pequeño faro de alegría y esperanza, quien me inspira a seguir adelante, a luchar por un futuro mejor y a vivir con propósito.

Agradecimientos

A mis amigos Julián, Juliana y Duván, quienes han sido mi familia elegida. Cada vez que me sentí abatido o dudé de mí, estuvieron cerca para levantarme y brindarme apoyo incondicional.

A mi amigo Diego, mi compañero de carrera, quien fue creciendo conmigo y ayudándome a ser un mejor profesional. Por su apoyo, compañía y amistad, muchas gracias.

A mi papá, un hombre que siempre se ha mostrado fuerte, como un apoyo incondicional y un refugio al que puedo acudir cuando no tengo a dónde ir. Su presencia y cariño han sido fundamentales en mi vida y en este proceso académico.

A mis directores de tesis, Sergio Marchant y Adriana Lizcano, que me guiaron, asesoraron y confiaron en mí a lo largo de este largo camino. Su conocimiento, paciencia y apoyo fueron fundamentales para la realización de este trabajo y para mi crecimiento académico y personal.

A la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural de la UIS. Esta colección me vió crecer como biólogo y confirmó mi vocación por la docencia. La oportunidad de aprender y desarrollarme en este espacio fue invaluable para la realización de mi tesis y para mi formación profesional.

A Elfa, la secretaria de la Escuela de Biología. Siempre me recibía con un caluroso saludo y una amplia sonrisa, y me ayudó generosamente en más de una ocasión. Valoro profundamente su amabilidad, disposición y apoyo durante todo este proceso.

A mis amigos en Piedecuesta y a “los lindos de las canchas de voley”, quienes acompañaron mi paso por la universidad e hicieron mi día a día más llevadero y alegre. A todos aquellos que, de alguna manera, formaron parte de mi vida y la hicieron más bonita cuando se volvió difícil.

Tabla de Contenido

Introducción.....	14
1. Situación Problema.....	15
1.1 Descripción del Problema.....	15
1.2 Justificación.....	16
2. Objetivos.....	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Marco Referencial.....	17
3.1 Antecedentes.....	17
3.2 Marco legal.....	18
3.3 Marco Teórico.....	18
3.3.1 Evolución Adaptativa y no Adaptativa.....	19
3.3.2 Estudios de Adaptación Animal en Ambientes de Cuevas.....	20
3.3.3 El género <i>Trichomycterus</i> como modelo de estudio.....	20
3.3.4 Didáctica de las Ciencias Naturales y Biológicas.....	21
3.3.5 Experiencias de Aprendizaje.....	22
3.3.6 Aprovechamiento de Espacios de Museo para el Aprendizaje y la Enseñanza de la Evolución Biológica.....	23
4. Diseño Metodológico.....	24
4.1 Participantes.....	24
4.2 Técnicas de Recolección de Información.....	25

4.3 Pasos del Proyecto.....	25
4.3.1 Diseño de la Propuesta.....	25
4.3.2 Implementación y Evaluación de la Propuesta.....	28
5. Resultados.....	29
5.1 Revisión de experiencias de aprendizaje implementadas en MHN.....	29
5.1.1 Experiencias de aprendizaje: lugar, público y tema.....	29
5.1.2 Experiencias de aprendizaje: elementos usados.....	30
5.1.3 Experiencias de aprendizaje: herramientas pedagógicas.....	31
5.2 Conceptos Evolutivos y ejemplos de organismos de vida en ambientes de cueva.....	37
5.2.1 La Teoría Evolutiva.....	37
5.2.2 Selección Natural.....	42
5.2.3 Adaptación.....	46
5.2.4 Evolución en ambientes de cueva.....	48
5.3 Diseño, implementación y evaluación de la Experiencia de Aprendizaje para la enseñanza de evolución en la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural.....	51
5.3.1 Diseño de la experiencia.....	51
5.3.2 Implementación de la experiencia.....	55
5.3.3 Evaluación de la experiencia.....	59
5.3.4 Análisis de resultados.....	61
6. Conclusiones.....	66
7. Recomendaciones.....	67
Referencias bibliográficas.....	69
Apéndices.....	82

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Experiencias de aprendizaje utilizadas en Salas de Exhibición de Museos de Historia Natural.....	33
Tabla 2. Troglomorfismos presentes en animales que habitan cuevas (Galán, 2010; Malard et al., 2023; Márquez Carbajal et al., 1996; Romero & Green, 2005).....	48
Tabla 3. Competencias e indicadores para la experiencia en la Sala de Exhibición del MHN con base en los EBC.....	51
Tabla 4. Secuencia del diseño de la Experiencia de Aprendizaje para la enseñanza de la evolución animal.....	52
Tabla 5. Resultados individuales y estadísticos descriptivos del PreTest y el PostTest.....	59

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Participantes realizando el PreTest en la plataforma quizizz.com.....	55
Figura 2. Reproducción de los videos teóricos en las pantallas de la Sala de Exhibición MHN-UIS.....	56
Figura 3. Discusión grupal sobre la Evolución Biológica.....	57
Figura 4. Participantes discutiendo casos evolutivos en grupos más pequeños.....	58
Figura 5. Exposición de caso evolutivo hipotético por parte de una participante.....	58
Figura 6. Distribución de puntajes antes y después de la experiencia de aprendizaje.....	61

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Formato de consentimiento informado.....	82
Apéndice B. PreTest.....	84
Apéndice C. PostTest.....	86
Apéndice D. Evolución en ambientes de cueva.....	89

Glosario

Alélicas (frecuencias): proporción en la que se encuentran las diferentes variantes (alelos) de un gen específico dentro de una población.

Alometría: estudio de los cambios en la proporción de las partes del cuerpo de un organismo en relación con el crecimiento general.

Alóctona: que se origina en un lugar diferente; se refiere a la energía o materia orgánica que ingresa al ecosistema de la cueva desde el exterior.

Alopátrica (especiación): formación de nuevas especies que ocurre cuando las poblaciones quedan geográficamente aisladas entre sí.

Amplexus: comportamiento de apareamiento en el que el macho sujeta a la hembra para asegurar la fecundación de los huevos.

Bioespeleología: rama de la biología que estudia los organismos que viven en las cuevas.

cis-reguladora (secuencia): segmento de ADN no codificante que regula la expresión de genes cercanos, actuando como un "interruptor" genético.

Didáctica: disciplina que estudia los procesos y estrategias de enseñanza y aprendizaje.

Ecolocación: capacidad de orientarse emitiendo sonidos y analizando su eco.

Epigenética: estudio de cambios hereditarios en la función de los genes que no implican una alteración en la secuencia de ADN.

Epigeo: organismo que vive sobre la superficie del suelo.

Epikárstico: relativo a la zona superficial de un terreno kárstico (formado por rocas solubles), por donde se infiltra el agua.

Estasis: período prolongado en la historia de una especie sin cambios evolutivos morfológicos significativos.

Etológico: relativo al comportamiento animal.

Filogenético: relativo a la historia evolutiva y las relaciones de parentesco entre especies.

Fotoperiodo: duración del período de luz en un ciclo de 24 horas.

Heterocronía: cambio evolutivo en el ritmo o en el tiempo de los procesos de desarrollo de un organismo.

Hipogeo: organismo que vive bajo la superficie del suelo, como en cuevas.

Indagación Dialógica Problematizadora (IDP): enfoque pedagógico que utiliza el diálogo y el planteamiento de problemas para guiar el aprendizaje.

Macroevolución: evolución a gran escala, que da lugar a la aparición de nuevos grupos taxonómicos (ej. géneros, familias).

Microevolución: cambios evolutivos a pequeña escala, como las variaciones en las frecuencias alélicas dentro de una población.

Morfogenético: relativo al proceso biológico que da forma y estructura a un organismo durante su desarrollo.

Museográfico: relativo a las técnicas y prácticas de exhibición en un museo.

Neodarwinismo: Teoría Sintética de la Evolución, que integra la selección natural de Darwin con la genética moderna.

Neuromasto: órgano sensorial de peces y anfibios que detecta vibraciones en el agua.

Ontogenia: desarrollo de un organismo desde su concepción hasta la edad adulta.

Paedomorfosis: fenómeno en el que un adulto conserva características de su etapa juvenil.

Parapátrica (especiación): formación de nuevas especies entre poblaciones que no están completamente aisladas, sino que divergen a lo largo de una zona de contacto.

Peramorfosis: fenómeno en el que el desarrollo de un rasgo se acelera o prolonga, resultando en características exageradas en el adulto.

Pleiotrópico: se refiere a un gen que afecta a múltiples características fenotípicas.

Preadaptación: rasgo que evolucionó para una función, pero que fortuitamente resulta útil para una nueva función en un entorno diferente.

Prosencéfalo: parte anterior del cerebro en desarrollo en los vertebrados.

Quimioautotrofia: producción de alimento a partir de reacciones químicas con sustancias inorgánicas, sin necesidad de luz.

Rudimentación: proceso evolutivo de reducción de una estructura anatómica en tamaño y función.

Siluriformes: orden de peces conocidos comúnmente como bagres o peces gato.

Simpatría: ocurrencia de poblaciones o especies en la misma área geográfica.

Singamia: fusión de dos gametos (células sexuales) durante la fecundación.

Sistemática: ciencia que clasifica a las especies según su historia evolutiva.

Taxón: grupo de clasificación biológica (ej. especie, género, familia).

Teleosteo: grupo mayoritario de peces óseos.

Trade-off: situación en la que la mejora de un rasgo evolutivo se produce a costa del detrimento de otro.

Troglobio: organismo obligado a vivir permanentemente en cuevas.

Troglifauna: conjunto de animales que habitan en cuevas.

Troglófilo: organismo que prefiere vivir en cuevas y puede completar su ciclo vital en ellas, pero no está obligado a hacerlo.

Troglomorfismo: conjunto de rasgos convergentes (ej. pérdida de ojos, elongación de apéndices) típicos de los animales cavernícolas.

Trogloxeno: animal que utiliza las cuevas para refugiarse o alimentarse, pero depende del exterior para vivir.

Resumen

Título: Diseño y Evaluación de una Experiencia de Aprendizaje para la Enseñanza de la Evolución Biológica en la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural UIS, Usando como Ejemplo el Género *Trichomycterus* (Siluriformes: Trichomycteridae), Presente en Cuevas de Santander^{1*}

Autor: Diego Alejandro Castro Blanco^{2**3**}

Palabras Clave: Evolución biológica, didáctica de las ciencias, experiencia de aprendizaje, museos de historia natural, evolución cavernícola, *Trichomycterus*, educación secundaria.

Descripción: La enseñanza de la evolución biológica presenta desafíos significativos para los estudiantes de secundaria, y los museos de historia natural son espacios con un gran potencial educativo, aunque a menudo subutilizados para este fin. Este trabajo presenta el diseño, implementación y evaluación de una experiencia de aprendizaje sobre evolución, dirigida a estudiantes de noveno grado, en la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural de la Universidad Industrial de Santander (MHN-UIS). La estrategia utiliza como caso de estudio el género de peces *Trichomycterus*, presente en ecosistemas de cueva y de superficie en Santander, para ilustrar conceptos como la selección natural, la adaptación y la evolución regresiva. El diseño metodológico se basó en una revisión de herramientas pedagógicas empleadas en otros museos y una fundamentación teórica sobre la biología evolutiva en ambientes cavernícolas. La experiencia, de 75 minutos, se implementó con 12 estudiantes e incluyó recursos como videos de autoría propia, discusiones guiadas, material fotográfico y una actividad lúdica. La efectividad de la intervención se evaluó cuantitativamente mediante un pretest y un postest, analizando los datos con una prueba t-student para muestras relacionadas. Los resultados demostraron un incremento estadísticamente significativo ($p < 0.05$) en la comprensión de los conceptos evolutivos por parte de los participantes tras la intervención. Se concluye que la experiencia diseñada es una herramienta didáctica efectiva que no solo mejora la asimilación de conceptos abstractos de la evolución, sino que también fomenta la apropiación del patrimonio biológico local. El trabajo aporta un modelo metodológico validado que puede ser replicado y adaptado por educadores en el MHN-UIS y otros contextos museales.

^{1*} Trabajo de Grado

^{2**} Facultad de Ciencias. Escuela de Biología. Biología. Director: Sergio Andrés Marchant Rojas, Ph.D. en Ciencias Biológicas.

^{3**} CEDEDUIS. Codirectora: Adriana Rocío Lizcano Dallos, Magister en Tecnologías de la Información aplicadas a la Educación.

Abstract

Title: Design and Evaluation of a Learning Experience for Teaching Biological Evolution in the Exhibition Hall of the UIS Natural History Museum, Using the Genus *Trichomycterus* (Siluriformes: Trichomycteridae), Found in the Caves of Santander, as a Case Study ^{4*}

Author: Diego Alejandro Castro Blanco ^{5**6**}

Keywords: Biological evolution, science education, learning experience, natural history museums, cave evolution, *Trichomycterus*, secondary education.

Description: The teaching of biological evolution presents significant challenges for high school students, and natural history museums are spaces with great educational potential, although they are often underutilized for this purpose. This work presents the design, implementation, and evaluation of a learning experience on evolution aimed at ninth-grade students, held in the Exhibition Hall of the Natural History Museum of the Universidad Industrial de Santander (MHN-UIS). The strategy uses the fish genus *Trichomycterus*, present in cave and surface ecosystems in Santander, as a case study to illustrate concepts such as natural selection, adaptation, and regressive evolution. The methodological design was based on a review of pedagogical tools used in other museums and a theoretical foundation of evolutionary biology in cave environments. The 75-minute experience was implemented with 12 students and included resources such as original videos, guided discussions, photographic material, and a game-based activity. The effectiveness of the intervention was quantitatively evaluated using a pre-test and a post-test, with the data analyzed using a paired samples t-test. The results showed a statistically significant increase ($p < 0.05$) in the participants' understanding of evolutionary concepts following the intervention. It is concluded that the designed experience is an effective educational tool that not only improves the assimilation of abstract evolutionary concepts but also fosters an appreciation for local biological heritage. This work provides a validated methodological model that can be replicated and adapted by educators at the MHN-UIS and in other museum contexts.

^{4*} Thesis/Final Degree Project

^{5*} Faculty of Sciences. School of Biology. Advisor: Sergio Andrés Marchant Rojas, Ph.D. in Biological Sciences.

^{6*} CEDEDUIS. Co-advisor: Adriana Rocio Lizcano Dallos, Master in Information Technologies applied to Education.

Introducción

Aunque la comprensión de la evolución biológica es fundamental en la educación secundaria, su aprendizaje presenta desafíos constantes que radican principalmente sobre ideas previas equivocadas que los estudiantes tienen acerca de los procesos evolutivos (Galli & Meinardi, 2015). Las salas de exhibición de los Museos de Historia Natural son entornos privilegiados, aunque a menudo subutilizados, para la enseñanza de la evolución biológica. Estos espacios permiten diseñar "experiencias de aprendizaje" que son interacciones directas con el entorno que facilitan la adquisición y aplicación de conocimientos (Kolb, 2014). Como tal, su implementación representa una estrategia prometedora para abordar las dificultades conceptuales de los estudiantes en este campo (León, 2019).

En Colombia, los Museos de Historia Natural se han centrado en exhibir la biodiversidad del país. Sin embargo, la evolución biológica rara vez es el eje central de sus exposiciones, con la notable excepción del Museo Universitario de la Universidad de Antioquia (López Gómez, 2014). Para abordar este vacío, el presente trabajo propone el diseño de una nueva Experiencia de Aprendizaje en la sala de exhibición del MHN-UIS, enfocada en enseñar evolución a estudiantes de bachillerato. La estrategia consiste en explicar conceptos evolutivos de manera atractiva, utilizando como ejemplos la fauna cavernícola del departamento de Santander. El diseño de esta experiencia se fundamenta en el análisis de iniciativas similares en Colombia y el extranjero, así como en una rigurosa revisión bibliográfica que garantice la precisión del contenido biológico.

El alcance de este trabajo trasciende el grupo de estudio inicial, pues la Experiencia de Aprendizaje quedará como un recurso pedagógico valioso a disposición del estudiantado y profesorado que visite el MHN-UIS. Su contribución es doble: ofrece una herramienta

didáctica replicable para educadores y, a la vez, divulga ciencia sobre la evolución biológica usando la fascinante fauna de las cuevas como ejemplo.

El proyecto corresponde a una investigación cualitativa (Moreira, 2002). Esta aproximación es fundamental, ya que en lugar de solo medir resultados numéricos, busca comprender e interpretar el fenómeno educativo desde la observación directa y participante. Se analizarán los diálogos, las interacciones y las percepciones de los estudiantes para obtener datos que, una vez interpretados, permitirán generar conclusiones sobre la eficacia de la propuesta para superar las barreras de aprendizaje.

1. Situación Problema

1.1 Descripción del Problema

La enseñanza de la Teoría de la Evolución sigue siendo un desafío pedagógico. A pesar de su importancia fundamental en las Ciencias Biológicas, los estudiantes de bachillerato suelen tener dificultades para comprenderla. Esto se debe a preconceptos arraigados y a la complejidad de visualizar procesos abstractos como la selección natural (Galli & Meinardi, 2015; Robles et al., 2015). Estas dificultades también se reflejan en la distinción de conceptos clave como adaptación y mutación, o entre evolución adaptativa y no adaptativa (p. ej., deriva genética).

Las experiencias de aprendizaje inmersivas ofrecen un medio eficaz para superar estos obstáculos, pero su uso en la enseñanza de la evolución sigue siendo limitado (León, 2019). Los museos de historia natural son escenarios ideales para el aprendizaje fuera del aula. Sin embargo, su potencial para explicar procesos evolutivos complejos está subutilizado. Una oportunidad pedagógica poco explorada es el estudio de la fauna de cuevas, cuyos organismos presentan adaptaciones extremas a la oscuridad y a la escasez de recursos.

Estos rasgos constituyen ejemplos tangibles de la selección natural y otros mecanismos evolutivos (Galán & Herrera, 1998).

Ante este panorama, existe un vacío claro: la falta de estrategias innovadoras que conecten el potencial educativo de los museos con ejemplos locales y atractivos como la fauna cavernícola. Este proyecto busca llenar ese vacío mediante el diseño de una experiencia de aprendizaje que aproveche estos recursos, transformando la forma en que los estudiantes se acercan a la biología evolutiva (Salamanca et al., 2020).

1.2 Justificación

La necesidad de este trabajo surge de una contradicción central en la educación colombiana: mientras los currículos nacionales exigen la enseñanza de la Evolución, los estudiantes continúan enfrentando enormes desafíos para comprenderla. Superar este obstáculo es crucial no solo para formar ciudadanos científicamente alfabetizados, sino también para inspirar a la próxima generación de científicos.

Este proyecto se justifica porque busca mitigar este problema desde múltiples frentes, generando valor para diversos actores. Para el sistema educativo, ofrece una herramienta pedagógica innovadora que se desarrolla en el Museo de Historia Natural de la UIS, un espacio ideal para complementar el aprendizaje del aula. Los estudiantes se benefician de una experiencia didáctica que traduce conceptos abstractos en algo tangible y emocionante, mientras que los docentes obtienen un recurso práctico para enriquecer sus clases. Adicionalmente, la iniciativa tiene un profundo impacto regional y social. Al usar la biodiversidad subterránea de Santander como hilo conductor, se pone en valor un patrimonio natural único, educando al público general sobre su importancia. Finalmente, este trabajo aporta un modelo de divulgación científica efectiva, mostrando un camino para que otros investigadores puedan transformar su conocimiento en experiencias significativas y accesibles para toda la comunidad.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Generar una experiencia de aprendizaje para la enseñanza de la evolución animal en ambientes de cuevas utilizando ejemplos de la biodiversidad dentro y fuera de cuevas, enfocada en el contexto del Museo de Historia Natural UIS.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar y describir herramientas pedagógicas y experiencias de aprendizaje utilizadas en Salas de Exhibición de Museos de Historia Natural para enseñar la evolución animal en ambientes de cuevas.

Investigar y documentar organismos que hayan evolucionado en la vida en ambientes de cueva a través de una revisión bibliográfica.

Diseñar una experiencia de aprendizaje específica para la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural UIS, utilizando ejemplos de la biodiversidad de Santander, que promueva la comprensión de la evolución animal en ambientes de cuevas.

3. Marco Referencial

3.1 Antecedentes

El Museo de Historia Natural de la UIS (MHN-UIS) constituye un espacio con una extensa trayectoria educativa, siendo el escenario idóneo para esta investigación. Desde su fundación en 1967, se ha regido por los principios del ICAM: investigar, coleccionar, conservar, comunicar y exhibir (Escuela de Biología UIS, 1998). Su Sala de Exhibición, inaugurada en 1972, materializa esta vocación pedagógica. La colección expositiva, que inició con un ejemplar de chotacabras (*Chordeiles acutipenni*), cuenta hoy con cerca de 500 piezas que incluyen invertebrados, vertebrados y fósiles, distribuidos en seis dioramas que

recrean los ecosistemas más representativos de Santander, desde el páramo hasta el arrecife de coral. La misión actual de la sala es divulgar y fomentar la apropiación de esta biodiversidad. Dado que su audiencia predominante son estudiantes de educación básica y media de toda la región (precisamente el público objetivo de este proyecto), el MHN-UIS no es solo un contenedor de especímenes, sino un ecosistema pedagógico activo y perfectamente alineado para el diseño y la evaluación de esta propuesta.

3.2 Marco legal

En el desarrollo del presente trabajo se tuvo en cuenta la normatividad vigente sobre la participación de menores de edad en actividades educativas e investigativas. En concordancia con la Ley 1098 de 2006 - Código de la Infancia y la Adolescencia, así como con los lineamientos éticos de la Universidad Industrial de Santander, se elaboró un formato de consentimiento informado dirigido a los padres o acudientes de los estudiantes participantes que se encuentra en la sección de apéndices (Apéndice A).

3.3 Marco Teórico

La Teoría de la Evolución se refiere al cambio en las características de las poblaciones biológicas a lo largo del tiempo. La evolución se produce por la acción combinada de la variación genética, la selección natural y la deriva genética (Futuyma, 2013). La selección natural es el proceso mediante el cual los individuos mejor adaptados a su entorno tienen más éxito en la supervivencia y la reproducción que aquellos que no están tan bien adaptados (Darwin & Bynum, 2009). Una adaptación, por otro lado, es una característica heredable que aumenta la capacidad de un organismo para sobrevivir y reproducirse en un ambiente específico (Stearns, 2014). Las adaptaciones pueden ser estructurales, como los patrones de color en las mariposas que las camuflan en su entorno, o comportamentales, como las técnicas de caza de las aves depredadoras.

3.3.1 Evolución Adaptativa y no Adaptativa

La comprensión de la evolución adaptativa y no adaptativa puede ser difícil para los estudiantes debido a varios factores. Uno de los principales obstáculos es la noción errónea de que la evolución es un proceso progresivo, en el que los organismos evolucionan hacia una forma superior y más compleja (Hunter et al., 2018). Además, la complejidad del concepto de selección natural y la dificultad para visualizar su acción en una población pueden ser desafíos para los estudiantes (Nehm & Schonfeld, 2008). También puede ser difícil el poder distinguir entre la evolución adaptativa y no adaptativa, especialmente en casos en los que la evolución no es obviamente adaptativa, como en los casos de evolución neutral o evolución por deriva genética (Kampourakis & Zogza, 2008).

Un caso en el que los cambios en las características de las poblaciones biológicas no son resultado de adaptación, como se mencionó, es la deriva genética, que tiene un efecto más notable en poblaciones con un número reducido de individuos y que consiste en la pérdida o ganancia, por acción del azar, de caracteres genéticos como consecuencia de fenómenos como: (1) el azar de la vida y muerte de algunos individuos dentro de una población y, (2) la de células sexuales con contenido genético distinto que puede, o no, participar en la singamia y, por tanto, ser heredado a la siguiente generación (Gould & Lewontin, 1982).

La evolución neutral, por otro lado, obedece a la Teoría Neutral de la Evolución Molecular, planteada por Motoo Kimura en 1968, que se refiere a las mutaciones que ocurren a nivel molecular que no afectan la aptitud biológica (la capacidad de supervivencia y reproducción) del organismo y, por tanto, no tiene implicaciones adaptativas. Kimura afirma que la mayoría de las mutaciones que ocurren en el genoma son mutaciones silenciosas que no se ven afectadas por condiciones ambientales y no están sujetas a selección (Kimura & Kimura, 2020).

3.3.2 Estudios de Adaptación Animal en Ambientes de Cuevas

Los estudios de adaptación animal en ambientes de cuevas han proporcionado una gran cantidad de información sobre cómo los animales se adaptan a su entorno para sobrevivir. Estos estudios han revelado que los animales en cuevas a menudo tienen características únicas y se han adaptado de maneras interesantes para sobrevivir en ambientes oscuros y sin luz. Por ejemplo, algunos animales en cuevas han desarrollado sistemas sensoriales especializados, como la ecolocación, para navegar en la oscuridad (Bradford et al., 2013). El estudio de la adaptación animal en ambientes de cuevas puede ser una oportunidad emocionante para los estudiantes para explorar conceptos relacionados con la selección natural, la evolución y la biología animal de una manera única y fascinante.

3.3.3 El género *Trichomycterus* como modelo de estudio

El género *Trichomycterus* pertenece a la familia Trichomycteridae, un grupo de bagres pequeños que se distribuyen desde Costa Rica hasta el sur de Sudamérica que tiene alrededor de 300 especies descritas que exhiben gran diversidad morfológica y ecológica (Rodríguez, 2011). Se conocen 179 especies de *Trichomycterus*, dentro de las cuales hay poblaciones epigeas y poblaciones hipogeas.

En Colombia se han registrado siete especies de peces cavernícolas del género *Trichomycterus*, todas presentes en aguas del departamento de Santander (Lasso et al., 2018). Esta coexistencia de especies cavernícolas y de superficie permite contrastar sus rasgos morfológicos.

Las poblaciones de superficie presentan capas de pigmentación que pueden manifestarse en manchas y líneas de colores marrones o pigmentación homogénea que va de colores grises a marrones y presencia de ojos bien desarrollados (Castellanos-Morales & Galvis, 2012; Rodríguez, 2011). Por su parte, las poblaciones cavernícolas troglóbias pueden

no tener ojos o tenerlos pero no son funcionales y puede no haber pigmentación (Castellanos-Morales, 2008; Castellanos-Morales, 2018).

La diversidad morfológica entre especies del género y entre especies cavernícolas y de superficie, hace de *Trichomycterus* un grupo idóneo para abordar la enseñanza de la evolución, pues permite evidenciar los distintos caminos que toma la evolución en diferentes ambientes y presiones selectivas como lo son las aguas de superficie y de cueva; constituyéndose como un modelo accesible y cercano para la comprensión de los mecanismos de evolución biológica.

3.3.4 Didáctica de las Ciencias Naturales y Biológicas

La didáctica es una ciencia que emerge como una respuesta a los desafíos que los estudiantes pueden enfrentar en su proceso de aprendizaje, proporcionando soluciones a través de un conjunto de estrategias y enfoques metodológicos presentados por los educadores a los alumnos (Abreu et al., 2017), con el objetivo de organizar situaciones de enseñanza y aprendizaje para la formación integral de un estudiante (Mallart, 2001).

Según De Camilloni (2007), existen didácticas específicas que delimitan el campo de la enseñanza, como la Didáctica de las Ciencias Naturales y Biológicas. Esta aplica estrategias metodológicas para enseñar fenómenos naturales y biológicos mediante enfoques como aprendizaje activo, enseñanza basada en problemas e investigación. Actualmente se busca erradicar errores conceptuales, sembrar conocimientos correctos y priorizar la comprensión y el pensamiento crítico por encima de la memoria (Camejo & Molina, 2007).

En Goldbach et al., (2009) se afirma que las actividades experimentales funcionan como un vehículo importante para la enseñanza de las Ciencias Biológicas debido a que familiarizan a los estudiantes con conceptos que suelen ser complejos de entender y visualizar en la vida cotidiana; por lo cual, un acercamiento a espacios fuera del aula aumenta el interés y se considera complementario al proceso educativo, ya que se fomenta un espíritu

investigativo en el que el estudiante resulta por descubrir sus propios métodos para abordar el fenómeno y sus concepciones acerca del mismo.

Bermúdez et al. (2015) proponen la Indagación Dialógica Problematizadora (IDP) como enfoque para la enseñanza de la Biología. Este modelo se basa en los tres vértices del Triángulo Didáctico: 1) el docente, encargado de la enseñanza y de crear situaciones en clase; 2) el alumno, quien resuelve dichas situaciones; 3) el conocimiento, transmitido por el docente y aprendido por el alumno.

En la IDP, la indagación permite que el docente explore un tema con los estudiantes y que estos expresen sus ideas previas mediante preguntas orientadas a construir conceptos, análisis y argumentos. El diálogo se desarrolla en un intercambio cara a cara que facilita la co-construcción del conocimiento a través de actividades conjuntas y negociadas. Finalmente, la problematización plantea situaciones sin solución inmediata para abrir nuevos temas e interrogantes, aumentando así el interés y la comprensión del estudiante (Bermúdez et al., 2015).

3.3.5 Experiencias de Aprendizaje

Las experiencias de aprendizaje se definen como la adquisición, retención y aplicación de conocimientos, habilidades, valores y actitudes a través de una experiencia o interacción con el entorno o con otros individuos (Kolb, 2014). Es importante destacar que estas experiencias de aprendizaje pueden ocurrir tanto dentro como fuera del aula, y pueden ser formales o informales. Dentro de las experiencias de aprendizaje se pueden aplicar herramientas pedagógicas que son cualquier recurso o instrumento facilitador que hacen parte del aprendizaje y la enseñanza, y potencia la adquisición del conocimiento y la formación del estudiante (Valderrama, 2011).

Dentro de los ejemplos de herramientas pedagógicas se encuentra la indagación, que es con la que se busca que el estudiante tenga un acercamiento progresivo al conocimiento

científico, explore fenómenos y conceptos mediante la formulación de hipótesis y preguntas que propicien el desarrollo del conocimiento y la comprensión de ideas científicas (Duarte, 2017). De acuerdo con Reyes-Cárdenas y Padilla (2012), no se tiene un consenso sobre cómo definir la indagación, pero muchos educadores la han utilizado como una respuesta al énfasis que tenía la ciencia en la acumulación de conocimientos, buscando adquirir, por el contrario, actitudes y habilidades para la ciencia; así mismo, según Ariño (2015), la indagación guiada es una forma de alcanzar un aprendizaje significativo ampliando la estructura conceptual de los fenómenos naturales.

También, en el presente es posible tener herramientas gracias al avance en la tecnología, como lo son la Realidad Aumentada (RA) y la Realidad Virtual (RV). La RA trae elementos del mundo virtual al mundo real y permite la interacción del usuario con componentes de ambos mundos superponiendo lo virtual sobre lo real; mientras que al RV crea un ambiente meramente virtual que aísla cualquier elemento del mundo real del usuario, haciendo uso de gafas y audífonos de RV para una experiencia inmersiva. Ambas herramientas se han usado para el área de la educación, especialmente la RA (Selzer et al., 2018).

3.3.6 Aprovechamiento de Espacios de Museo para el Aprendizaje y la Enseñanza de la Evolución Biológica

Hoy en día, los museos contemporáneos no sólo conservan obras, sino que priorizan comunicar e instruir al público. Así, la idea de que los visitantes aprendan y se diviertan se convierte en un concepto novedoso dentro de los propósitos de los museos (García-Sampedro & Berciano, 2018).

Los museos ofrecen un entorno enriquecedor para el aprendizaje fuera del aula. Este potencial se potencia mediante herramientas pedagógicas aplicadas en las salas de exhibición de MHN, como talleres evaluativos y cuestionarios (Alleman et al., 2014; Alzate Agudelo &

Guevara Guerrero, 2021; Machado & López, 2019; Rajal, 2018; Ramírez-Castaño et al., 2015); fichas informativas, lecturas y exposición de textos y pósters científicos (Alvarez, 2022; de Camus Sáez & Albaladejo, 2017; González & Ardila, 2022; Hernández et al., 2016); así como recursos de Realidad Virtual y Aumentada (Guisasola et al., 2005; Rodríguez, 2022; Sarracino, 2014; Urrego Sandoval, 2022; Valle Díaz Del, 2018).

Estos espacios permiten explorar conceptos científicos complejos, como la evolución animal, a través de exhibiciones, programas educativos y actividades interactivas. La interacción directa con los objetos facilita la comprensión y despierta el interés en las Ciencias Biológicas (Falk et al., 2007).

De acuerdo con de Camus Sáez y Albaladejo (2017), los museos son lugares idóneos para divulgar la evolución biológica y sus mecanismos. Sin embargo, no todos han logrado transmitirla de manera efectiva y, en algunos casos, ni siquiera la han incorporado como tema de exhibición.

4. Diseño Metodológico

4.1 Participantes

La experiencia de aprendizaje planteada en el presente trabajo tuvo como público objetivo a 12 estudiantes del grado noveno de la Institución Educativa Técnico Damaso Zapata entre edades de 13 a 16 años, según lo manifestado por la institución.

Si bien los Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales (MEN, 2006) presentan los referentes sobre evolución biológica en la sección de los grados décimo y undécimo, en la práctica los contenidos son abordados en el noveno grado. Esto debido a que las mallas curriculares de la mayoría de las instituciones educativas incluyen la enseñanza de

la evolución biológica como cierre del ciclo de básica secundaria para continuar con temas más orientados hacia la química en el ciclo de media secundaria.

4.2 Técnicas de Recolección de Información

La recolección de información se realizó mediante la aplicación de un cuestionario antes de la experiencia (PreTest) (Apéndice B) y uno al finalizar (PostTest) (Apéndice C), diseñados con el fin de identificar los conocimientos previos de los participantes en torno a conceptos y procesos evolutivos y, posteriormente, evaluar el aprendizaje alcanzado después de la experiencia de aprendizaje. Ambos instrumentos consistieron en una serie de preguntas de selección múltiple con única respuesta, que buscaban evidenciar la identificación y comprensión de los principales conceptos evolutivos.

4.3 Pasos del Proyecto

4.3.1 Diseño de la Propuesta

4.3.1.1 Caracterización de experiencias de aprendizaje y herramientas pedagógicas implementadas en Salas de Exhibición de MHN. Se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de identificar y caracterizar experiencias de aprendizaje implementadas en Salas de Exhibición de Museos de Historia Natural para la enseñanza de la evolución biológica. La búsqueda se desarrolló en bases de datos académicas de corriente principal como Google Scholar, Scopus y Web of Science, utilizando palabras clave como “evolución biológica”, “selección natural”, “adaptación biológica”, “museo”, “sala de exhibición”, “troglofauna” y “cuevas”. También se consultaron las referencias citadas en los artículos revisados, páginas web de museos reconocidos, revistas especializadas, comunidades de educadores, blogs y otros recursos en línea, complementando la exploración con herramientas de inteligencia artificial como Chat GPT para enlistar museos y experiencias relevantes.

Para que las experiencias se tuvieran en cuenta debían cumplir los siguientes requisitos: 1) debían haber estado asociadas a un MHN, ya sea en su sala de exhibición o en otro espacio supervisado por personal de la Sala de Exhibición; 2) la descripción en el artículo debe ser lo suficientemente detallada como para permitir una correcta caracterización de la experiencia y; 3) era necesario que la experiencia contara con una o más herramientas pedagógicas diferentes a un recorrido guiado común.

4.3.1.2 Construcción del marco conceptual para la experiencia. Se llevó a cabo una revisión bibliográfica selectiva y estructurada, orientada a reunir los conceptos fundamentales de la teoría evolutiva. Se abordó la evolución biológica, la selección natural, la adaptación biológica y se hizo énfasis en la evolución cavernícola regresiva, sus procesos genéticos y de desarrollo. Este enfoque busca presentar a los participantes un caso de evolución diferente al concepto tradicional de progreso.

La información se obtuvo de textos de divulgación científica, materiales académicos de libre acceso y libros especializados disponibles en bases de datos en línea y en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander. Así se consolidó una base conceptual sólida para aplicar en un espacio museográfico.

La selección y delimitación de los conceptos se orientó con los Estándares Básicos de Competencias (EBC) en Ciencias Naturales del Ministerio de Educación Nacional (MEN, 2006). Estos estándares guían la formulación de planes de área en las instituciones educativas y proponen que, en Educación Media, los estudiantes se apropien de conceptos clave como diversidad biológica, ADN, mutación, selección natural, herencia y adaptación. Sin embargo, en la práctica estos temas suelen abordarse en noveno grado como cierre de la Básica Secundaria. Con base en los EBC, puede inferirse que un estudiante de Media cuenta con una aproximación inicial a los conceptos de microevolución.

Para ejemplificar estos conceptos en la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural UIS se seleccionaron organismos representativos de la evolución animal, principalmente especies no cavernícolas. Para el caso de la evolución cavernícola regresiva se usaron siete especies locales del género *Trichomycterus* (Siluriformes: Trichomycteridae), presentes tanto en aguas cavernícolas como en superficie en Santander. Este enfoque permitió vincular un referente local con los conceptos teóricos generales.

4.3.1.3 Diseño de la Experiencia de Aprendizaje. Se diseñó una experiencia de aprendizaje para la enseñanza de la evolución animal y se usó el género *Trichomycterus*, grupo de peces gato de hábitos cavernícolas o de superficie, para reforzar la teoría vista. Todo el contenido teórico necesario para la implementación de la experiencia se obtuvo como se expone en el apartado 4.3.1.2, y fue delimitado teniendo en cuenta lo contemplado en los Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales propuestos por el Ministerio de Educación Nacional (MEN, 2006). Las herramientas y recursos pedagógicos a ser usados en la propuesta se escogieron teniendo en cuenta la revisión expuesta en el apartado 4.3.1.1. Se procuró que la actividad fuera dinámica y participativa, incluyendo herramientas como fotografías, videos, analogías y otros recursos, alcanzando un equilibrio entre lo científico y lo didáctico.

Los videos reproducidos en la actividad son de autoría propia. Se hizo uso de imágenes, videos y música de libre acceso, con licencia *Creative Commons*. El audio fue grabado utilizando el software Shure MOTIV Mix, una aplicación que permite la grabación y mezcla de audio en alta calidad. La edición que permitió el producto final audiovisual fue posible con ayuda del programa CapCut para escritorio, un software de edición multimedia que permitió integrar y ajustar los contenidos del video.

De igual manera, las fotografías utilizadas en el material educativo para las explicaciones y discusiones grupales se obtuvieron de un banco de imágenes de acceso libre

con licencia Creative Commons. La selección no buscó tener especies específicas, sino representaciones visuales de organismos con características específicas como alas, cola, plumas, ojos, pigmentos y otros y que habitaran ambientes diferenciados (bosque seco, bosque húmedo, río de superficie y cuevas) que permitieran ilustrar adecuadamente los conceptos de evolución y adaptación animal dentro y fuera de cuevas.

4.3.2 Implementación y Evaluación de la Propuesta

La experiencia de aprendizaje fue implementada el día 9 de junio del año 2025 dentro de la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural UIS y se aplicó a 12 estudiantes del grado noveno de la Institución Educativa Técnico Damaso Zapata. La actividad estuvo a cargo del guía responsable de este trabajo, quien contaba con la capacitación teórica y didáctica necesaria para una correcta ejecución.

Se diseñó la experiencia para una duración de 50 minutos y se dividió en tres partes: el inicio, el desarrollo y el cierre. En el inicio se recibió a los estudiantes para contarles que estaban a punto de hacer parte de una experiencia para aprender sobre evolución biológica y se sometieron a un cuestionario pre experiencia. Después, en el desarrollo, se incluyeron videos, discusiones grupales, fichas técnicas, preguntas orientadoras y un juego dinámico y grupal. Finalmente, se evaluó el conocimiento que se adquirió gracias a la experiencia con un cuestionario final.

Como actividad adicional, se realizó un grupo focal con el objetivo de conocer las percepciones y sugerencias de los participantes. En esta actividad se hicieron preguntas como “¿qué les pareció la actividad?”, “¿consideran que aprendieron algo el día de hoy?” “¿qué les gustaría que hubiese sido diferente en la experiencia?” “¿fue clara la información que se les ofreció?”.

Para evaluar el impacto de la actividad se tomaron los valores obtenidos por los participantes en los cuestionarios pre (PreTest) y post experiencia (PostTest) y se analizaron

los resultados con la ejecución de pruebas estadísticas. Para determinar si los valores estaban distribuidos con normalidad se realizó una prueba de normalidad Shapiro-Wilk y, para conocer si el impacto de la experiencia había sido estadísticamente significativo, se aplicó la prueba t-student para muestras relacionadas.

5. Resultados

5.1 Revisión de experiencias de aprendizaje implementadas en MHN

Se identificaron 19 experiencias de aprendizaje implementadas en museos de historia natural, de las cuales 9 se realizaron en Colombia y 10 en el extranjero. Solo tres ubicaban la evolución biológica como tema central y únicamente una de ellas se desarrolló en Colombia.

En la Tabla 1 se expone el listado de experiencias de aprendizaje y su correspondiente caracterización, en donde se describe el lugar en el que se realizó la experiencia, el público hacia el que va o puede ser dirigida, el tema principal de la experiencia, la descripción general, los elementos físicos o materiales que fueron requeridos para que la experiencia se pudiera dar, las herramientas pedagógicas y la referencia bibliográfica.

5.1.1 Experiencias de aprendizaje: lugar, público y tema

De las 19 experiencias caracterizadas, nueve se realizaron en MHN en Colombia y las 10 restantes en países de Europa y Latinoamérica (Tabla 1). Solo tres tienen como tema principal el concepto de evolución biológica (de Camus Sáez & Albaladejo, 2017; Sánchez Mora & Ramírez, 2016; López Gómez, 2014), pero ninguna enfocada a casos de evolución ocurridos en biodiversidad presentes en cuevas y solo la descrita por López Gómez (2014) se realizó en Colombia.

Catorce de las 19 experiencias pueden ser aplicadas a público infantil y juvenil (por debajo de los 17 años) y, dentro de las cinco restantes se encuentran dos de las tres con la evolución biológica como tema principal, que están destinadas a estudiantes de diplomado

(Sánchez Mora & Ramírez, 2016) o no está especificado el público objetivo (de Camus Sáez & Albaladejo, 2017).

5.1.2 Experiencias de aprendizaje: elementos usados

La mayoría de las experiencias (15 en total) cuentan con los elementos expuestos en su Sala de Exhibición. Doce de ellas exhiben elementos no vivos, mientras que tres incluían muestras vivas, entre plantas y artrópodos (González et al., 2022; González & Ardila, 2022; Hernández et al., 2016). Dos experiencias más ofrecían exposiciones manipulables (González et al., 2022; Guisasola et al., 2005).

La experiencia descrita por Guisasola et al. (2005) incorpora un panel interactivo para que los visitantes puedan ampliar su conocimiento. Además, dos experiencias contaban con dispositivos digitales como tabletas y teléfonos inteligentes (Sarracino, 2014; Valle Díaz Del, 2018). Las imágenes y fotografías de especímenes también se destacaron en las experiencias de Alleman et al. (2014) y Rodríguez Andrades (2022).

Asimismo, en cuatro experiencias se utilizaron programas y dispositivos de Realidad Virtual y Aumentada (Rodríguez, 2022; Sarracino, 2014; Urrego Sandoval, 2022; Valle Díaz Del, 2018). En una sola ocasión se observaron elementos adicionales como textos científicos (Camejo et al., 2018), fichas de divulgación (Hernández et al., 2016) y materiales para manualidades (Rajal, 2018).

5.1.3 Experiencias de aprendizaje: herramientas pedagógicas

Las experiencias caracterizadas identificaron más de quince herramientas pedagógicas empleadas en las Salas de Exhibición de MHN. Entre ellas destacan las lecturas previas y las preguntas diagnósticas, diseñadas para despertar el interés del visitante y conocer sus saberes previos (Machado & López, 2019; González & Ardila, 2022; Guisasola et al., 2005).

Se observaron también recursos tecnológicos y actividades inmersivas. Modelos y aplicaciones 3D, simulaciones, módulos interactivos y el uso de Realidad Virtual y Aumentada estuvieron presentes en cinco experiencias (Guisasola et al., 2005; Rodríguez, 2022; Sarracino, 2014; Urrego Sandoval, 2022; Valle Díaz Del, 2018). Estas herramientas buscaban que el visitante accediera al conocimiento de manera inmersiva y significativa. Un ejemplo es la experiencia descrita por Rodríguez Andrades (2022), realizada en un domo blanco que recreaba térmica, olfativa, sonora y visualmente un ecosistema de páramo colombiano.

El material audiovisual, como videos y diapositivas, estuvo presente en experiencias reportadas por de Camus Sáez y Albaladejo (2017) y González et al. (2022). Otras actividades incluyeron recorridos guiados por personal especializado o docentes conocedores del tema (Rajal, 2018; Sánchez Mora & Ramírez, 2016), lo que demostró mejorar significativamente el aprendizaje.

Varias experiencias aplicaron talleres evaluativos y cuestionarios para medir la adquisición de conocimientos (Alleman et al., 2014; Alzate Agudelo & Guevara Guerrero, 2021; Machado & López, 2019; Rajal, 2018; Ramírez-Castaño et al., 2015). También se utilizaron fichas informativas, lectura y exposición de textos y pósters científicos (de Camus Sáez & Albaladejo, 2017; Alvarez, 2022; González & Ardila, 2022; Hernández et al., 2016).

Algunas experiencias implementaron estrategias innovadoras como exposición de arte (Sanmartino et al., 2012), manualidades (Rajal, 2018), líneas del tiempo (Alleman et al., 2014), diarios de campo para relatar vivencias dentro de la sala (López Gómez, 2014) e incluso competencias sanas por el aprendizaje (Alvarez, 2022).

Una herramienta peculiar fue la indagación y el aprendizaje pasivo y no intrusivo, descrito por Alzate Agudelo y Guevara Guerrero (2021) y Urrego Sandoval (2022). Este

método permite que los visitantes sean protagonistas de la experiencia y tengan mayor autonomía.

Finalmente, Camejo et al. (2018) mostró “La muestra del mes”, una exhibición dedicada a un animal protagonista con más información y tiempo de exposición para despertar el interés del público.

Con base en las experiencias encontradas en este apartado, se diseñó la propuesta educativa desarrollada en este trabajo, retomando y adaptando las herramientas que se usaron en Museos exitosos conocidos alrededor del mundo que han puesto sus esfuerzos en la enseñanza de la evolución biológica.

Tabla 1

Experiencias de aprendizaje utilizadas en Salas de Exhibición de Museos de Historia Natural

Lugar	Público	Tema	Descripción	Elementos Usados	Herramientas Pedagógicas	Referencia
El Museo del Giocattolo, Italia.	Estudiantes de Básica Primaria	Funcionamiento de los juguetes usados en las culturas pasadas	La realidad aumentada busca que el estudiante tenga una experiencia más directa con el juguete y que este cobre vida.	Tabletas, teléfonos y otros dispositivos. Exhibiciones del museo.	Modelos y videos en 3D. Aplicaciones móviles que hacen posible el uso de los anteriores	(Sarracino, 2014)
<i>O meu museo portátil</i> , España	Estudiantes entre 11 y 14 años	Arte	Se buscó que el estudiante investigue, cree y comunique su propia exhibición de museo.	Materiales para manualidad. Objetos a exponer.	Acompañamiento por docentes. Taller interactivo para resolución de problemas. Manualidades.	(Rajal, 2018)
Miramón-Kutxa espacio de la Ciencia, España	Estudiantes de 3ro secundaria	Electricidad	Lectura previa para crear interés en el estudiante. En la exhibición hay movilidad libre, las exposiciones se pueden manipular y hay pantallas interactivas.	Panel interactivo, Exhibiciones manipulables.	Lectura pre-experiencia. Simulaciones y módulos interactivos. Cuaderno de actividades.	(Guisasola et al., 2005)
MHN “Vera Alleman Haeghebaert”, Universidad Ricardo Palma, Perú.	Estudiantes de 10 a 12 años	Eventos en la historia geológica	Dentro de la sala se da un recorrido en el que se les expone cada periodo geológico. Después se pasa a campo y los visitantes deben armar una línea de tiempo con material ofrecido por el museo.	Elementos de exhibición del Museo. Carteles de madera, imágenes de flora y fauna.	Línea del tiempo. Taller participativo. Fotografías antiguas.	(Alleman et al., 2014)
MHN Dr. Carlos A. Torres de la Llosa (Montevideo, Uruguay)	Estudiantes de 9 a 17 años	Especies de fauna autóctona	Se preguntó qué especies autóctonas conocen. En la exhibición había fichas informativas con las especies de interés. Por último, se vuelve a preguntar qué especies autóctonas conocen.	Animales exhibidos en el Museo.	Fichas informativas. Ejemplificaciones visuales. Competencia sana por el aprendizaje.	(Alvarez, 2022)

Lugar	Público	Tema	Descripción	Elementos Usados	Herramientas Pedagógicas	Referencia
MHN de la Universidad Pedagógica Nacional. MCN de La Salle y MC de Universidad El Bosque.	Todas edades	las Biología de plantas carnívoras colombianas	de Se hacen preguntas previas a la experiencia. Se pide identificar la planta que no es carnívora. Después se enlistan datos biológicos de las especies de plantas carnívoras y se termina con resolución de preguntas.	Plantas vivas exhibidas	Material educativo (Fichas informativas). Preguntas diagnósticas,	(González & Ardila, 2022)
Museo de Historia Natural Tranquilino de Sandalio de Noda, Cuba.	Todas edades	las Biología de las epífitas	de Para comenzar, se expuso un poster referente al tema. Luego viene la exposición de las epífitas vivas con su hospedero natural. Por último una exposición fotográfica de epífitas en su ambiente.	Plantas vivas exhibidas. Plegable divulgativo de la experiencia.	Fichas informativas con fotografías. Ambientación de la exhibición. Pósters científicos.	(Hernández et al., 2016)
MHN de la Universidad de Caldas, Colombia	Estudiantes de Básica y Media	de Biología animales	de La exhibición es de las colecciones ornitológica, herpetológica, mastozoológica y entomológica del museo. Después del recorrido se les da un taller para consolidar conceptos.	Animales exhibidos en el Museo	Taller complementario	(Ramírez-Castaño et al., 2015)
MHN de la Universidad Pedagógica Nacional, Colombia.	la Docentes en formación del ejercicio de cría de artrópodos	de Artropofauna colombiana con potencial educativo	de La experiencia tiene tres momentos en los que se introducen los artrópodos, se muestran cuáles se pueden manipular y cómo criar uno. Para cada momento se mostraba un ejemplar vivo.	Exhibiciones de artrópodos vivos y no vivos	Diapositivas. Imágenes virtuales. Exhibición viva.	(González et al., 2022)
Museo Nacional de Ciencias Naturales, España.	No especificado	Evolución Biológica	de En la primera sección se explica la biodiversidad. La siguiente sección habla de cómo esa diversidad es consecuencia de la Evolución, se exponen conceptos claves del tema. La	Exhibiciones del Museo	Esculturas de estructuras referentes. Contextualización Histórica. Pósters informativos.	(de Camus Sáez & Albaladejo, 2017)

Lugar	Público	Tema	Descripción	Elementos Usados	Herramientas Pedagógicas	Referencia
			última parte es acerca de la conservación de esa diversidad.			
Universum Museo de las Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México	Estudiantes de diplomado	Resolución de problemas evolutivos	Se realizó una experiencia sin y una con guía. Se les expuso conceptos de evolución y luego se evaluaron los grupos que habían sido acompañados y los que no.	Pruebas conceptual, procedimental y actitudinal. Exhibiciones del Museo.	Pruebas evaluativas. Visita guiada.	(Sánchez & Mora & Ramírez, 2016)
SCN del MU de U. de Antioquia (MUUA), Rionegro, Colombia.	Estudiantes de noveno de secundaria	Evolución Biológica Animal y Taxonomía Animal	Se usan los animales exhibidos en la sala para explicar la evolución biológica y la taxonomía. Los ejemplos, opiniones y vivencias en la experiencia son documentados por los visitantes en un diario de campo.	Exhibiciones del Museo	Encuestas pre y post experiencia. Diario de campo.	(López Gómez, 2014)
MDCN Federico Carlos Lehmann, Cali, Colombia	Estudiantes entre 5 y 13 años	Biología de animales locales	Se usa la indagación como método de enseñanza de la Biología y la Ciencia a ser aplicado en los Museos.	Exhibiciones del Museo	Indagación, preguntas dentro del recorrido. Talleres evaluativos posteriores a la visita.	(Alzate & Agudelo & Guevara Guerrero, 2021)
MCN de La Salle, Medellín, Colombia.	No especificado	Biología de animales locales	Recorrido de libre flujo y exposiciones abiertas. La experiencia cuenta con un dispositivo con aplicativos para modelos 3D y Realidad Aumentada con menús interactivos.	Dispositivo museográfico con aplicación de Realidad Aumentada, programas de modelos 3D	Realidad Aumentada	(Valle Díaz Del, 2018)
MCN de La Salle, Medellín, Colombia.	Estudiantes de 6to grado en adelante	La preservación de los Páramos de Colombia	La primera parte de la experiencia es una exposición fotográfica de un páramo. Luego, en un domo completamente blanco, se simulan	Gafas 3D y audífonos. Fotografías. Dispositivos auxiliares para experiencias sensoriales.	Fotografía, video y realidad virtual. Estimulación olfativa y térmica.	(Rodríguez, 2022)

Lugar	Público	Tema	Descripción	Elementos Usados	Herramientas Pedagógicas	Referencia
			estímulos visuales, térmicos, sonoros y olfativos.			
MCN de La Salle, Medellín, Colombia.	Estudiantes entre los 6 y 12 años	Diversidad de Mamíferos del territorio antioqueño	Experiencia con ciclo de aprendizaje de Jorba y Sanmartí: exploración, introducción de conocimientos, estructuración y aplicación. Saberes previos.	Exhibiciones del Museo	Cuestionario diagnóstico y posterior. Ciclo de aprendizaje de Jorba y Sanmartí.	(Machado & López, 2019)
MHN de la Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.	No especificado	Biodiversidad propia del territorio colombiano	Experiencia de realidad virtual en la que el visitante tiene la posibilidad de crear un ecosistema colombiano con biota local. Después recibe información sobre lo que creó y las especies que usó, para poder editarlo con el nuevo conocimiento adquirido.	Dispositivos de Realidad Virtual	Realidad Virtual. Descubrimiento pasivo y no intrusivo.	(Urrego Sandoval, 2022)
Museo de la Plata, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.	Personas de todas las edades	El chagas	7 días de concientización del chagas. Exhibición de cuadros referentes. También se realizaron talleres informativos y preventivos, así como videos documentales y charlas de expertos.	Muestras exhibidas	Muestras de obras plásticas, material audiovisual, charlas abiertas y talleres.	(Sanmartino et al., 2012)
MHN Pinar del Río, Cuba.	Personas de todas las edades	El cocodrilo americano	La experiencia se centra en un ejemplar escogido como “la muestra del mes”. Se leen textos científicos y se hace un recorrido acompañado por un guía. Por último, se evalúa los conocimientos adquiridos con un cuestionario.	Exhibiciones dentro del Museo. Experiencia guiada y textos.	Lectura de textos científicos. "Muestra del Mes".	(Camejo et al., 2018)

Nota: En la columna “Tema” hay tres cuadros con la letra en negrita que indican que son las únicas experiencias registradas en las que se habla de evolución biológica.

5.2 Conceptos Evolutivos y ejemplos de organismos de vida en ambientes de cueva

Para interpretar adecuadamente los procesos evolutivos observables en organismos adaptados a ambientes cavernícolas es necesario contextualizar los conceptos fundamentales de la evolución biológica. En esta sección se presentan de manera sintética los principios teóricos esenciales para la realización de la experiencia: evolución biológica, selección natural, adaptación biológica y evolución cavernícola.

5.2.1 La Teoría Evolutiva

En su obra “Evolución: Teorías de la evolución de la vida”, Schwoerbel (1986) habla de cómo se mueve la evolución tomando como punto de partida la teoría de la descendencia de Charles Darwin (teoría que dice que todas las especies están emparentadas, se derivan unas de otras y si seguimos el linaje de dos especies en algún momento van a tener un ancestro común, lo que conduce a la idea de que las similitudes refieren al parentesco entre las especies). Es entonces que da una introducción a la evolución biológica mediante el ejemplo del caballo: la pata de un caballo tiene un solo dedo con una sola uña, pero a ambos lados del metacarpo y el metatarso se encuentran dos huesos delgados y más cortos que se conocen como estiletos o metapodios esteliformes y son el vestigio de otros dedos; el comportamiento inesperadamente agresivo de un caballo asustado por un ruido de origen desconocido, a pesar de la larga historia de domesticación de la especie y su común docilidad; la presencia de un saco vitelino en el embrión de los caballos pese a la existencia de la placenta, que es de donde se obtienen los nutrientes dejando al saco vitelino como una capa que no se usa. Todas estas características son indicadores del pasado de la especie, muestran cómo eran las formas de vida antepasadas del caballo, pero también dejan en evidencia el cambio hasta el presente: los organismos no son exactamente lo que eran en el pasado.

De acuerdo con Schwoerbel (1986), la Teoría de la Evolución intenta determinar y explicar los fenómenos y leyes que rigen la evolución en las especies. Por su parte, Futuyma (2017), en su obra “Evolución” expone que la Biología Evolutiva es de gran importancia debido a que, si se parte de un marco evolutivo, se pueden obtener respuestas a preguntas acerca de la historia de la vida y del mismo ser humano como ¿Qué nos trajo a la variación que vemos en el presente? ¿Cómo se explica el comportamiento diferencial entre machos y hembras? ¿Por qué existen características potencialmente perjudiciales como el apéndice y las muelas del juicio? ¿Qué ha sucedido en la historia que ha producido la diversidad de formas de vida que tenemos en el presente? La Biología Evolutiva toma todas las características de los organismos y las estudia al observar las secuencias de ADN, proteínas, el desarrollo embrionario, las rutas bioquímicas, los comportamientos, la historia de vida y las interacciones entre especies.

Futuyma introduce su obra discutiendo si la evolución es una mera teoría o si es un hecho. Concluye que es posible afirmar que la evolución biológica es un hecho, puesto que el trabajo de la vida de Darwin fue recolectar evidencia para, en su obra “El origen de las especies”, afirmar que los organismos provienen de un ancestro en común que ha dejado descendencia con modificación y que esa modificación se debe a la selección natural que actúa en las variaciones.

Por otra parte, la evolución biológica se refiere al cambio heredable en las propiedades de grupos de organismos a través de las generaciones, la llamada por el mismo Darwin “Descendencia con modificación” (Futuyma, 2017). Para entender correctamente la evolución, hay que tener una idea clara de cómo y a qué niveles actúa la misma, cómo se generan las anteriormente mencionadas propiedades, llamadas también variaciones o caracteres, y qué es lo que permite que se mantengan o desaparezcan de una población.

De acuerdo con García (2004), Darwin tenía tres pilares: “*el organismo como protagonista del proceso evolutivo, la selección natural como principal fuerza creativa y el entorno como posibilitador del cambio*”; con los que Gould tenía algunas discrepancias. En su título *La Estructura de la Teoría de la Evolución*, publicado en el 2002, Stephen Jay Gould consideró que el proceso evolutivo no se presentaba en los individuos, como pensaba Darwin, sino en una llamada “selección de especies” donde las poblaciones de las especies compiten por la supervivencia. La biología evolutiva define la evolución como el cambio en las frecuencias alélicas de una población a través del tiempo, estableciendo así a la población como la unidad del cambio evolutivo (Futuyma, 2017).

Para explicar el patrón observado en el registro fósil, Niles Eldredge y Stephen Jay Gould (1972) propusieron el modelo del Equilibrio Puntuado. Este postula que la historia de muchas especies se caracteriza por largos periodos de estasis (donde los cambios morfológicos son mínimos), interrumpidos por eventos de especiación geológicamente rápidos y localizados. En lugar de una refutación del gradualismo darwiniano, el Equilibrio Puntuado se considera hoy parte de un espectro de ritmos evolutivos. El debate científico actual no se centra en si un modelo es correcto y el otro no, sino en determinar la frecuencia e importancia de cada modo de evolución en la historia de la vida. Si bien el descubrimiento de numerosas formas intermedias ha llenado vacíos importantes que preocupaban a Darwin (Kutschera & Niklas, 2004), la aparición a menudo súbita de nuevas especies en el registro fósil es consistente con las predicciones del Equilibrio Puntuado.

Darwin logró demostrar que la selección natural era la principal fuerza que actuaba sobre las variaciones en las poblaciones biológicas y reunió una vasta evidencia que respaldaba el hecho de la evolución. Sin embargo, los mecanismos precisos de cómo se originaban y heredaban esas variaciones permanecían sin explicación en su época. Esta brecha fundamental comenzó a cerrarse a partir de la década de 1930 con el desarrollo de la

Teoría Sintética de la Evolución. El genetista Theodosius Dobzhansky fue una figura central en este proceso; su trabajo, junto al de otros destacados científicos de la zoología, la paleontología y la botánica, logró integrar la selección natural darwiniana con la genética mendeliana. Así, se consolidó la idea de que las mutaciones en el ADN son la fuente última de la variabilidad sobre la cual actúa la selección natural (Singh & Singh, 2018).

De acuerdo con Kutschera y Niklas (2004), el término “teoría sintética” fue acuñado por Julian Huxley en su influyente obra de 1942, *“Evolución: la síntesis moderna”*. En ella, Huxley también consolidó el campo de la Biología Evolutiva, argumentando que la evolución era el problema central de la biología, pues requería la integración de disciplinas como la genética, ecología, paleontología y sistemática. La Teoría Sintética de la Evolución (TSE), también conocida como Neodarwinismo, complementó las ideas darwinianas al incorporar los principios de la genética. Sus postulados fundamentales se pueden resumir de la siguiente manera: 1) La unidad de la evolución es la población biológica, no el individuo. 2) La variabilidad genética, materia prima de la evolución, se origina por mutación y recombinación, y se hereda según los principios de la genética mendeliana. 3) La selección natural es el principal mecanismo que modela la evolución fenotípica, al cambiar las frecuencias de los rasgos en una población en respuesta al ambiente. 4) La especiación ocurre cuando se establece el aislamiento reproductivo. El aislamiento geográfico es considerado el principal motor de este proceso, aunque también puede ocurrir en la simpatria. 5) El cambio evolutivo a nivel poblacional es generalmente gradual, ocurriendo a través de la acumulación de pequeños cambios a lo largo del tiempo. 6) La macroevolución (el origen de nuevos taxones y patrones a gran escala) es el resultado de la extrapolación de los procesos microevolutivos durante tiempos geológicos.

La evolución biológica sería imposible sin la variación. Como señala Futuyma (2017), los individuos de una misma especie difieren en innumerables rasgos (colores, formas,

tamaños y comportamientos), una realidad universal que constituye la materia prima sobre la que actúan las fuerzas evolutivas. Estas variaciones corresponden a rasgos fenotípicos (físicos, fisiológicos, etc.), resultado de la interacción entre el genotipo y el ambiente.

El genotipo es la composición del material genético, el ADN (Ácido Desoxirribonucleico), una secuencia de nucleótidos organizados en genes que codifican las características de un ser vivo. La fuente última de toda variación genética es la mutación, definida como cualquier cambio en la secuencia del ADN (Freeman & Herron, 2002). Estas mutaciones pueden ser desde cambios puntuales hasta alteraciones cromosómicas mayores, y suelen originarse por errores durante la replicación del ADN o la meiosis. Generan nuevas versiones de un gen, los alelos, base de la variabilidad genética y fenotípica.

No todas las mutaciones tienen el mismo impacto: algunas son beneficiosas, otras perjudiciales y muchas neutras. Moto Kimura (1968) propuso la Teoría Neutral de la Evolución Molecular, que sostiene que gran parte de la variación genética es neutra y su destino en una población depende más del azar que de la selección natural (Kimura, 1983). Esta teoría no refuta la importancia de la selección, sino que explica la evolución de secuencias de ADN que no tienen un efecto fenotípico evidente (Kimura, 1983).

Un aspecto clave es la naturaleza aleatoria de las mutaciones. Según Futuyma (2017), estas no surgen en respuesta a las necesidades del organismo. Por ejemplo, en un ambiente caluroso no aumenta la probabilidad de que aparezca una mutación que confiera resistencia al calor. La variación surge al azar y es la selección natural la que posteriormente favorece las variantes más adecuadas.

Para que la variación sea evolutivamente relevante, debe ser heredable. Este fue el gran vacío en la teoría de Darwin, quien no conocía los mecanismos de la herencia (Singh & Singh, 2018). Los principios de la transmisión genética fueron descifrados por Gregor Mendel en 1866. Como describe Klug (2012), Mendel demostró que los rasgos se transmiten

a través de "unidades hereditarias" (genes) que existen en parejas (alelos) y se segregan durante la formación de las células sexuales. Sus tres leyes (Ley de la Uniformidad, Ley de la Segregación y Ley de la Distribución Independiente) sentaron las bases de la genética y explicaron cómo los rasgos parentales se combinan y transmiten a la descendencia. Aunque existen excepciones y extensiones a la genética mendeliana, sus principios fundamentales rigen la herencia en la mayoría de los organismos con reproducción sexual.

La biodiversidad, definida por la Convención sobre la Diversidad Biológica (CBD) como la variabilidad de organismos vivos en todos los niveles, es el resultado neto de la historia evolutiva. Es el producto de procesos que generan variación (como la mutación y la recombinación) y procesos que la moldean y a menudo la reducen, como la selección natural (Solbrig, 1991). Esta diversidad no solo se refiere al número de especies (riqueza) y sus individuos (abundancia) (Magurran, 2005), sino que abarca la variación intraespecífica e interpoblacional (Halffter & Ezcurra, 1992). Como afirma Solbrig (1991), esta variación es fundamental para la estabilidad y el funcionamiento de los ecosistemas, permitiendo el uso eficiente de los recursos y la resiliencia frente a los cambios ambientales.

5.2.2 Selección Natural

Los organismos de una misma especie o de un mismo género suelen compartir comportamientos y estructuras. Esto implica semejanzas en aspectos ecológicos como alimentación, sitios de percha y condiciones físicas de vida, lo que genera una fuerte competencia por los recursos y, en consecuencia, por la supervivencia. Sin embargo, además de semejanzas existen variaciones, algunas más evidentes que otras, entre organismos de un mismo grupo o de grupos distintos. Estas variaciones pueden ser útiles o desventajosas y confieren aptitudes o limitaciones para la lucha por la supervivencia, entendida no solo como vivir más tiempo sino también como tener mayor capacidad de dejar descendencia (Futuyma, 2017).

Estas variaciones, por mínimas que sean, juegan un papel importante en la competencia. La selección natural explica cómo influyen en las dinámicas evolutivas. Entonces, la selección natural es el principio según el cual, dentro de una población, las variaciones individualmente favorables le darán ventaja al individuo que las posea y serán heredadas a la siguiente generación, mientras que las variaciones individualmente desfavorables serán erradicadas (Darwin, 2017).

Cuando una variación heredada se mantiene en la población y las condiciones del ambiente no cambian, puede llegar a convertirse en una característica fija que todos los individuos poseen. Sin embargo, seguirá considerándose una variación en comparación con las características presentes en otras poblaciones (Futuyma, 2017).

Estas variaciones se refieren a características fenotípicas, que son finalmente los medios que tiene un organismo para relacionarse con su ambiente y poder sobrevivir. Es válido enfatizar en que la selección natural actúa sobre los fenotipos pero la evolución se refiere a cambios que suceden a nivel alélico, es decir, en las frecuencias de los alelos de una población. De igual manera, la selección natural actúa sobre cada uno de los organismos vivos existentes, pero su consecuencia no es individual sino que se ve reflejada en las poblaciones. Cuando los individuos de una población están sometidos a una fuerza seleccionadora, ninguno va a cambiar debido a la selección, sino que unos sobreviven y se reproducen con más facilidad que otros, permitiendo que haya un cambio en las características de una población, no en los mismos individuos. De esta manera se busca un ajuste de las poblaciones a las condiciones actuales de su entorno mediante la conservación y descarte de variaciones en las poblaciones biológicas (Freeman & Herron, 2002).

En su libro *El Origen de las Especies* (Darwin, 2017), Darwin usa el término “la lucha por la existencia” en un sentido metafórico para referirse a las relaciones que hay entre los organismos vivos, sus aptitudes y su éxito para dejar descendencia superando las fuerzas

adversas del entorno. Pero esta lucha es un poco más compleja que la que evidentemente existe entre dos depredadores con alimento limitado en un supuesto ecosistema, sino que también se presenta en otras situaciones. Darwin pone de ejemplo el muérdago que depende de un manzano para sobrevivir, pero si hay otras plantas parásitas estaría compitiendo con ellas, al igual que lo hace con otros individuos de su misma especie por el espacio en un mismo manzano, o con otras plantas que se esfuerzan por ser atractivas para ser el alimento de las aves de las que dependen para diseminar sus semillas. También plantea el caso de una planta en un desierto que está compitiendo contra la sequía, o de las semillas que deja una planta de las cuales solo una puede germinar y lo logra después de competir con las otras.

Darwin, después de leer el texto de Thomas Malthus titulado “Sobre la población” donde se afirmaba que las poblaciones tenían una tendencia a crecer desmesuradamente, consideró que esta lucha por la supervivencia es inevitable debido a la rapidez con la que los organismos se multiplican a lo largo de las generaciones; así como la consideró necesaria, puesto que todo organismo que potencialmente produzca huevos o semillas debe perecer, en una lucha por la existencia con organismos de su misma especie, organismos de otras especies y las condiciones del ambiente, para que el número de individuos alcance un equilibrio sostenible por la naturaleza (Darwin, 1993).

No hay manera de observar esta lucha ni la propia selección natural mirando hacia adelante, sino que se debe observar hacia atrás. Una generación es producto de la selección que ocurrió en la generación parental, y se espera que la descendencia tenga mayor aptitud que sus generaciones pasadas. Tampoco es posible afirmar que la selección crea nuevos fenotipos o que tiene una dirección específica; por el contrario, la selección natural actúa sobre la variación que ya existe en las poblaciones. Pero es prudente decir que la selección puede dar lugar a características novedosas: actúa sobre un rango de fenotipos que existen pero estos pueden ser reorientados hacia funciones nuevas (Freeman & Herron, 2002).

En la selección natural no hay progresión ni aleatoriedad, dado que lo aleatorio sucedería en el origen de las variaciones, mientras que las frecuencias de estas variaciones son definidas por la selección de manera no aleatoria. A pesar de que la evolución tiende a aumentar la complejización y organización de los organismos por selección natural, no hay un proceso progresivo que busque una forma ideal o algún objetivo predeterminado (Harvey & Pagel, 1991). La selección permite que los organismos sean más aptos con respecto a su ambiente, pero no es una tendencia inevitable a ser organismos más avanzados o mejores (Freeman & Herron, 2002).

Por último, es importante señalar que en la selección natural no se observan patrones altruistas. Por el contrario, Futuyma (2017), afirma que la selección de los individuos y los genes es egoísta, y se puede observar en comportamientos que recuerdan a la lucha por la existencia que menciona Darwin, como el parasitismo, el infanticidio y la lucha por el territorio. Hay una concepción errónea que es común al momento de pensar en la naturaleza como un sistema que está en equilibrio y en armonía; en realidad, ese aparente equilibrio es la competencia entre especies actuando. Podemos ver que una especie herbívora y presa predilecta de una especie carnívora sobrevive, no porque el carnívoro sea consciente de que debe parar para preservar a su presa, sino porque la presa está en mayor abundancia para suplir las pérdidas de los individuos que alimentan a los carnívoros. De igual manera, una simbiosis no ocurre por caridad, sino porque las especies involucradas están recibiendo un beneficio. Existe la selección por parentesco, donde un individuo reduce sus posibilidades de supervivencia por el bien de otros individuos de su misma especie, pero al final de cuentas esto le va a beneficiarlo a sí mismo; es el caso cuando una abeja se sacrifica para salvar su colmena, pero igualmente sus genes van a ser heredados a la siguiente generación debido a que es la reina quien se reproduce y es el individuo más importante de la población.

Richard Dawkins posiciona a los genes como la unidad principal de la evolución. En su obra *El gen egoísta* (Dawkins, 1985), Dawkins explica el porqué del comportamiento de los seres vivos al darle el calificativo de egoísta a los genes, quienes son los responsables de crear a los organismos. Los genes han logrado sobrevivir por mucho tiempo en un ambiente extremadamente competitivo gracias a su solidaridad nula y comportamiento despiadado, lo que eventualmente le adjudicará el mismo comportamiento al organismo. Dawkins afirma que todo ser viviente que haya evolucionado por selección natural es egoísta y que los comportamientos que él llama aparentemente altruistas son realmente actos egoístas disfrazados, independientemente de si el ejecutor es consciente de ello o no.

5.2.3 Adaptación

La acción de la selección natural acumulada a lo largo de las generaciones da lugar a un fenómeno de gran importancia en la Biología Evolutiva: la adaptación biológica. Desde la época de Darwin, se ha tenido el consenso de que las adaptaciones son rasgos heredables que surgen resultado de la selección natural (Harvey & Pagel, 1991). Darwin tenía claro que la selección natural trabaja permanentemente y que preservaba rasgos que le daban ventaja a los organismos para la supervivencia y reproducción (Darwin, 2017). Aquí entra un concepto importante para la adaptación biológica: el *fitness*. Conocido en español como “eficacia biológica”, el *fitness* es la capacidad relativa de un organismo para sobrevivir y reproducirse en condiciones dadas (Futuyma, 2017). Una ventaja adquirida puede aumentar el éxito en ambas áreas, lo que significa un mayor *fitness*. Este valor no es fijo, sino que cambia en función de las condiciones ambientales y las adaptaciones que el organismo tenga para sobrellevarlas (Haldane, 1990).

Un reto al que se enfrentan los evolutivos es el de determinar si un rasgo es una adaptación o no, es decir, saber si un rasgo es el resultado de la selección natural. Para esto, Futuyma (2017) menciona casos en los que los rasgos no son adaptaciones: 1) cuando es

resultado de la química o física del organismo (p. ej. el color de la sangre); 2) cuando es resultado del azar (deriva génica); 3) cuando es resultado de la correlación genética (genes pleiotrópicos); 4) cuando es un rasgo conservado de la historia filogenética del organismo (p. ej. la fontanela presente en aves y reptiles). De ahí que es necesario buscar evidencia que respalde el carácter adaptativo de un rasgo. Futuyma propone los siguientes: 1) la complejidad; 2) el diseño; 3) experimentos y; 4) el método comparativo.

Hay estructuras y sistemas complejos como los ojos de las aves y la ecolocalización en murciélagos que son adaptaciones (Moore & Montiani-Ferreira, 2022; Rivera Parra, 2011); así como lo es el diseño específico observado en distintas hojas de plantas xerofíticas (Böcher, 1972), al igual que estudios que muestran evidencia de que la búsqueda de alimento por olfateo en buitres es una adaptación (Graves, 1992).

El método comparativo consiste en identificar caracteres similares en taxones independientes que están sometidos a presiones selectivas similares. Si un estado de carácter ha aparecido independientemente en taxones con las características anteriormente mencionadas, será considerado una adaptación (Harvey & Pagel, 1991). Harvey y Pagel mencionan el color blanco de aves y mamíferos que viven en la nieve como una adaptación al medio blanco, favoreciendo el camuflaje. Esto es conocido como convergencia evolutiva y es determinante al momento de llamar un rasgo “adaptación”.

Las adaptaciones pueden manifestarse a nivel morfológico, fisiológico y etológico; todos los seres vivos las poseen y son fundamentales para el entendimiento de la evolución biológica, pues reflejan la historia evolutiva de las especies y evidencian la relación entre estructura, función y ambiente, aspectos clave para la supervivencia y el éxito reproductivo (Haldane, 1990).

5.2.4 *Evolución en ambientes de cueva*

Una cueva puede ser definida como una “abertura en roca sólida con áreas de completa oscuridad y de más de unos pocos milímetros de diámetro” (Culver & Pipan, 2019, p. 4). Los recursos que se encuentran en las cuevas son limitados, y la falta de productores primarios supone un reto para el mantenimiento energético del ecosistema, por lo que los organismos dependen del ingreso de energía externa a las cuevas (Riddle et al., 2018). Durante las inundaciones, el flujo de agua ingresa el alimento a las cuevas y factores abióticos como el viento, la gravedad y el movimiento de los animales crean una red trófica compleja.

Dentro de las cavernas habita la troglófauna, que pueden ser troglobios, troglófilos y troglófenos (información complementaria en el apéndice D). La troglófauna debe enfrentarse a factores que condicionan la vida en el medio subterráneo como la oscuridad, la ausencia de fotoperiodo, temperatura constante, poco alimento, humedad relativa próxima a la saturación, valores elevados de CO₂ y bajos de O₂ (Márquez Carbajal et al., 1996). Christiansen Ka (1962) introdujo el término “troglomorfismo” para referirse a aquellos caracteres fenotípicos que son resultado de la evolución en las cavernas de todo el planeta y que sugieren una ventaja al ambiente inhóspito de las cuevas. Dos décadas más tarde, se empezó a usar el término para caracteres fisiológicos y etológicos, por lo que los troglomorfismos no son exclusivos de la morfología, y es necesario hacer una comparación con ancestros epigeos de la troglófauna para definir un troglomorfismo (Galan, 2010). Algunos troglomorfismos están expuestos en la Tabla 2.

Tabla 2

Troglomorfismos presentes en animales que habitan cuevas (Galán, 2010; Malard et al., 2023; Márquez Carbajal et al., 1996; Romero & Green, 2005)

Morfológicos	Fisiológicos	Etológicos
--------------	--------------	------------

Reducción y/o atrofia	Ojos y estructuras del aparato visual Pigmentación melánica Cutícula, tegumento Escamas Vejiga natatoria Alas Órgano pineal	Permeabilidad Tasa metabólica Ritmo circadiano Número de huevos Letargo estacional Lento desarrollo embrionario Consumo de O ₂ Fecundidad	Fotorespuestas Agresión Reacción de escape Agregación
Aumento	Alargamiento de los apéndices Órganos sensoriales no ópticos Tamaño corporal	Resistencia a la insulina Reserva lipídica Mayor longevidad Volumen del huevo	

Nota: Los rasgos aquí exhibidos no se encuentran presentes en la totalidad de la troglotauna.

Un organismo troglobio exhibe una morfología caracterizada por la estilización corporal y la elongación de los apéndices (Galán, 2010). Los rasgos que más llaman la atención en los troglobios son aquellos producto de la evolución regresiva. La reducción del tamaño corporal ha sido propuesta como un troglomorfismo y se ha encontrado una reducción cuantitativa en el número vértebras torácicas en algunos linajes de peces cavernícolas del género *Astyanax* (Dowling et al., 2002). Estos rasgos implican cambios en la tasa de crecimiento de los órganos en relación con el crecimiento corporal (Galán, 2010). Estos cambios ontogénicos dependen de mecanismos de expresión que determinan la estructura de un órgano y controlan la organización espacial de los tejidos (Dowling et al., 2002).

Las mutaciones son más frecuentemente reportadas como causales de troglomorfismos, incluyendo los fisiológicos, y se pueden encontrar en regiones codificantes y no codificantes (Aspiras et al., 2015; Gross & Powers, 2020; Riddle et al., 2018). La epigenética también puede ser causa de troglomorfismo (Malard et al., 2023), al igual que la selección relajada (Hinaux et al., 2013) (información complementaria en el apéndice D).

Se ha documentado convergencia en la pérdida de ojos en especies cavernícolas, que ha ocurrido en eventos independientes y procesos ontogénicos distintos (Rétaux & Casane,

2013). Otros autores también han reportado convergencia evolutiva en rasgos regresivos (Derkarabetian et al., 2010; Espinasa et al., 2018). La pérdida del aparato visual se le ha atribuido a un *trade-off* entre el territorio presuntivo óptico y el territorio presuntivo olfatorio en *Astyanax mexicanus* (Malard et al., 2023); igualmente, se ha encontrado correlación negativa en estructuras visuales y sensoriales (Fong, 1989).

La ausencia de una ventaja evolutiva clara en la regresión de rasgos y reducción de funciones supone una discusión para la bioespeleología. Sin embargo, autores aseguran que la regresión no puede considerarse como una simple pérdida degenerativa (Galan, 2010) y que es probable que los troglomorffismos hayan surgido como consecuencia de una presión selectiva por parte de la falta de alimento, incluso cuando es muy difícil proveer evidencia contundente (Fišer, 2019). También, hay trabajos que señalan adaptación en rasgos regresivos (Culver et al., 1995; Poulson, 1963; Poulson & White, 1969) (información complementaria en el apéndice D).

De la presente sección podemos concluir que los rasgos asociados a ambientes de cuevas no están controlados por unos pocos genes, sino que un mosaico de procesos epigenéticos, mutacionales, ontogénicos están fuertemente integrados para crear un fenotipo excepcional que permite a los organismos una vida exitosa en las cavernas. La variabilidad genética presente en lo subterráneo es grande y constantemente cambiante; lo morfológico, lo fisiológico y lo etológico varían a través de las generaciones y es aquí donde podemos observar la evolución biológica en Ambientes de Cueva.

5.3 Diseño, implementación y evaluación de la Experiencia de Aprendizaje para la enseñanza de evolución en la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural

La experiencia se aplicó a 12 estudiantes de Media Secundaria de la Institución Educativa Técnico Damaso Zapata. Como resultado del trabajo previo de diseño, se

construyeron indicadores de aprendizaje alineados con los Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales (MEN, 2006), presentados en la Tabla 3.

El diseño definitivo de la experiencia se plasmó en la secuencia de actividades resumida en la Tabla 4. Esta secuencia integró momentos de explicación teórica, trabajo en grupo, observación guiada y discusión.

5.3.1 Diseño de la experiencia

Para el diseño de la actividad se usaron herramientas pedagógicas y estrategias inspiradas y adaptadas de prácticas documentadas en otras experiencias educativas en Museos de Historia Natural de renombre internacional, caracterizadas en el apartado 5.1. Para el desarrollo de la actividad se usaron fichas ilustradas con imágenes de especies, material audiovisual subtulado, y cuestionarios en formato digital y físico. Estas herramientas se organizaron en una secuencia de diez pasos (Tabla 4) que incluyen momentos de explicación teórica, trabajo en grupo, observación guiada y discusión plenaria. Las discusiones grupales fueron parte central de la experiencia, así como el uso de material fotográfico del que nacían las discusiones.

Tabla 3

Competencias e indicadores para la experiencia en la Sala de Exhibición del MHN con base en los EBC.

	Me aproximo al conocimiento como científico natural	Entorno vivo	Desarrollo compromisos personales y sociales
Competencia contemplada en los Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales	<p>“Persisto en la búsqueda de respuestas a mis preguntas.”</p> <p>“Propongo y sustento respuestas a mis preguntas y las comparo con las de otros y con las de teorías científicas.”</p> <p>“Relaciono mis conclusiones con las presentadas por otros</p>	<p>“Comparo casos en especies actuales que ilustren diferentes acciones de la selección natural.”</p> <p>“Explico y comparo algunas adaptaciones de seres vivos en ecosistemas del mundo y de Colombia.”</p>	<p>“Escucho activamente a mis compañeros y compañeras, reconozco otros puntos de vista, los comparo con los míos y puedo modificar lo que pienso ante argumentos más sólidos.”</p> <p>“Cumpló mi función cuando trabajo en grupo y respeto las funciones de</p>

	autores y formulo nuevas preguntas.”		otras personas.” “Me informo para participar en debates sobre temas de interés general en ciencias.”
Indicadores de aprendizaje para la Experiencia	Explora posibles respuestas a situaciones evolutivas observadas en la fauna a partir de la información presentada en la experiencia de aprendizaje. Argumenta si un rasgo regresivo en un troglobio puede ser considerado una adaptación, utilizando criterios evolutivos y compara sus ideas con las de sus compañeros. Relaciona los principios de la evolución con los cambios observados en organismos cavernícolas y de superficie a partir de la comparación entre ambos grupos.	Compara ejemplos de cambios evolutivos en poblaciones troglobias y epigeas, argumentando cómo las diferencias ambientales influyen en la trayectoria evolutiva de cada uno. Identifica las adaptaciones en animales y relaciona su función con las condiciones en ambientes de cueva. Describe cómo las condiciones ambientales en una cueva actúan como presiones selectivas, identificando cuáles rasgos se ven influenciados por la selección natural y cuáles no.	Contrasta sus argumentos con los de sus compañeros durante las discusiones sobre evolución y adaptación. Desempeña su rol dentro del trabajo en equipo y respeta la participación de los demás en las actividades. Indaga en recursos electrónicos y con el guía sobre dudas que puedan surgir a lo largo de la experiencia.

Tabla 4

Secuencia del diseño de la Experiencia de Aprendizaje para la enseñanza de la evolución animal

N.o	Secuencia de trabajo	Tiempo	Materiales educativos	Evaluación
Inicio				
1	Actividad evaluativa diagnóstica. Se realiza un cuestionario donde los participantes deben clasificar casos de evolución, selección natural o adaptación. Se incluyen opciones distractoras incorrectas. Con este cuestionario, se busca conocer cuáles son los presaberes de los participantes.	5m	Fotografías y esquemas. Preguntas diagnósticas.	Diagnóstica. Cuestionario individual digital (PRETEST).
Desarrollo				
2	Vídeo de autoría propia en el que se explica la Evolución Biológica. Temas como cambio evolutivo, herencia, variación y mutación, son	3m	Vídeo	Formativa. Preguntas Orientadoras

N.o	Secuencia de trabajo	Tiempo	Materiales educativos	Evaluación
	mencionados en el video y discutidos con los participantes.			.
3	Se muestran fotografías de animales de distintos taxones que hay dentro y fuera de las cuevas (se consideran los siguientes ambientes: río de superficie, cueva, bosque húmedo, bosque seco). Se les pide a los participantes que separen los animales primero por hábitat y luego por taxones. Se pide a los participantes que señalen procesos de cambio evolutivo en los taxones mostrados en la mesa de trabajo. El guía discute, refuerza, corrige y señala otros ejemplos, mientras se enfatiza en la diversidad que la Evolución puede generar, al enfocarse en rasgos clave como el color y el tamaño de apéndices y estructuras.	5m	Fotografías.	Formativa. Análisis grupal y preguntas orientadoras.
4	Video de autoría propia en el que se explique la Selección Natural (SN). Temas como competencia, presión selectiva y aptitud, son mencionados en el video y discutidos con los participantes.	3m	Video	Formativa. Preguntas orientadoras
5	En el mismo escenario creado en el paso 3, se lleva la atención de los participantes hacia la diferencia en los rasgos dependiendo del ambiente y las condiciones en las que se encuentran los organismos, enfocándose en cómo la selección natural ha moldeado sus características. Los participantes buscan ejemplos de selección natural en los taxones mostrados en la mesa de trabajo y el guía discute, refuerza, corrige y señala otros ejemplos.	5m	Fotografías.	Formativa. Análisis grupal y preguntas orientadoras.
6	Video de autoría propia en el que se explique la Adaptación Biológica. Temas como rasgos funcionales, fitness, rasgos neutrales y convergencia evolutiva, son mencionados en el video y discutidos con los participantes.	3m	Video	Formativa. Preguntas para guiar el aprendizaje y comprensión .
7	Con la ayuda de fichas técnicas donde se muestra el nombre y una fotografía de una especie, acompañada de una pregunta orientada a buscar un rasgo adaptativo y sus respectivas posibles respuestas, se busca que el participante entienda la importancia de las presiones selectivas y el contexto ambiental para	2m	Fichas técnicas.	Formativa. Análisis grupal y preguntas orientadoras.

N.o	Secuencia de trabajo	Tiempo	Materiales educativos	Evaluación
	determinar si un rasgo es una adaptación. Una vez se determine el rasgo adaptativo, se procede a discutir el valor adaptativo del mismo y los requisitos que debió cumplir para considerarse una adaptación.			
8	Análisis de troglomorfismos: discusión sobre los rasgos presentes en los troglobios (adaptaciones y regresiones). Se mencionan las razones genéticas y ontogénicas de los troglomorfismos. Se explica cuál es la problemática con la asignación del carácter adaptativo de rasgos regresivos. Se muestra el ejemplo de evolución en <i>Trichomycterus</i> , enfatizando en que la evolución puede verse de distintas maneras. Finalmente, se mencionan los casos (fuera de Colombia) en los que se ha afirmado que un rasgo regresivo es adaptativo.	5m	Preguntas guiadas. Fichas Técnicas.	Formativa. Observación directa y preguntas orientadoras
9	EvoluMatch. Juego de encuentra la pareja. En esta sección se busca que el participante relacione imágenes, conceptos y procesos evolutivos. En grupos, los participantes compiten por puntos que se ganan de manera dinámica al encontrar parejas (se puede robar, ganar, perder y doblar puntos).	8m	Material manipulable. Juego proyectado en pantalla manipulado por el guía con las decisiones tomadas por los participantes.	Formativa. Observación directa.
Cierre				
10	Solución de un cuestionario por parte de los participantes de manera individual. El objetivo del cuestionario es evaluar el conocimiento adquirido por parte de los participantes durante toda la experiencia.	8m	Cuestionario individual (PostTest).	Cualitativa. Cuestionario con preguntas abiertas y de opción múltiple.

5.3.2 Implementación de la experiencia

La experiencia de aprendizaje se realizó en horario escolar de los participantes el día 9 de junio del 2025. Debido a que, intencionalmente, los participantes no conocían el motivo de su visita, el saludo, presentación y explicación de la actividad fue lo primero que se hizo. Una

vez dentro de la Sala de Exhibición del MHN, se procedió a realizar la primera evaluación (PreTest) en la plataforma quizizz.com, a la que accedieron los participantes con dispositivos propios y conexión a internet de la Sala de Exhibición del MHN (Figura 1.). Algunos de los participantes realizaron el cuestionario en físico debido a problemas con sus dispositivos.

Posterior al PreTest, se reprodujeron los videos de evolución biológica, selección natural y adaptación biológica (Figura 2). Después de cada uno de los videos se hizo la discusión sobre los temas claves (cambio evolutivo, herencia, variación y mutación; competencia, presión selectiva y aptitud; y rasgos funcionales, fitness, rasgos neutrales y convergencia evolutiva; correspondientemente) (Figura 3). Durante el desarrollo de las discusiones, surgieron preguntas y confusiones esperables con respecto a los temas vistos en los videos, pero se logró resolver todas y cada una de ellas; tomando poco menos del doble del tiempo establecido durante el diseño de la experiencia.

Figura 1

Participantes realizando el PreTest en la plataforma quizizz.com

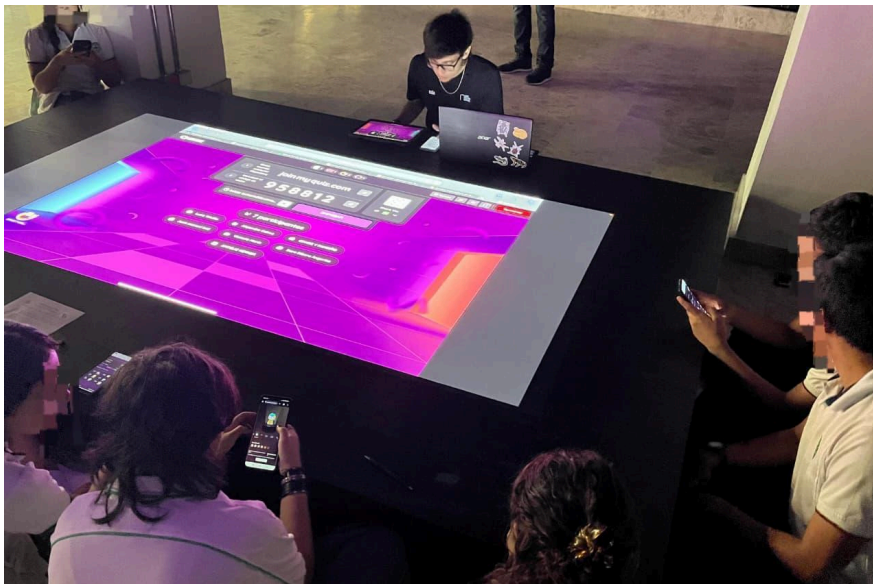
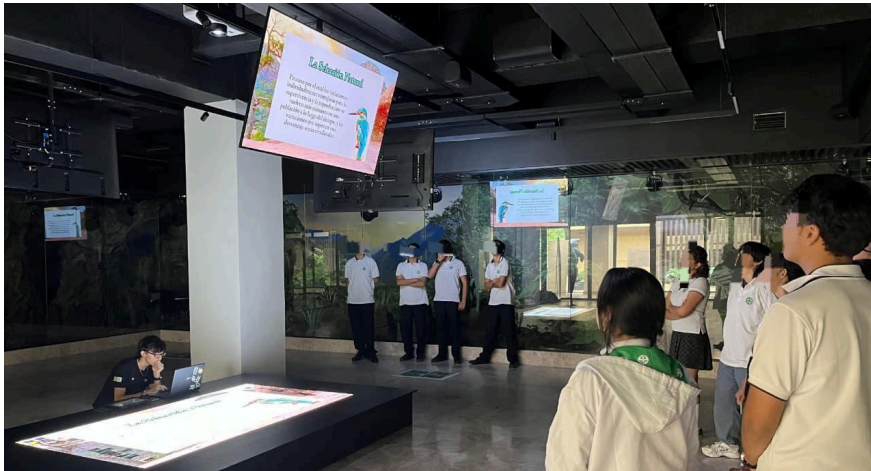


Figura 2**Reproducción de los videos teóricos en las pantallas de la Sala de Exhibición MHN-UIS**

Los ejercicios de los pasos 3 y 5 (Tabla 4) se realizaron con éxito. Los participantes se distribuyeron en grupos más pequeños y trabajaron en equipo buscando, por sí mismos pero con orientación del guía (Figura 4), casos evolutivos y de selección natural sin importar si eran correctos o reales, pero que tuvieron relación con lo aprendido en los videos y discusiones.

En la Figura 5 se aprecia el momento en que una de las participantes expone un caso propuesto por su grupo: una población de ciervos quedó atrapada en una cueva y solo aquellos que eran capaces de emitir sonidos cuyas ondas, al tocar una superficie, se devuelven en una frecuencia capaz de ser percibida por sus oídos eran capaces de desplazarse en busca de alimento y en busca de una salida. Según su relato, esto llevaría a la aparición de ciervos cavernícolas con la capacidad de entrar y salir de las cuevas y que usaban la ecolocación. Aunque la propuesta ignora algunos detalles como la escasez de alimento para un herbívoro, evidencia una comprensión lógica de los mecanismos evolutivos trabajados a lo largo de la experiencia, lo que nos permitió aclarar fallas en la lógica del planteamiento y felicitar la participación activa y apropiación de los conceptos.

Figura 3**Discusión grupal sobre la Evolución Biológica.**

El caso de la polilla de abedul que abordó la adaptación biológica logró reforzar el entendimiento del concepto de adaptación, aunque les tomó más tiempo del esperado el darse cuenta de que era necesario conocer las presiones selectivas a la que se ven sometidas las polillas antes de encontrar el rasgo adaptativo.

Para el paso del análisis de troglomorismos, la mayoría de participantes estuvieron de acuerdo con responder que los rasgos regresivos (ojo y pigmento) de los bagres cavernícolas eran adaptaciones. Luego de explicar la razón de la expresión de esos rasgos y su (aún no confirmado) valor adaptativo, se convino que los rasgos regresivos podrían ser resultado de la hipótesis del ahorro energético o de la deriva génica. Posteriormente se jugó EvoluMatch, donde se apreció un espíritu competitivo en los participantes, quienes pasaron un buen rato y reforzaron los temas vistos a lo largo de la experiencia.

Figura 4**Participantes discutiendo casos evolutivos en grupos más pequeños****Figura 5****Exposición de caso evolutivo hipotético por parte de una participante**

Para la realización del PostTest, los participantes se desplazaron a la recepción de la Sala de Exhibición del MHN, donde tomaron asiento y resolvieron el cuestionario individualmente, tardando 5 minutos más de lo esperado.

Finalmente, se realizó un grupo focal, independiente de la experiencia, en el que el guía facilitó una discusión orientada a explorar las percepciones de los participantes, con el fin de recopilar información que enriquezca a la evaluación integral de la experiencia.

5.3.3 Evaluación de la experiencia

Para evaluar la efectividad de la experiencia de aprendizaje dentro de la Sala de Exhibición, se realizaron dos cuestionarios en dos momentos distintos, uno al principio (PreTest) y otro al final (PostTest) (ver Apéndices B y C).

El PreTest se presentó a los participantes a manera de un juego competitivo en la plataforma quizizz.com, con el que se buscó crear un ambiente lúdico y competitivo, que despertara el interés de los participantes y generara entusiasmo por el tema que estaban próximos a ver. Por el contrario, el PostTest se desarrolló en una hoja impresa, de manera individual y tradicional, promoviendo la concentración y la autorreflexión, para una evaluación más objetiva de los conocimientos adquiridos. La diferencia en la metodología de evaluación se debe a criterios pedagógicos relacionados con la motivación inicial y la reflexión final.

Tabla 5

Resultados individuales y estadísticos descriptivos del PreTest y el PostTest

Participante	PreTest	PostTest
P1	0.333	0.25
P2	0.5	0.5
P3	0.333	0.13
P4	0.167	0.5
P5	0.167	0.63
P6	0.333	0.38
P7	0.167	0.38
P8	0.167	0.5
P9	0.333	0.13
P10	0.167	0.5
P11	0.167	0.5

Participante	PreTest	PostTest
P12	0	0.5
Valores estadísticos		
Media	0.2361667	0.40625
Mediana	0.167	0.5
Moda	0.167	0.5
Desviación estándar	0.1319758	0.1610071

Ambos cuestionarios se evaluaron en una escala de 0 (valor mínimo) a 1 (valor máximo) obteniéndose medias de 0.236 para el PreTest y de 0.406 para el PostTest; en ambos casos, con desviaciones estándar cercanas al 0 (Tabla 5). Para saber si los valores de ambas mediciones eran estadísticamente distintos fue necesario realizar una prueba para evaluar si los datos se distribuían con normalidad. El análisis estadístico se realizó en R (R Core Team, 2024).

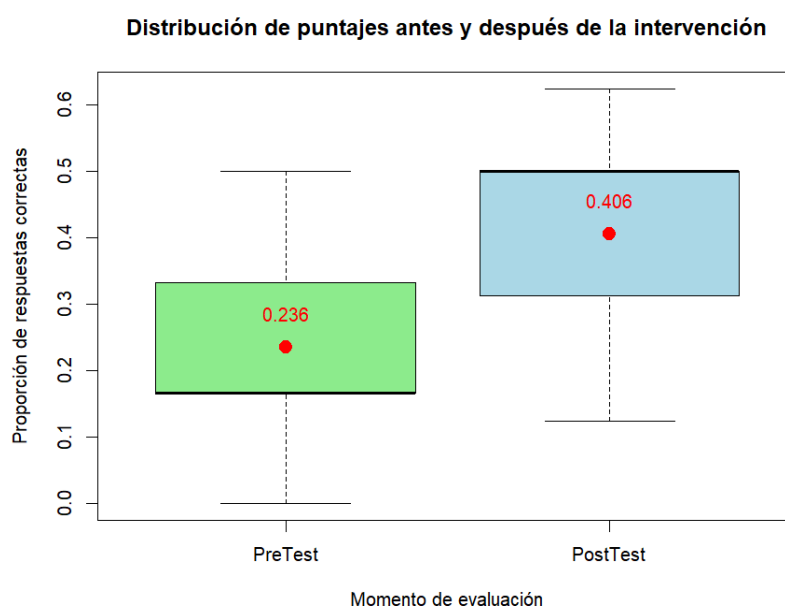
Se realizó una prueba de normalidad Shapiro-Wilk a la diferencia entre los pares de datos formulando la siguiente hipótesis nula (H_0): “Las diferencias entre los pares siguen una distribución normal” y una hipótesis alterna (H_1): “Las diferencias entre los pares no tienen una distribución normal”. El resultado obtenido fue $W = 0.89901$, p -valor = 0.154; al ser el p -valor mayor a 0.05, no rechaza la hipótesis nula y afirma que los datos siguen una distribución normal.

Con base en estos resultados, se procedió a aplicar la prueba t-student para muestras relacionadas. Se planteó la siguiente hipótesis nula (H_0): “No existen diferencias significativas entre las medias del PreTest y del PostTest” y la hipótesis alterna (H_1): “Existen diferencias significativas entre las medias del PreTest y del PostTest”. Los resultados arrojados por la prueba fueron $t = 2.3446$, $df = 11$, p -valor = 0.03885. El p -valor, menor que 0.05, nos permite rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna, lo que nos indica

que la experiencia de aprendizaje tuvo un efecto positivo significativo en la adquisición de conocimiento de la evolución biológica en los participantes (ver Figura 6). Es fundamental, sin embargo, interpretar este hallazgo con cautela, dado el tamaño reducido de la muestra (n=12). Los resultados son prometedores para el grupo estudiado, pero se requeriría una investigación a mayor escala para confirmar su generalización.

Figura 6

Distribución de puntajes antes y después de la experiencia de aprendizaje



5.3.4 Análisis de resultados

5.3.4.1 Cumplimiento de objetivos. Este trabajo logró cumplir sus objetivos. Se generó una experiencia de aprendizaje para la enseñanza de la evolución biológica animal y aunque no fue el eje exclusivo, la evolución cavernícola tomó parte importante de la propuesta, ejemplificando de manera exitosa que la evolución no sigue un camino recto hacia la mejora, sino que el cambio evolutivo puede manifestarse de diversas maneras, incluidos los rasgos regresivos.

De igual manera, se logró identificar herramientas y estrategias pedagógicas para la enseñanza dentro y fuera de museos, en las que se abordan principalmente temas relacionados

con las ciencias naturales; muy pocas para la enseñanza de la evolución biológica dentro de museos y ninguna para la enseñanza de la evolución en cuevas.

Se tomó el género *Trichomycterus*, organismo que habita en Santander, como ejemplo de evolución cavernícola. Las especies de bagres cavernícolas permitieron que la experiencia mostrara a los participantes un lado no tan conocido de la evolución biológica, del que aprendieron conceptos como evolución regresiva, troglomorfismo y rasgo regresivo. Se usó *Astyanax mexicanus* como especie modelo para entender los procesos genéticos y embrionarios que ocurren en simultáneo para la expresión de los rasgos propios de los troglobios.

Por último, el diseño de la experiencia de aprendizaje para la enseñanza de la evolución biológica animal a ser llevada a cabo dentro de la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural UIS, dejó un producto que puede ser tomado y modificado por cualquier otro guía de la Sala de Exhibición. Esta experiencia de aprendizaje podría ser más específica para la Sala de Exhibición MHN-UIS en la medida en la que la totalidad de sus ejemplos sean tomados de ejemplares exhibidos allí.

5.3.4.2 Efectividad en la adquisición de conceptos evolutivos. Los cuestionarios pre y post experiencias fueron diseñados pensando en que el participante sea capaz de diferenciar los conceptos de evolución biológica, selección natural, adaptación biológica y los procesos que los rodean, al momento de observar un proceso evolutivo en la naturaleza.

Con la aplicación de la prueba estadística t-student para muestras relacionadas, se buscó determinar si la habilidad para diferenciar los conceptos mencionados presentaba cambios atribuibles a la intervención. La prueba arrojó un p-valor de 0.03537, menor que 0.05, lo cual nos dice que la actividad dentro del museo causó un impacto positivo y significativo en el conocimiento de los participantes; por lo que se puede afirmar que los

participantes lograron entender mejor los procesos evolutivos vistos dentro de la experiencia y, más importante aún, diferenciar con mayor facilidad cada uno de ellos.

La media del PostTest fue de 0.4492, un número alejado del valor máximo (1), lo que sugiere que, si bien la experiencia mejoró la capacidad para distinguir entre los conceptos evolutivos, aún se presentan dificultades.

5.3.4.3 Percepción de los participantes. Como resultado del grupo focal realizado justo después de la finalización de la experiencia, se obtuvieron algunas apreciaciones de los participantes:

- El comentario que permitió empezar con la discusión fue por parte de un participante que afirmó que habían recibido “muchísima información en poco tiempo y fue complicado retenerla”, a lo que algunos asintieron.
- La información ofrecida por parte del guía, a pesar de haber sido bastante, siempre fue recibida con claridad. El reto se encontró en la retención de la información, no en el entendimiento de la misma.
- Los ejemplos que se vieron en las fichas al momento de trabajar con ayuda del guía y en grupos más pequeños ayudaron a fortalecer las ideas y conceptos aprendidos.
- El audio de los videos se oía un poco distorsionado por el eco del espacio, pero los subtítulos ayudaron bastante a seguir el hilo de lo presentado en el material audiovisual.
- Se habría preferido que, en lugar de un cuestionario físico, el PostTest se hubiese realizado en una plataforma digital al igual que el PreTest.

5.3.4.4 Relación con la revisión de experiencias de aprendizaje en MHN (5.1). La selección de recursos y herramientas pedagógicas no fue arbitraria, sino que respondió a la revisión de experiencias de aprendizaje implementadas en Museos de Historia Natural

realizada en el apartado 5.1. Esta revisión permitió seleccionar herramientas que facilitaron el éxito de experiencias de aprendizaje en temas científicos en otros MHN, e implementarlas en la Sala de Exhibición MHN-UIS.

Las discusiones grupales fueron herramientas implementadas en las experiencias de González y Ardila (2022) y Camejo et al. (2018), donde se promovía la formulación y respuesta de preguntas a lo largo de la actividad. De la mano con esta estrategia, el acompañamiento continuo por parte de un guía calificado fue clave para el éxito de experiencias como la de Sánchez Mora & Ramírez, (2016) (una de las tres que se enfocaron en la enseñanza de la evolución), Rajal (2018) y Camejo et al. (2018), que coinciden en que la mediación de un guía especializado mejora significativamente el aprendizaje de los participantes en una experiencia de museo.

De igual manera, el material audiovisual se utilizó para la transmisión de la teoría sobre biología evolutiva prevista para los participantes, como se hizo en experiencias como las de Sanmartino et al., (2012) y González et al. (2022), donde este recurso se empleó para apoyar la comprensión de los conceptos abordados. Rodríguez Andrades (2022) hizo uso de fotografías de especies y ambientes, herramienta retomada en el presente trabajo.

Por su parte, Alvarez (2022) propone una competencia sana como estrategia para favorecer el aprendizaje. En esta experiencia, esta idea se puso en práctica con la actividad EvoluMatch, una dinámica por equipos que pretendió relajar y divertir a los participantes.

Por último, las herramientas como fichas técnicas y cuestionarios pre y post se vieron presentes también en algunas de las experiencias revisadas (Álvarez, 2022; González & Ardila 2022; Hernández et al., 2016; López Gómez, 2014; Machado & López, 2019).

5.3.4.5 Observaciones del guía. Mis percepciones como educador y guía en la experiencia que diseñé e implementé son, en su mayoría, positivas. No contaba con la participación de estudiantes que mostraran tanto interés por aprender de ciencia y biología;

solo tres de los 12 participantes mostraban una actitud desinteresada, que fue desapareciendo a medida que se realizaban las diferentes actividades en grupo. Conté con la participación de tres chicos que tenían bases sobre lo que es la evolución biológica quienes, en un momento ajeno a la experiencia, afirmaron que ese tema lo habían visto en el colegio a inicio de año.

La herramienta que más permitió que los participantes captaran información fue la discusión grupal, donde estábamos todos los presentes proponiendo ejemplos, discutiendo analogías y corrigiendo ideas incorrectas. La manipulación de las fotografías de animales permitió a los participantes observar con mayor claridad los rasgos evolutivos destacados, comparar especies, establecer diferencias morfológicas entre la diversidad presentada y la ubicación en su respectivo ambiente permitió comprender la relación entre los rasgos evolutivos y las presiones selectivas a los que pueden estar sometidos.

De igual manera, el ambiente lúdico y poco rígido hizo más fácil que los participantes se metieran de lleno en la dinámica de la experiencia. Se evidenció una excelente participación en el trabajo grupal, pues los participantes discutían con sus compañeros, proponían ideas e incluso se ayudaban de fuentes encontradas en internet para la realización de las actividades requeridas que serían discutidas con todo el grupo.

Si bien se evidenciaron estos aspectos positivos, fue posible identificar algunas dificultades. Una de las cuales fue el tiempo requerido para la realización de las actividades, que resultó ser mayor al esperado. De acuerdo con el diseño de la experiencia, descrito en la Tabla 4, se estimaba una duración total de 50 minutos que, en la práctica, se extendió hasta los 75 minutos. Este cambio se debió a que las discusiones realizadas en los pasos 3, 5, 7 y 8 (Tabla 4) se extendieron por la activa participación de los presentes.

En el momento de la presentación del PreTest, algunos de los participantes no contaban con conexión a una red de internet, por lo que se les proporcionó la red de la Sala de

Exhibición. A pesar de esto, tres de los participantes tuvieron que presentar el cuestionario en físico.

En conjunto, las observaciones del guía complementan los análisis estadísticos y cualitativos de la experiencia de aprendizaje para la enseñanza de la evolución biológica. Estos hallazgos ofrecen un panorama integral de la experiencia y servirán de base para las conclusiones y recomendaciones presentadas en el siguiente apartado.

6. Conclusiones

Se diseñó e implementó con éxito una experiencia de aprendizaje sobre evolución biológica en la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural de la UIS. La propuesta ilustra el gran potencial de las colecciones biológicas como un recurso dinámico para la enseñanza, y se consolida como una herramienta pedagógica, validada en un contexto exploratorio, que es adaptable para futuras intervenciones educativas en el Museo.

A partir de la revisión bibliográfica, se identificaron diversas estrategias pedagógicas usadas en museos. La experiencia diseñada para el MHN-UIS, que integró una selección de estas herramientas, logró un impacto estadísticamente significativo en el aprendizaje del grupo de estudio (n=12). Este resultado positivo sugiere que la combinación de estrategias (como las discusiones guiadas, el material audiovisual y las actividades lúdicas) fue adecuada para favorecer la comprensión de los temas. Adicionalmente, la investigación confirmó la escasez de experiencias de enseñanza enfocadas en la evolución cavernícola regresiva, resaltando el carácter novedoso de este trabajo.

Se seleccionó el género *Trichomycterus* como caso de estudio para ejemplificar procesos evolutivos en ambientes de cueva. Este grupo resultó particularmente adecuado, pues permitió contrastar las formas de vida hipógeas y epígeas dentro de un mismo taxón

presente en Santander, facilitando la comprensión de la evolución cavernícola regresiva y su comparación con organismos de superficie cercanos.

En conjunto, este trabajo establece un precedente para futuras intervenciones museales sobre la evolución en la región. Se aporta una estrategia didáctica cuyo efecto positivo fue medido en una prueba piloto, sentando así las bases para reconocer y aprovechar el valor de las colecciones biológicas locales como recursos fundamentales en la enseñanza de las ciencias.

7. Recomendaciones

Dado el carácter exploratorio de este estudio y el tamaño reducido de la muestra (n=12), una recomendación fundamental es replicar la experiencia de aprendizaje con un grupo de estudiantes más grande y diverso. Esto permitiría validar estadísticamente los prometedores resultados aquí presentados y confirmar la efectividad de la estrategia pedagógica a una escala mayor, aumentando así la generalización de las conclusiones.

La enseñanza de los temas que abarca la evolución biológica en un lapso de alrededor de una hora resulta ser una tarea compleja. Aunque en esta propuesta se abarcaron únicamente tres grandes temas, sintetizar teoría y ejemplos en un tiempo tan reducido supone un gran reto. Por esto, se recomienda que en futuros trabajos se diseñe una experiencia con mayor tiempo disponible para cada una de las actividades o, se divida en tres momentos independientes, de manera que los participantes puedan asimilar los contenidos sin riesgo de saturación.

El acompañamiento del guía debe mantenerse como un eje central, dado que la interacción generada en los espacios de discusión resultó ser de los momentos más enriquecedores de la experiencia. En consecuencia, se sugiere fortalecer estas actividades y darles un papel principal en el diseño de futuras propuestas.

En esta ocasión, el uso de imágenes de animales y sus respectivos hábitats permitió concentrar en un punto fijo los recursos necesarios para iniciar las discusiones grupales internas evitando desplazamientos dentro de la sala, incluso cuando la mayoría de ejemplares estaban físicamente exhibidos. Para futuras propuestas, sería recomendable explorar estrategias que permitan prescindir de las fotografías y trabajar directamente con las exhibiciones.

La futura adecuación del diorama cavernícola ya existente en el museo, y actualmente incompleto, abre posibilidades para el enriquecimiento del conocimiento relacionado a la evolución biológica en ambientes de cueva.

Se sugiere implementar tanto el pretest como el postest en formato digital, con el fin de disminuir la percepción de un ambiente académico estricto y favorecer una evaluación formativa. En futuras experiencias, los cuestionarios podrían usarse como un recurso lúdico y participativo que permita a los participantes conocer su progreso y no como una herramienta para evaluar la efectividad de la actividad.

La incorporación de tecnologías como realidad virtual, módulos interactivos o simulaciones inmersivas que se han usado en museos exitosos puede enriquecer la propuesta en salas de exhibición donde estos recursos sean viables y, en especial, permitir la representación de un ambiente cavernícola y los procesos evolutivos asociados a ellos.

Referencias bibliográficas

- Abreu, O., Gallegos, M. C., Jácome, J. G., & Martínez, R. J. (2017). La didáctica: Epistemología y definición en la facultad de ciencias administrativas y económicas de la universidad técnica del norte del ecuador. *Formación Universitaria*, 10(3), 81-92.
- Alleman, V., Gonzales, M., Garrido, C., Guzmán, R., Neira, K., Pedraza, A., Torres, S., & Yarleque, P. (2014). Una dinámica experimental educativa e interactiva en el museo de historia natural “vera alleman haeghebaert”: Línea de tiempo. *Revista De Ciencias*, 10
- Alvarado-Flores, J., Pérez-Yañez, D., Lasas-Hernández, F., & Leal-Bautista, R. M. (2020). La vida secreta de los ecosistemas kársticos. *Revista de Biología Tropical*, 68(Suppl. 2), S1–S14. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68iS2.42125>
- Alvarez, M. B. (2022). Visitar activamente un museo de historia natural como herramienta para conocer fauna autóctona. una experiencia en el museo de historia natural dr. Carlos A. torres de la llosa (montevideo, uruguay). *Revista Del Museo De La Plata*, 7(1), 27-38.
- Alzate Agudelo, M. Á, & Guevara Guerrero, M. (2021). La indagación como herramienta de enseñanza en el museo de ciencias naturales: Un estudio de caso acerca del fortalecimiento de las prácticas de guianza.
- Ariño, M. L. (2015). Pedagogía de la indagación guiada. *Lima, Perú*.
- Arnedo, M. A., Oromí, P., Múrria, C., Macías-Hernández, N., & Ribera, C. (2007). The dark side of an island radiation: Systematics and evolution of troglobitic spiders of the genus dysdera latreille (araneae: Dysderidae) in the canary islands. *Invertebrate Systematics*, 21(6), 623–660.

- Aspiras, A. C., Rohner, N., Martineau, B., Borowsky, R. L., & Tabin, C. J. (2015). Melanocortin 4 receptor mutations contribute to the adaptation of cavefish to nutrient-poor conditions. *Proceedings of the National Academy of Science*, 112(31) <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1510802112>
- Barr, T. C. (1960). A synopsis of the cave beetles of the genus *pseudanophthalmus* of the mitchell plain in southern indiana (coleoptera, carabidae). *The American Midland Naturalist*, 63(2), 307–320.
- Barr, T. C., & Holsinger, J. R. (1985). Speciation in cave faunas. *Annual Review of Ecology and Systematic*, 313–337.
- Bermudez, G. M. A., De Longhi, A., Martinez, M. S., & Rivero, M. E. (2015). Estrategias didácticas para enseñar biología.
- Böcher, T. W. (1972). Comparative anatomy of three species of the apophyllous genus *Gymnophyton*. *American Journal of Botany*, 59(5), 494–503.
- Brandon, R. N. (2014). *Adaptation and environment*. Princeton University Press.
- Bradford, TM, Adams, M., Guzik, MT, Humphreys, WF, Austin, AD y Cooper, SJ (2013). Los patrones de variación genética poblacional en anfípodos chiltonidos simpátricos dentro de un acuífero calcreto revelan un ambiente subterráneo dinámico. *Herencia*, 111 (1), 77-85.
- Camejo, C. A. C., & Molina, P. P. R. (2007). Las tendencias de la didáctica de las ciencias naturales en el siglo XXI. *Varona*, (44), 34-41.
- Camejo, Y. R., Hernández, T. A., Pérez, Z. H., Amador, G. L., Arencibia, Y. S., Medina, L. R., Padrón, L. Y. G., & Alonso, Y. L. (2018). Efectos de la muestra del mes “Cocodrilo americano” sobre el público visitante al museo de historia natural “Tranquilino sandalio de noda” de pinar del río, Cuba. *Revista ECOVIDA*, 8(1), 84-93.

- Carlini, D. B., & Fong, D. W. (2017). The transcriptomes of cave and surface populations of *Gammarus minus* (Crustacea: Amphipoda) provide evidence for positive selection on cave downregulated transcripts. *PLOS ONE*, *12*(10), e0186173. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186173>
- Castellanos-Morales, C. A. (2008). *Trichomycterus uisae*: A new species of hypogean catfish (Siluriformes: Trichomycteridae) from the northeastern Andean Cordillera of Colombia. *Neotropical Ichthyology*, *6*(2), 307–314. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252008000200015>
- Castellanos-Morales, C. A., & Galvis, F. (2012). Las especies del género *Trichomycterus* (Siluriformes: Trichomycteridae) en Colombia. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, *16*(1), 194-206.
- Castellanos-Morales, C. A. (2018). A new species of cave catfish, genus *Trichomycterus* (siluriformes: Trichomycteridae), from the magdalena river system, cordillera oriental, colombia. *Biota Colombiana*, *19*, 117–130.
- Chapman, P. (1982). The origin of troglobites. *Proceedings of the University of Bristol Speleological Society*, *16*(2), 133–141.
- Culver, D. C., Kane, T. C., & Fong, D. W. (1995). *Adaptation and natural selection in caves: The evolution of Gammarus minus*. Harvard University Press.
- Culver, D. C., & Pipan, T. (2019). *The biology of caves and other subterranean habitats*. Oxford University Press.
- Darwin, C. R. (1993). *Textos fundamentales*. Altaya.
- Darwin, C. R. (2017). *El origen de las especies*. Comcosur.
- Darwin, C., & Bynum, W. F. (2009). *The origin of species by means of natural selection: Or, the preservation of favored races in the struggle for life*. AL Burt New York.
- DAWKINS, R. (1985). *El gen egoísta : Las bases biológicas de nuestra conducta*. Salvat.

- De Camilloni, A. (2007). Didáctica general y didácticas específicas. *El Saber Didáctico*, 23-39.
- de Camus Sáez, S. P., & Albaladejo, C. M. (2017). La evolución biológica en las exposiciones del Museo Nacional de Ciencias Naturales (1966–2016). En S. A. Moreno & M. T. Pardo (Eds.), *Pensando desde la evolución* (pp. 145–168). Museo Nacional de Ciencias Naturales.
- Derkarabetian, S., Steinmann, D. B., & Hedin, M. (2010). Repeated and time-correlated morphological convergence in cave-dwelling harvestmen (opiliones, laniatores) from montane western north america. *Plos One*, 5(5), e10388. 10.1371/journal.pone.0010388
- Devos, L., Agnès, F., Edouard, J., Simon, V., Legendre, L., El Khallouki, N., Barbachou, S., Sohm, F., & Rétaux, S. (2021). Eye morphogenesis in the blind mexican cavefish. *Biology Open*, 10(10), bio059031. 10.1242/bio.059031
- Dowling, T. E., Martasian, D. P., & Jeffery, W. R. (2002). Evidence for multiple genetic forms with similar eyeless phenotypes in the blind cavefish, *Astyanax mexicanus*. *Molecular Biology and Evolution*, 19(4), 446–455.
- Dreybrodt, W., Gabrovšek, F., & Romanov, D. (2005). *Processes of a speleogenesis: A modeling approach*. Založba ZRC.
- Duarte, C. E. C. (2017). El cuento como estrategia pedagógica para desarrollar la indagación en ciencias naturales. *Educación Y Ciencia*, (20), 71-76.
- Eldredge, N., & Gould, S. J. (1972). Punctuated equilibria: An alternative to phyletic gradualism. In T. J. M. Schopf (Ed.), *Models in paleobiology* (pp. 82–115). Freeman, Cooper & Co.

- Elipot, Y., Hinaux, H., Callebert, J., Launay, J., Blin, M., & Rétaux, S. (2014). A mutation in the enzyme monoamine oxidase explains part of the *Astyanax* cavefish behavioural syndrome. *Nature Communications*, *5*(1), 3647. 10.1038/ncomms4647
- Espinasa, L., Robinson, J., & Espinasa, M. (2018). Mc1r gene in *Astroblepus pholeter* and *Astyanax mexicanus*: Convergent regressive evolution of pigmentation across cavefish species. *Developmental Biology*, *441*(2), 305–310. 10.1016/j.ydbio.2018.07.016
- Escuela de Biología. (1998). Museo de Historia Natural. Facultad de Ciencias. Universidad Industrial de Santander.
- Falk, J. H., Dierking, L. D., & Foutz, S. (2007). *In principle, in practice: Museums as learning institutions*. Rowman Altamira.
- Fišer, Ž. (2019). Adaptation to low food. In W. B. White, D. C. Culver, & T. Pipan (Eds.), *Encyclopedia of caves* (3rd ed., pp. 1–7). Academic Press.
- Fong, D. W. (1989). Morphological evolution of the amphipod *Gammarus minus* in caves: Quantitative genetic analysis. *American Midland Naturalist*, 361–378.
- FREEMAN, S., & Herron, J. C. (2002). *Análisis evolutivo*. Prentice-Hall.
- Futuyma, D. J. (2013). The evolution of evolutionary ecology. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, *59*(4), 172–180. <https://doi.org/10.1080/15659801.2013.857486>
- Futuyma, D. J. (2017). *EVOLUTION* (4ed. ed.). Sinauer Associates.
- Galán, C., & Herrera, F. F. (1998). Fauna cavernícola: Ambiente, especiación y evolución. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología*, *32*, 13-43.
- Galán, C. (2010). Evolución de la fauna cavernícola: Mecanismos y procesos que explican el origen de las especies troglobias. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología*, *44*, 22–31.

- Galli, L. G., & Meinardi, E. (2015). Obstáculos para el aprendizaje del modelo de evolución por selección natural, en estudiantes de escuela secundaria de argentina. *Ciência & Educação (Bauru)*, 21, 101-122.
- García Olmedo, F. (2004). La estructura de la teoría de la evolución. *El Cultural*, http://www.elcultural.es/version_papel/LETRAS/9780/La_estructura_de_la_Teoria_d_e_la_Evolucion
- García-Sampedro, M., & Berciano, S. G. (2018). El museo como espacio multicultural y de aprendizaje: Algunas experiencias inclusivas. *Liño: Revista Anual De Historia Del Arte*, (24), 117-128.
- Goldbach, T., Papoula, N. R., Sardinha, R. C., Dysarz, F. P., & Capilé, B. (2009). Atividades práticas em livros didáticos atuais de biologia: Investigações e reflexões. *Revista Eletrônica Perspectivas Da Ciência E Tecnologia*, 1(1), 63–74.
- González, S. C. A., & Ardila, L. D. P. (2022). Plantas superpoderosas e incomprendidas del Museo de Historia Natural de la UPN: Una experiencia a partir de la segunda noche de museos de Bogotá. *Bio-Grafía*, 15(28), 207–220. <https://doi.org/10.17227/bio-grafia.vol15.num28-15029>
- González, S. C. A., Riaño, M. C. D., Castiblanco, L. R. P., Jiménez, Á. J. Á., & Ramos, K. M. L. (2022). Enseñanza, manipulación y mantenimiento adecuado de la artropofauna viva en actividades educativas desde el Museo de Historia Natural de la Universidad Pedagógica Nacional (Bogotá, Colombia). *Bio-Grafía*, 15(28), 147–160. <https://doi.org/10.17227/bio-grafia.vol15.num28-15027>
- Gore, A. V., Tomins, K. A., Iben, J., Ma, L., Castranova, D., Davis, A. E., Parkhurst, A., Jeffery, W. R., & Weinstein, B. M. (2018). An epigenetic mechanism for cavefish eye degeneration. *Nature Ecology & Evolution*, 2(7), 1155–1160. [10.1038/s41559-018-0569-4](https://doi.org/10.1038/s41559-018-0569-4)

- Gould, S. J., & Lewontin, R. (1982). La adaptación biológica. *Paleobiology*, 8(4), 214–223.
- Graves, G. R. (1992). Greater yellow-headed vulture (*Cathartes melambrotus*) locates food by olfaction. *Journal of Raptor Research*, 26(1), 11.
- Gross, J. B., & Powers, A. K. (2020). A natural animal model system of craniofacial anomalies: the blind Mexican cavefish. *The Anatomical Record*, 303(1), 24-29.
- Gross, J. B., & Wilkens, H. (2013). Albinism in phylogenetically and geographically distinct populations of *astyanax* cavefish arises through the same loss-of-function *Oca2* allele. *Heredity*, 111(2), 122–130. 10.1038/hdy.2013.26
- Gross, J. B., Weagley, J., Stahl, B. A., Ma, L., Espinasa, L., & McGaugh, S. E. (2018). A local duplication of the melanocortin receptor 1 locus in *astyanax*. *Genome*, 61(4), 254–265. 10.1139/gen-2017-0049
- Guisasola, J., Azcona, R., Etxaniz, M., Mujika, E., & Morentin, M. (2005). Diseño de estrategias centradas en el aprendizaje para las visitas escolares a los museos de ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 2(1), 19-32. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2005.v2.i1.03
- Haldane, J. B. (1990). *The causes of evolution* (Original work published in 1932). Princeton University Press.
- Halfiter, G. (Ed.). (1992). *La diversidad biológica de Iberoamérica* (Vol. 1). CYTED-D, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo; Instituto de Ecología, A.C.; Secretaría de Desarrollo Social.
- Harvey, P. H., & Pagel, M. D. (1991). *The comparative method in evolutionary biology*. Oxford university press.
- Hernández, T. A., Labrador, Y. C., Medina, L. R., & Valdés, Y. B. (2016). Exposición “el mundo de las epífitas”, una experiencia desde el museo de historia natural tranquilino sandalio de noda de pinar del río. *Revista ECOVIDA*, 6(2), 142–155.

- Hunter, S., Williams, N., McDougal, R., Scott, P., & Garbelotto, M. (2018). Evidence for rapid adaptive evolution of tolerance to chemical treatments in phytophthora species and its practical implications. *PLoS One*, *13*(12), e0208961.
- Jemec, A., Škufca, D., Prevorčnik, S., Fišer, Ž., & Zidar, P. (2017). Comparative study of acetylcholinesterase and glutathione S-transferase activities of closely related cave and surface asellus aquaticus (isopoda: Crustacea). *Plos One*, *12*(5), e0176746. 10.1371/journal.pone.0176746
- Ka, C. (1962). Proposition pour la classification des animaux cavernicoles. *Spelunca*, *2*, 76–78.
- Kampourakis, K., & Zogza, V. (2008). Students' intuitive explanations of the causes of homologies and adaptations. *Science & Education*, *17*, 27–47.
- Kimura, M. (1983). *The neutral theory of molecular evolution*. Cambridge University Press.
- Kimura, M., & Kimura, M. (2020). The neutral theory and molecular evolution. *My Thoughts on Biological Evolution*, 119–138.
- Klug, W. S. (2012). *Concepts of genetics* (10th ed.). Pearson.
- Kolb, D. A. (2014). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. FT press.
- Konec, M., Prevorčnik, S., Sarbu, S. M., Verovnik, R., & Trontelj, P. (2015). Parallels between two geographically and ecologically disparate cave invasions by the same species, asellus aquaticus (isopoda, crustacea). *Journal of Evolutionary Biology*, *28*(4), 864–875. 10.1111/jeb.12610
- Kutschera, U., & Niklas, K. J. (2004). The modern theory of biological evolution: An expanded synthesis. *Naturwissenschaften*, *91*(6), 255–276. <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0515-y>

- Lasso, C. A., Mesa, S., Castellanos-Morales, C. A., Fernández-Auderset, J., & Do Nascimento, C. (2018). Peces cavernícolas de Colombia. San Gil, Colombia.
- León, E. (2019). Estrategias de enseñanza utilizadas en clases de evolución biológica. *Telos: Revista De Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales*, 21(1), 141–162.
- López Gómez, L. M. (2014). El aporte experiencial que ofrece una visita a la sala de ciencias naturales (SCN) del Museo Universitario de la Universidad de Antioquia, en la apropiación de conceptos sobre la evolución biológica y la taxonomía animal desde una perspectiva ambiental: la contribución del aprendizaje informal y la mediación museística (Tesis de pregrado). Universidad de Antioquia.
- Machado Beltrán, L., & López Raigosa, C. (2018). *Animalia: una estrategia pedagógica dentro del Museo de Ciencias Naturales de La Salle (MCNS) que promueve aprendizajes significativos* (Trabajo de grado de pregrado). Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/28062>
- Magurran, A. E. (2005). Biological diversity. *Current Biology*, 15(4), R116–R118.
- Malard, F., Griebler, C., & Rétaux, S. (Eds.). (2023). Groundwater ecology and evolution (2^a ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-04328-5>
- Mallart, J. (2001). Didáctica: concepto, objeto y finalidades. En F. Sepúlveda & N. Rajadell (Eds.), *Didáctica general para psicopedagogos* (pp. 23-57). Madrid, España: UNED.
- Márquez Carbajal, E., García Carrillo, J., & Rodríguez Fernández, F. (1996). El medio subterráneo: Adaptaciones de los invertebrados terrestres. *Sociedad Entomológica Aragonesa*, 15(55-60)
- MEN, M. D. (2006). Estándares básicos en competencias en ciencias sociales y ciencias naturales. *Ciencias sociales y ciencias naturales*, 96-147.
- Mendel, G. (1866). Experiments in plant hybridization. *Verhandlungen Des Naturforschenden Vereines in Brünn*, 4(3-47)

- Mitchell, R. W., Russell, W. H., & Elliott, W. R. (1977). *Mexican eyeless characin fishes, genus Astyanax: Environment, distribution and evolution* (Special Publications, Museum, Texas Tech University, No. 12). Texas Tech Press. pp. 1-89.
- Moore, B. A., & Montiani-Ferreira, F. (2022). Ophthalmology of Accipitrimorphae, Strigidae, and Falconidae: Hawks, eagles, vultures, owls, falcons, and relatives. In F. Montiani-Ferreira, B. A. Moore, & G. Ben-Shlomo (Eds.), *Wild and exotic animal ophthalmology: Volume 1: Invertebrates, fishes, amphibians, reptiles, and birds* (pp. 429–504). Springer International Publishing.
- Moreira, M. A. (2002). Investigación en educación en ciencias: Métodos cualitativos. *Actas Del PIDEDEC*, 4(14), 25–45.
- Nehm, R. H., & Schonfeld, I. S. (2008). Measuring knowledge of natural selection: A comparison of the CINS, an open-response instrument, and an oral interview. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 45(10), 1131-1160.
- Peck, S. B., & FINSTON, L. (1993). Galapagos islands troglobites: The questions of tropical troglobites, parapatric distributions with eyed-sister-species, and their origin by parapatric speciation. *Mémoires De Biospéologie*, 20, 19–37.
- Poulson, T. L. (1963). Cave adaptation in amblyopsid fishes. *The American Midland Naturalist*, 70(2), 257–290. 10.2307/2423056
- Poulson, T. L., & White, W. B. (1969). The cave environment. *Science*, 165(3897), 971–981. 10.1126/science.165.3897.971
- Protas, M. E., Hersey, C., Kochanek, D., Zhou, Y., Wilkens, H., Jeffery, W. R., Zon, L. I., Borowsky, R., & Tabin, C. J. (2006). Genetic analysis of cavefish reveals molecular convergence in the evolution of albinism. *Nature Genetics*, 38(1), 107–111. 10.1038/ng1700

- Racovitza, E. G. (1907). *Essai sur les problèmes biospéologiques. Archives de zoologie expérimentale et générale, 4^e série, 6*, 371-488. Paris: Schleicher Frères.
- Rajal, C. (2018). Museos portátiles. una experiencia desde la educación artística no formal para deconstruir la historia del arte y repensar el museo. *Pulso.Revista De Educación*, (41), 49-67.
- Ramírez-Castaño, V. A., Cumbalaza-Noreña, D., & Toro-Restrepo, B. (2015). Museo de Historia Natural de la Universidad de Caldas (MHN-UC): una ventana al conocimiento de la biota andina. *Bio-Grafía: Escritos sobre la Biología y su enseñanza, 1*(8).
- Reid, J. W. (2001). A human challenge: discovering and understanding continental copepod habitats. En R. M. Lopes, J. W. Reid, & C. E. F. Rocha (Eds.), *Copepoda: Developments in Ecology, Biology and Systematics: Proceedings of the Seventh International Conference on Copepoda, held in Curitiba, Brazil, 25-31 July 1999* (pp. 201-226). Developments in Hydrobiology, 453/454. Springer, Dordrecht.
- Rétaux, S., & Casane, D. (2013). Evolution of eye development in the darkness of caves: adaptation, drift, or both? *EvoDevo, 4*(1), 26. <https://doi.org/10.1186/2041-9139-4-26>
- Reyes-Cárdenas, F., & Padilla, K. (2012). La indagación y la enseñanza de las ciencias. *Educación Química, 23*(4), 415-421.
- Riddle, M. R., Aspiras, A. C., Gaudenz, K., Peuß, R., Sung, J. Y., Martineau, B., Peavey, M., Box, A. C., Tabin, J. A., McGaugh, S., Borowsky, R., Tabin, C. J., & Rohner, N. (2018). Insulin resistance in cavefish as an adaptation to a nutrient-limited environment. *Nature, 555*(7698), 647–651. 10.1038/nature26136
- Rivera Parra, D. P. (2011). Caracterización de la fauna de quirópteros del Parque Nacional Yasuní en base a llamadas de ecolocación (Tesis de licenciatura). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.

- Rivera, M. A. J., Howarth, F. G., Taiti, S., & Roderick, G. K. (2002). Evolution in hawaiian cave-adapted isopods (oniscidea: Philosciidae): Vicariant speciation or adaptive shifts? *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 25(1), 1–9. 10.1016/S1055-7903(02)00353-6
- Robles, A., Solbes Matarredona, J., Cantó Doménech, J., & Lozano Lucia, Ó. R. (2015). Actitudes de los estudiantes hacia la ciencia escolar en el primer ciclo de la enseñanza secundaria obligatoria. *Revista Electrónica De Enseñanza De Las Ciencias*, 14(3), 361–376.
- Rodríguez Andrades, F. A. (2022). Mi vecino, el páramo: una experiencia de realidad virtual con el Páramo de Sonsón (Tesis de maestría). Universidad EAFIT.
- Rodríguez, C. A. (2011). *Trichomycterus ballesterosi* (Siluriformes: Trichomycteridae), especie nueva de la cuenca alta del río Sinú, Colombia. *Dahlia*, 11, 3-12.
- Romero, A., & Green, S. M. (2005). The end of regressive evolution: Examining and interpreting the evidence from cave fishes. *Journal of Fish Biology*, 67(1), 3–32.
- Romero, A., & Paulson, K. M. (2001). It's a wonderful hypogean life: A guide to the troglomorphic fishes of the world. *Environmental Biology of Fishes*, 62(1-3), 13-41
- Salamanca, Y. A. A., Jaimes, V., & Quintero, A. (2020). Uso de la herramienta ilustrativa como estrategia gerencial innovadora en la enseñanza de la biología. *Gestión Y Desarrollo Libre*, 4(7)
- Sánchez Mora, M. del C., & de la Luz Ramírez, C. (2016). Efectos sobre el aprendizaje informal de la evolución biológica como resultado de la mediación museal. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 13(2), 315-341.
- Sanmartino, M., Mengascini, A. S., Menegaz, A. N., Mordeglia, C., & Ceccarelli, S. (2012). Miradas caleidoscópicas sobre el Chagas: una experiencia educativa en el Museo de

- La Plata. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 9(2), 265-273.
- Sarracino, F. (2014). ¿Mejora la realidad aumentada el aprendizaje de los alumnos? Una propuesta de experiencia de museo aumentado. *Profesorado: Revista de Currículum y Formación del Profesorado*, 18(3), 473-491.
- SCHWOERBEL, W. (1986). *Evolucion evolucion: Teorias de la evolución de la vida*. Salvat.
- Selzer, M. N., Gazcón, N. F., Trippel Nagel, J. M., Larrea, M. L., Castro, S. M., & Bjerg, E. (2018). Tecnologías inmersivas aplicadas: realidad virtual y aumentada. En *XX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2018, Universidad Nacional del Nordeste)* (pp. 366-370). ISBN 978-987-3619-27-4.
- Singh, V., & Singh, K. (2018). Modern synthesis. En J. Vonk & T. K. Shackelford (Eds.), *Encyclopedia of Animal Cognition and Behavior*. Springer.
- Solbrig, O. T. (1991). The origin and function of biodiversity. *Environment : Science and Policy for Sustainable Development*, 33(5), 16–38. 10.1080/00139157.1991.9931394
- Urrego Sandoval, N. (2022). *Hycha guaiia* (Documento de grado). Universidad de los Andes. Repositorio Institucional Séneca.
- Valderrama, M. G. (2011). Influencia de las herramientas pedagógicas en el proceso de enseñanza del inglés.
- Valle Díaz Del, V. M. (2018). *Una mirada a la museografía del Museo de Ciencias Naturales de La Salle entre los años 2007 al 2016 y su proyección al año 2019* (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. 1-113 páginas.
- Wilkins, H. (1979). Reduktionsgrad und phylogenetisches alter: Ein beitrag zur besiedlungsgeschichte der limnofauna yukatans. *Journal of Zoological Systematics and Evolutionary Research*, 17(4), 262–272.

Apéndices**Apéndice A****Formato de consentimiento informado****Universidad Industrial de Santander – Facultad de Ciencias – Escuela de Biología****Proyecto de Trabajo de Grado**

Título: Diseño y Evaluación de una experiencia de aprendizaje para la enseñanza de la Evolución Biológica en la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural UIS, usando como ejemplo el género *Trichomycterus* (Siluriformes: Trichomycteridae), presente en cuevas de Santander.

Consentimiento Informado para Padres, Madres o Acudientes:

Yo, _____, identificado(a) con C.C. / T.I. / C.E. número _____, en calidad de padre/madre/acudiente del estudiante _____, manifiesto que:

1. He sido informado(a) de que mi hijo(a) participará en una experiencia de aprendizaje realizada en la Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural de la Universidad Industrial de Santander, en el marco de un proyecto de investigación educativa.

2. Entiendo que la actividad consiste en el desarrollo de dinámicas pedagógicas (videos, discusiones, material fotográfico, actividades lúdicas) y la aplicación de un cuestionario antes y después de la experiencia.

3. Reconozco que la participación no implica riesgos físicos ni psicológicos para mi hijo(a).

4. Se me ha informado que los datos recolectados se utilizarán únicamente con fines académicos y de investigación, y que no se divulgará información personal de los participantes.

5. Autorizo el uso de fotografías tomadas durante la experiencia únicamente con fines académicos y de divulgación científica, garantizando el anonimato y la confidencialidad.

Declaración de consentimiento

Por lo anterior, manifiesto libre y voluntariamente que AUTORIZO la participación de mi hijo(a) en la experiencia de aprendizaje descrita.

Firma del padre/madre o acudiente: _____

Nombre completo: _____

C.C. / T.I. / C.E. número: _____

Firma del estudiante: _____

Nombre del estudiante: _____

Grado y Colegio: _____

Fecha: __ / __ / __

Apéndice B

PreTest



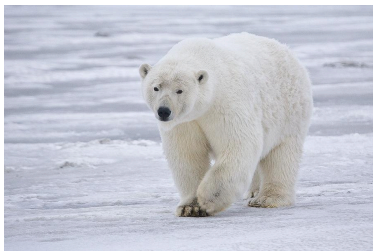
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Escuela de Biología
Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural



Pre-Test para la evaluación diagnóstica de conocimientos de la Evolución Biológica

Nombre: _____ Fecha: _____ Grupo: _____

Lee con mucha atención y responde las siguientes preguntas de acuerdo con los conocimientos que tienes de Evolución Biológica. A continuación, encontrarás escenarios relacionados con procesos que ocurren en la naturaleza. Tu tarea es identificar el tipo de proceso al que corresponde cada enunciado.



1. Los mamíferos que habitan el Ártico deben soportar temperaturas extremadamente frías. Aquellos individuos que poseen una gruesa capa de grasa logran conservar mejor el calor corporal, lo que les permite sobrevivir durante el invierno y reproducirse con mayor éxito. Este fenómeno es un ejemplo de:

- a) Aclimatación fisiológica
- b) Evolución Biológica
- c) Selección Natural
- d) Adaptación Biológica

2. Hace millones de años, los ancestros de los buitres colombianos tenían plumas en la cabeza. Con el tiempo, los individuos con menos plumas se hicieron más comunes en la población. Este proceso se conoce como:

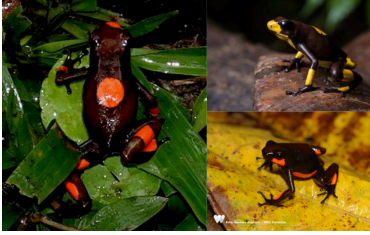
- a) Plasticidad fenotípica
- b) Mutación negativa
- c) Selección Natural
- d) Evolución Biológica



3. En una población de mariposas, los individuos que poseen colores y patrones que les permiten camuflarse mejor en su entorno tienen más probabilidades de escapar de los depredadores y dejar descendencia. Con el tiempo, esta característica se vuelve predominante en la población. Este fenómeno se debe a:

- a) Evolución Biológica
- b) Camuflaje

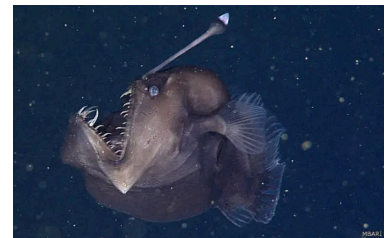
- c) Adaptación Biológica
- d) Selección Natural



4. La rana arlequín del Pacífico colombiano muestra gran variabilidad en su coloración y patrones de manchas. Ninguna variación parece dar ventaja sobre otra, pero los cambios en la población ocurren con el tiempo. Este proceso se llama:

- a) Adaptación Biológica
- b) Selección sexual
- c) Evolución Biológica
- d) Mutación neutral

5. Los peces que habitan en aguas profundas viven en completa oscuridad. Algunas especies han desarrollado órganos bioluminiscentes que les permiten atraer presas, lo que les facilita la alimentación y aumenta sus probabilidades de sobrevivir y reproducirse. Este proceso es un ejemplo de:



- a) Adaptación Biológica
- b) Mejoría biológica
- c) Evolución Biológica
- d) Mutación positiva



6. Los árboles de una selva compiten por la luz solar. Aquellos que crecen más alto pueden acceder mejor a la luz y producir más semillas, mientras que los árboles más bajos quedan en desventaja. Con el tiempo, la población se compone mayoritariamente de árboles altos. Este proceso es un ejemplo de:

- a) Evolución Biológica
- b) Aclimatación
- c) Adaptación Biológica
- d) Selección Natural

Apéndice C

PostTest



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Escuela de Biología
Sala de Exhibición del Museo de Historia Natural



Post-Test para la evaluación de saberes adquiridos en la Experiencia de Aprendizaje
 para la enseñanza de la Evolución Biológica

Nombre: _____ Fecha: _____ Grupo: _____

Lee con mucha atención y responde las siguientes preguntas de acuerdo con lo que aprendiste en la experiencia de aprendizaje que acabas de vivir. A continuación, encontrarás escenarios relacionados con procesos que ocurren en la naturaleza. Tu tarea es identificar el tipo de proceso al que corresponde cada enunciado. Presta especial atención a los detalles, la clave está en comprender lo que sucede en cada caso y relacionarlo con lo que aprendiste.



1. Los primeros caballos tenían varios dedos en sus patas, pero con el tiempo, estos se redujeron hasta formar un solo casco. Este cambio gradual es un ejemplo de:

- a) Mutación
- b) Evolución Biológica
- c) Aclimatación
- d) Adaptación Biológica

2. *Melocactus schatzlii* es un cactus exclusivo de las zonas áridas de Colombia. Su tallo está cubierto por largas espinas que lo protegen del ataque de herbívoros, lo que le permite mantenerse en su entorno. Este es un caso de:

- a) Mejoría en el fitness
- b) Mutación
- c) Selección Natural
- d) Adaptación Biológica



3. El *Archaeopteryx* es un fósil transicional que presenta características tanto de reptiles como de aves, evidenciando un cambio gradual entre estos grupos. La presencia de estas características mixtas sugiere un proceso de:

- a) Evolución Biológica

- b) Aclimatación
c) Adaptación Biológica
d) Selección Natural
4. En un río de aguas cristalinas, existe una población de peces con tonos anaranjados. Algunos individuos tienen un color más claro que les permite confundirse con el fondo y evitar a los depredadores. Con el paso del tiempo, los individuos con tonalidades más claras se vuelven predominantes en la población. Este proceso es conocido como:
- a) Adaptación Biológica
b) Selección Natural
c) Evolución Biológica
d) Mutación positiva
5. En un ecosistema con flores de corola profunda, las aves con picos largos y delgados pueden extraer néctar con mayor facilidad que aquellas con picos cortos, lo que les da una ventaja en la obtención de alimento y aumenta su éxito reproductivo. Este fenómeno se conoce como:
- a) Adaptación Biológica
b) Selección Natural
c) Evolución Biológica
d) Aclimatación
6. En una población de conejos que habita en un bosque oscuro, los individuos con pelaje más oscuro son menos visibles para los depredadores, lo que aumenta sus posibilidades de sobrevivir y reproducirse. Con el paso de las generaciones, el pelaje oscuro se vuelve más común en la población. Este es un ejemplo de:
- a) Evolución Biológica
b) Camuflaje
c) Adaptación Biológica
d) Selección Natural



7. Los ancestros de las ballenas tenían cuatro patas y vivían en tierra. A medida que su estilo de vida se volvió más acuático, su cuerpo cambió hasta desarrollar aletas. Este proceso es un ejemplo de:
- a) Mutación negativa
b) Evolución Biológica
c) Selección Natural
d) Adaptación Biológica

8. En un bosque, las bacterias expuestas a un antibiótico empiezan a morir, pero unas pocas tienen una mutación que les permite resistir su efecto. Estas bacterias resistentes sobreviven y se multiplican, mientras que las sensibles desaparecen. Este es un claro ejemplo de:
- a) Selección Natural
 - b) Evolución Biológica
 - c) Resistencia a antibióticos
 - d) Mutación positiva

Apéndice D

Evolución en ambientes de cueva

Definir el concepto de cueva no es una tarea sencilla, Culver & Pipan (2019) la describen como “Una abertura natural en roca sólida con áreas de completa oscuridad y de más de unos pocos milímetros de diámetro” (p. 4). Si bien esta definición es útil, es necesario aclarar que no todas las formaciones conocidas como cuevas cumplen todos los criterios, pues hay cavidades a las cuales les llega luz o que son formaciones de arenas o gravas que no corresponden a roca sólida (Dreybrodt et al. 2005).

Los recursos que se encuentran en las cuevas son limitados, y la falta de productores primarios supone un reto para el mantenimiento energético del ecosistema, por lo que los organismos dependen del ingreso de energía externa a las cuevas (Riddle et al., 2018). Las fuentes de energía en ambientes subterráneos pueden ser autóctonas (quimioautotrofia) o alóctonas (ingreso desde el exterior) (Culver & Pipan, 2019). Durante las inundaciones, el flujo de agua lleva materia orgánica como hojarasca y detritus, a lo que se le suma factores como el viento, la gravedad y el movimiento de los animales como murciélagos, creando una red trófica compleja que conecta la superficie con lo profundo (Alvarado-Flores et al., 2020; Culver & Pipan, 2019).

Dentro de las cavernas hay fauna conocida como troglófauna. Racovitza (1907) clasificó a la troglófauna así: troglóbios: aquellos que cumplen la totalidad de su ciclo de vida en las cuevas; troglófilos: los que pasan su ciclo de vida en las cuevas, pero pueden encontrarse en el exterior y; troglóxenos, que visitan el ambiente subterráneo regularmente pero su ciclo de vida se lleva a cabo en el exterior. La troglófauna debe enfrentarse a factores que condicionan la vida en el medio subterráneo como la oscuridad, la ausencia de fotoperiodo, temperatura constante, poco alimento, humedad relativa próxima a la saturación, valores elevados de CO₂ y bajos de O₂ (Márquez Carbajal et al., 1996). Christiansen Ka

(1962) introdujo el término “troglomorfismo” para referirse a aquellos caracteres fenotípicos que son resultado de la evolución en las cavernas de todo el planeta y que sugieren una ventaja al ambiente inhóspito de las cuevas. Dos décadas más tarde, se empezó a usar el término para caracteres fisiológicos y etológicos, por lo que los troglomorfismos no son exclusivos de la morfología, y es necesario hacer una comparación con ancestros epigeos de la troglofauna para definir un troglomorfismo (Galan, 2010). Algunos de los troglomorfismos más comunes son reducción y atrofia de las estructuras oculares, pérdida de pigmentación melánica, elongación de apéndices, optimización de aparatos sensoriales y frecuentes periodos de letargo (Tabla A1). De acuerdo con Galan (2010), la troglofauna cambia su estrategia oportunista, con gran flujo de energía por su biomasa, a una estrategia especialista, donde son muy eficientes y pueden mantener un flujo de energía bajo, permitiéndoles sobrevivir en medios de escasos recursos.

Tabla A1

Troglomorfismos presentes en animales que habitan cuevas (Galán, 2010; Malard et al., 2023; Márquez Carbajal et al., 1996; Romero & Green, 2005)

	Morfológicos	Fisiológicos	Etológicos
Reducción y/o atrofia	Ojos y estructuras del aparato visual Pigmentación melánica Cutícula, tegumento Escamas Vejiga natatoria Alas Órgano pineal	Permeabilidad Tasa metabólica Ritmo circadiano Número de huevos Letargo estacional Lento desarrollo embrionario Consumo de O ₂ Fecundidad	Fotorepuestas Agresión Reacción de escape Agregación
Aumento	Alargamiento de los apéndices Órganos sensoriales no ópticos Tamaño corporal	Resistencia a la insulina Reserva lipídica Mayor longevidad Volumen del huevo	

Nota: Los rasgos aquí exhibidos no se encuentran presentes en la totalidad de la troglofauna.

Nota: Esta tabla también se encuentra en el cuerpo del documento (Tabla 2), incluida aquí con fines de integridad del apéndice.

Cuando se observa un organismo troglobio, se puede apreciar una morfología particular, Galan (2010) compara esta morfología con un vehículo de exploración extraterrestre, que está adecuado para la búsqueda, exploración y comunicación intraespecífica en un ambiente poco acogedor. Según Romero & Paulson (2001), la reducción del tamaño corporal en vertebrados como los peces se ha propuesto como un troglomorfismo, y Dowling et al. (2002) encontró una reducción cuantitativa en el número de vértebras torácicas en algunos linajes de peces cavernícolas del género *Astyanax*, así como el aumento del número de papilas gustativas de estos peces con respecto a sus parientes epigeos.

La evolución troglobia se caracteriza por la estilización corporal y la elongación de los apéndices, lo que puede explicarse mediante procesos alométricos y heterocrónicos, lo que implica cambios en la tasa de crecimiento de los órganos en relación con el crecimiento corporal (Galán, 2010). Los coeficientes alométricos cambian dependiendo del genotipo y de condiciones ambientales, lo que se relaciona con la evolución en ambientes de cuevas. Estos procesos son activados de modo combinado en la ontogenia y de donde surgen algunos troglomorfismos por acción de aceleración o retardo del desarrollo de un órgano, es decir, la combinación de paedomorfosis y peramorfosis. Estos cambios ontogénicos dependen de mecanismos de expresión que determinan la estructura de un órgano y controlan la organización espacial de los tejidos (Dowling et al., 2002).

De acuerdo con Rétaux & Casane (2013), la pérdida de ojos en especies cavernícolas ocurrió de manera independiente y por procesos distintos durante el desarrollo ontogénico. Esta regresión en la especie modelo *Astyanax mexicanus* tiene su fundamento en el desarrollo temprano. En las primeras etapas embrionarias ocurre un *trade-off*, puesto que el tamaño del territorio presuntivo óptico se ve reducido mientras que el territorio presuntivo olfatorio crece; posteriormente, los ojos sufren una malformación por movimientos morfogenéticos anormales durante la formación de vesículas ópticas, resultado de cambios en la expresión

genética en el campo óptico de la gástrula; para que finalmente se degeneren por el cristalino defectuoso (Malard et al., 2023). Correspondientemente, Fong (1989) encontró una correlación negativa en el tamaño del ojo y de la antena en *Gammarus minus*. El autor alude una selección indirecta y afirma que la disminución del aparato ocular permite mayor desarrollo de las antenas. De acuerdo con Fong, sus hallazgos corresponden con la hipótesis de la economía energética pues, a causa de la disponibilidad limitada de energía y de la falta de valor adaptativo en el gasto de la misma, ocurre un *trade-off*; suponiendo una ventaja a los organismos que puedan redirigir esa energía hacia el desarrollo de estructuras más convenientes. En este sentido, el desarrollo del aparato ocular en las especies ciegas cavernícolas está restringido; sin embargo, la formación inicial ocurre debido a que las vesículas ópticas están ligadas al desarrollo de otras estructuras en el prosencéfalo, donde una malformación sería letal (Devos et al., 2021).

Las razones genéticas de los triglomorfismos se pueden encontrar en mutaciones tanto en regiones codificantes como no codificantes (Gross & Powers, 2020). De acuerdo con Gross, hay más casos documentados en la evolución troglobia de mutaciones en regiones codificantes (Aspiras et al., 2015; Elipot et al., 2014; Gross & Wilkens, 2013; Riddle et al., 2018), pero esto puede deberse a un sesgo, puesto que es prácticamente más sencillo estudiar el ADN codificante que las secuencias cis y trans-reguladoras de los genes.

Uno de estos trabajos es el realizado por Elipot et al., (2014), en donde se encontró una mutación puntual en la secuencia codificante para la monoaminoxidasa en el pez de caverna *Astyanax mexicanus*, lo que implica mayor presencia de hormonas aminas en el cerebro, causando que el organismo tenga mayor voluntad exploratoria, menor sueño para más tiempo en busca de alimento y un conducta menos agresiva, entre otros comportamientos que favorecen la vida cavernícola.

Otro mecanismo clave es la selección relajada. En un ambiente sin luz, la visión no ofrece ventajas, por lo que la presión selectiva que mantenía funcionales los genes del aparato visual desaparece. Esto permite que mutaciones deletéreas (que inactivan la proteína) se acumulen en la población sin ser eliminadas por la selección. Con el tiempo, esta acumulación de "errores" genéticos conduce a la degradación y eventual pérdida del rasgo. Hinaux et al. (2013) documentaron este proceso al encontrar múltiples mutaciones de este tipo en los genes visuales de *Astyanax mexicanus*. De manera similar, Carlini y Fong (2017) reportaron selección relajada como causa de la regresión de rasgos en el anfípodo cavernícola *Gammarus*.

Para investigar las mutaciones en regiones no codificantes, Gross & Powers (2020) analizaron genes implicados en el desarrollo ocular en híbridos del isópodo *Asellus aquaticus* (poblaciones de superficie y de cueva). Sus resultados revelaron una expresión alélica específica: en los híbridos, el alelo proveniente del padre de la cueva se expresaba significativamente menos que el alelo del padre de la superficie. Esta diferencia evidencia una mutación en la secuencia *cis*-reguladora del alelo cavernícola, la cual reprime su transcripción. Este tipo de mutación es un mecanismo evolutivo eficiente para reducir un rasgo, ya que actúa como un "interruptor" que disminuye la expresión del gen sin necesidad de inactivar su secuencia codificante.

La epigenética también puede jugar un papel en la evolución en cuevas, aunque se sabe poco al respecto (Malard et al., 2023). Un estudio encontró que la metilación excesiva en varias regiones de ADN codificantes para el desarrollo ocular en *A. mexicanus* y *Danio rerio* regula el desarrollo ocular temprano, promoviendo la degeneración de estructuras visuales (Gore et al., 2018). Los autores reportan mayor expresión del gen *dnmt3bb.1* en poblaciones cavernícolas, que codifica a una enzima metiltransferasa responsable de permitir marcas epigenéticas que truncan la transcripción de genes específicos involucrados en el

desarrollo del ojo. Es necesario aclarar que factores epigenéticos pueden trabajar de la mano con mutaciones en secuencias cis-reguladoras

Las mutaciones son más frecuentemente reportadas como causales de troglomorfismos, incluyendo los fisiológicos. Riddle et al., (2018) encontró que peces de caverna *Astyanax mexicanus* han desarrollado resistencia a la insulina debido a una mutación en secuencias codificantes, lo que les permite comer y priorizar la síntesis de lípidos para una reserva de energía para los periodos de escasez. A su vez, Aspiras et al., (2015) habla de una mutación en el gen MC4R en *A. mexicanus*, que codifica para el receptor de la melanocortina; la mutación interfiere en la función del receptor, causando que el organismo no tenga sensación de saciedad y coman demasiado cuando hay disponibilidad de alimento, esto permite un almacenamiento de energía para la inanición.

Además de la baja tasa metabólica, la troglofauna tiende a la baja locomoción. Se ha encontrado menor actividad de glutatión S-transferasa (GST) y acetilcolinesterasa (AChE) en poblaciones troglobias de *Asellus aquaticus* con relación a sus parientes de superficie (Jemec et al., 2017). De acuerdo con los autores, la GST no presenta fluctuaciones estacionales, indicando una baja tasa metabólica constante, mientras que la baja actividad de AChE indica menor locomoción en *A. aquaticus*. Los autores señalan una probable adaptación.

El albinismo en *Astyanax mexicanus* ha surgido de manera independiente en distintas poblaciones mexicanas. Gross & Wilkens (2013) encontraron el mismo alelo mutado del gen OCA2, responsable del fenotipo despigmentado, en dos poblaciones aisladas geográficamente, lo que sugiere que el alelo se encontraba en la población epígea ancestral. Esto implica que es posible tener un mismo fenotipo a partir de variación genética preexistente. Esta pérdida completa de función fue encontrada por Protas et al., (2006) donde se identificaron distintas mutaciones en OCA2, que no se encuentran en poblaciones epígeas.

Estos hallazgos sugieren que el albinismo en *A. mexicanus* ha evolucionado de manera paralela mediante eventos mutacionales convergentes en el mismo gen.

La evolución regresiva convergente ha sido registrada por varios autores. De acuerdo con datos morfométricos, de reloj molecular y de tres regiones distintas de ADN codificante en tres géneros de opiliones (Sclerobuninae) cavernícolas del suroeste de Norteamérica, se ha encontrado que los troglomorfismos han evolucionado independientemente al menos tres veces y se sugiere pudo haber más transiciones en esclerobubinos (Derkarabetian et al., 2010). Los autores de este estudio también encontraron una relación positiva entre el índice de troglomorfismo y el tiempo de divergencia de las poblaciones de cavernas. Asimismo, Espinasa et al., (2018) señala evolución regresiva convergente en el gen MC1R en poblaciones cavernícolas de distintas familias teleósteas, estudiando *Astroblepus pholeter* y comparando sus resultados con otros estudios (e.g., Gross et al., 2018) que reportan mutaciones en el mismo gen que afectan la pigmentación melánica.

Un estudio que se dedicó a entender si los troglomorfismos exhiben convergencia o divergencia es el de Konec et al., (2015). Para esto, estudiaron dos poblaciones de *Asellus aquaticus*, una en una cueva en Rumania y otra en una cueva en Eslovenia, asegurándose de la distancia geográfica. Además las dos cuevas presentaban condiciones distintas en alimento, química del agua, tipo de hábitat, variabilidad genética ancestral y estructura genética de las poblaciones cavernícolas. Los resultados dicen que de 60 rasgos morfométricos, 18 se comportaron de manera convergente o paralela, destacando la elongación de las antenas, la pérdida de ojos y de pigmentación. Los autores señalan que las diferencias en condiciones de ambas cuevas pueden explicar la divergencia del resto de los rasgos, pero la convergencia en los troglomorfismos establecen la oscuridad como fuerza selectiva principal. Estos hallazgos coinciden con lo mencionado por Fišer (2019), quien afirma que dependiendo de las condiciones es esperable que se afecten el tipo y grado de estrategias adaptativas. Finalmente,

se propone que el modelo de evolución en cuevas sea un mosaico de convergencia y divergencia que evidencie la heterogeneidad de los entornos subterráneos.

La ausencia de una ventaja evolutiva clara en la regresión de rasgos y reducción de funciones supone una discusión para la bioespeleología. Sin embargo, Galan (2010) asegura que la regresión es evolución y que, a pesar de la controversia, no puede considerarse como una simple pérdida degenerativa. Galan ilustra el adelgazamiento del tegumento en artrópodos como una reducción directamente adaptativa al permitir mayor permeabilidad para un mejor balance hídrico; pero señala que la pérdida de los ojos puede ser una ventaja adaptativa indirecta, pues está relacionada con caracteres positivamente seleccionados como el ahorro energético. Fišer (2019), por su parte, afirma que es muy probable que los troglomorfismos hayan surgido como consecuencia de una presión selectiva por parte de la falta de alimento, incluso cuando es muy difícil proveer evidencia contundente.

Un estudio realizado por Poulson (1963) se enfoca en aquellos que indican adaptaciones morfológicas, etológicas y de historia de vida a la vida cavernícola. Poulson trabajó con especies ambliópsidas, cuatro troglobias y dos no troglobias. Dentro de sus resultados encontró adaptaciones como: 1) el aumento en el número y tamaño de los neuromastos y la línea lateral sensorial, para la mejor detección de vibraciones en la oscuridad; 2) aumento en el tamaño del huevo y menor cantidad en la puesta, mayor edad de madurez reproductiva, reducción en la tasa de crecimiento y aumento en la esperanza de vida como estrategias para la poca disponibilidad de energía y para asegurar el incremento de la longevidad y; 3) la reducción de la tasa metabólica, como respuestas a la escasez de alimento. Posteriormente, Poulson & White (1969), trabajando con las mismas especies, señalaron adaptación en rasgos como: 1) el aumento de tamaño del lóbulo olfatorio y reducción en el lóbulo visual; 2) aumento en el tamaño de la cabeza, adaptación que les permite una mejor displasia del agua para mayor efectividad de caza.

Culver et al., (1995) estudió rasgos adaptativos en *Gammarus minus* y, midiendo el éxito reproductivo observando el amplexus y la carga de huevos en hembras, atribuyó adaptación a rasgos como reducción del tamaño de los ojos, aumento del tamaño de las antenas, mayor tamaño corporal y aumento del lóbulo olfatorio.

Anteriormente se creía que la razón por la cual los organismos cavernícolas viven de esta manera era porque quedaban atrapados allí, como menciona Wilkens (1979), pero no hay evidencia empírica que soporte esta afirmación (Romero & Green, 2005). En contraste, estudios demuestran que la colonización de los medio hipogeos no necesita ser accidental. Dowling et al. (2002) demuestra que algunas poblaciones cavernícolas de *Astyanax mexicanus* surgieron de manera independiente con invasiones aisladas en cuevas mexicanas.

Los organismos cavernícolas han logrado una colonización exitosa en ambientes caracterizados por su hostilidad. Para afirmar cuánto tiempo ha tomado esta colonización se debe tomar en cuenta todas las especies cavernícolas en el planeta pero, debido a la imposibilidad de realizar esta hazaña, podemos echar un ojo a las especies mejor estudiadas. En una estimación del tiempo que lleva la evolución troglobia, realizada por Culver & Pipan (2019), se afirma que puede tomar desde algunos miles de años (como es el caso de los 100.000 a 500.000 años que necesitó *G. minus*), hasta 10 millones de años (como sucedió con *Proteus anguinus*, *Asellus aquaticus* y *Leptodirus*); demostrando que el tiempo necesario para la colonización exitosa de cuevas depende de la especie, el grado de aislamiento y otros factores evolutivos involucrados.

La colonización de las cuevas puede darse de varias maneras. De acuerdo con Culver & Pipan (2019), existe una constante invasión de organismos terrestres y acuáticos a los ambientes de cuevas, pero no necesariamente es una colonización exitosa. Mitchell et al., (1977) afirma que *Astyanax mexicanus* invadió ambientes de cuevas por medio de sumideros donde el agua superficial se infiltra hacia el ambiente subterráneo. Los acuíferos epikársticos

reciben invasores que provienen de hojarasca en la superficie (Reid, 2001). Los invasores pueden entrar a las cuevas por varias razones, como el escape de depredadores, competidores u oscilaciones extremas de temperatura (Culver & Pipan, 2019),

No cualquier organismo puede invadir una cueva para asentar su especie en esta. Por esto, los organismos suelen presentar preadaptaciones a una vida afótica y húmeda. Romero & Green (2005) comentan que antes de la colonización es común que los organismos ya tengan algunas características que les permitan ocurrir en ambientes de cueva para, posterior y progresivamente, adquirir más troglomorfismos. Dentro de estas características pueden estar órganos sensoriales no visuales hiperdesarrollados, baja tasa metabólica y hábitos nocturnos. Las preadaptaciones no son una regla general que se cumpla en todos los linajes troglobios, de hecho, hay una gran proporción de organismos que habitan en cuevas que no presentan troglomorfismos (Romero & Green, 2005).

De acuerdo con Malard et al., (2023), existen dos hipótesis que explican la colonización de la troglofauna a las cavernas. La Hipótesis del Relicto Climático (CRH), que dice que las especies de superficie se vieron obligadas a entrar a las cuevas escapando de condiciones climáticas nuevas que hicieron inhóspitos sus hábitats originales que, con el tiempo, llevó a un aislamiento geográfico y, por tanto, a la especiación alopatrica. Por otro lado, la Hipótesis del Cambio Adaptativo (ASH) que afirma que la colonización fue voluntaria, debido a la disponibilidad de un nuevo nicho ecológico, lo que permite un contacto con poblaciones superficiales y, consecuentemente, ocurre especiación parapátrica.

Ninguna de las hipótesis es una verdad absoluta, pues se ha documentado especiación parapátrica (Arnedo et al., 2007; Chapman, 1982; Peck & Finston, 1993; Rivera et al., 2002) y especiación alopatrica (Barr, 1960; Barr & Holsinger, 1985). Malard et al., (2023) menciona que la alopatría supondría una evolución más rápida debido al nulo flujo génico. Por su lado, Rivera et al., (2002) dice que en zonas donde el clima ha sido relativamente

constante, como lo serían las cavernas en el trópico, ocurre frecuentemente parapatría, puesto que los organismos no necesariamente están geográficamente aislados.

Culver & Pipan (2019) comentan la dispersión posterior a la colonización y señalan que la ocurrencia de especies crípticas sugiere una dispersión limitada. Sin embargo, también destacan la dispersión de pequeños troglobios facilitada por acuíferos aluviales que actúan como corredores naturales conectando poblaciones subterráneas.

De la presente sección podemos concluir que los rasgos asociados a ambientes de cuevas no están controlados por unos pocos genes, sino que un mosaico de procesos epigenéticos, mutacionales, ontogénicos están fuertemente integrados para crear un fenotipo excepcional que permite a los organismos una vida exitosa en las cavernas. La variabilidad genética presente en lo subterráneo es grande y constantemente cambiante; lo morfológico, lo fisiológico y lo etológico varían a través de las generaciones y es aquí donde podemos observar la evolución biológica en Ambientes de Cueva.