

Trabajo de Fin de Máster

La evolución biológica
en secundaria:
Contribución a la
incorporación de
nuevos contenidos y
metodologías

Máster Universitario en Profesorado de Educación Secundaria

Autor: Juan Franco Goyena

Director: Juan Bosco Imbert Rodríguez

Pamplona, 14 de junio de 2019

Resumen

Actualmente, el modelo evolutivo vigente es la síntesis evolutiva moderna, que combina darwinismo, genética moderna y de poblaciones y otros campos. No obstante, algunos aspectos de la síntesis han sido criticados, como, por ejemplo, el excesivo peso que da a la selección natural o su excesivo gradualismo, que podría no explicar ciertos fenómenos macroevolutivos. Ante esto, cobran importancia procesos, conceptos y campos recientes de la biología, entre los que destacan la deriva genética, la evo-devo, la exaptación y la duplicación génica.

En este trabajo se realizó una revisión bibliográfica de esos puntos y se estudió su tratamiento en el currículo de secundaria de Navarra y en libros de texto de diversas asignaturas pertinentes. Además, se llevó a cabo una intervención de dos pares de sesiones en sendas clases de 1º de Bachillerato, que incluyó una exposición magistral, una actividad cooperativa, un vídeo-cuestionario de tarea y un juego-simulación de la deriva genética y la selección natural. Los conocimientos, comprensión y aceptación de la evolución por parte de los participantes se estudiaron a partir de sus respuestas a cuestionarios repartidos al inicio y al final de la intervención.

Los resultados mostraron una mejoría estadísticamente significativa de su comprensión de ciertos conceptos; una invariable, aunque alta, aceptación de la evolución; y una valoración positiva de las sesiones, especialmente de la simulación. Finalmente, se discute la conveniencia de incluir estas metodologías y nuevos contenidos en la enseñanza secundaria y se hace una reflexión acerca de la compatibilidad evolución-religión a la luz de estos últimos.

Palabras clave: Post-síntesis evolutiva, Innovación metodológica, Secundaria.

Abstract

Nowadays, the current evolutionary model is the modern evolutionary synthesis, which combines Darwinism, modern and population genetics and other fields. However, some aspects of the synthesis have been criticized, such as the excessive weight that it gives to natural selection or its excessive gradualism, which could not explain some macroevolutionary phenomena. Faced with this, processes, concepts and recent fields of biology become important, among which genetic drift, evo-devo, exaptation and gene duplication stand out.

In this work, a bibliographic review of these points was made and the treatment given to them in the secondary school's curriculum of Navarra and in the textbooks of various pertinent subjects was studied. In addition, an intervention consisting of two pairs of sessions was carried out in two classes of 1st year of *Bachillerato*, one pair in each. The intervention included a master exposition, a cooperative activity, a homework video-questionnaire and a game-simulation of genetic drift and natural selection. The participant's knowledge, understanding and acceptance of evolution were studied from their answers to questionnaires that were distributed at the beginning and end of the intervention.

The results showed a statistically significant improvement in their understanding of certain concepts; an invariable although high acceptance of evolution; and a positive evaluation of the sessions, especially of the simulation. Finally, the convenience of including these methodologies and new contents in secondary education is discussed and a reflection is made about the evolution-religion compatibility in light of those contents.

Key words: Evolutionary post-synthesis, Methodological innovation, Secondary.

Índice

1. Introducción.....	4
1.1. Tema escogido	4
1.2. Consideraciones didácticas.....	4
2. Objetivos	5
3. Revisión: La evolución en la actualidad.....	6
3.1. Teorías básicas de la evolución.....	6
3.1.1. Darwinismo.....	6
3.1.2. Neodarwinismo	7
3.2. Críticas al neodarwinismo y nuevas aportaciones.....	7
3.2.1. Excesivo énfasis en la selección natural y papel de la deriva.....	8
3.2.2. Ritmo de la evolución y macroevolución	8
3.2.3. Evo-devo	10
3.2.4. Exaptación	11
3.2.5. Duplicaciones génicas.....	12
3.2.6. Otras aportaciones: Transferencia horizontal de genes	14
3.3. Refutación del diseño inteligente	15
4. Análisis del currículo y libros de texto.....	15
4.1. Revisión del currículo.....	15
4.2. Revisión de libros de texto.....	20
4.2.1. Deriva genética	20
4.2.2. Ritmo de la evolución y macroevolución	21
4.2.3. Evo-devo	22
4.2.4. Exaptación	22
4.2.5. Duplicación génica.....	23
4.2.6. Otros temas	23
4.3. Valoración de los currículos y libros revisados	24
5. Intervención en el aula.....	25
5.1. Primera sesión	28
5.1.1. Cuestionario inicial	28
5.1.2. Exposición	28
5.1.3. «Folio giratorio»	28
5.2. Tarea: Vídeo cuestionario sobre el diseño inteligente.....	29
5.3. Segunda sesión	31
5.3.1. Simulación deriva-selección natural.....	31
5.3.2. Cuestionario final.....	33

6. Metodología de análisis de los resultados	33
6.1. «Folio giratorio».....	33
6.2. Vídeo-cuestionario.....	34
6.3. Cuestionarios: Preguntas de contenidos	34
6.3.1. Evolución de los aciertos y fallos	34
6.3.2. Ideas alternativas y otras ideas	36
6.4. Cuestionarios: Aceptación y compatibilidad con las creencias	36
6.5. Cuestionarios: Valoración de las sesiones	36
6.6. Simulación deriva-selección natural	36
7. Resultados de la intervención en el aula.....	36
7.1. «Folio giratorio».....	36
7.2. Vídeo-cuestionario.....	37
7.3. Cuestionarios: Preguntas de contenidos	38
7.3.1. Cambios en las respuestas correctas e incorrectas.....	38
7.3.2. Ideas alternativas y otras ideas	42
7.4. Cuestionarios: Aceptación y compatibilidad con las creencias	44
7.5. Cuestionarios: Valoración de las sesiones	46
7.6. Simulación deriva-selección natural	46
8. Discusión general	47
9. Algunas propuestas.....	49
10. Evolución y religión	51
11. Conclusiones	53
12. Agradecimientos	53
13. Bibliografía	53
13.1. Legislación	59
Anexo 1. Cuestionario del principio de las sesiones de evolución	60
Anexo 2. Diapositivas expuestas durante la primera sesión de evolución	63
Anexo 3. Plantilla de folio giratorio utilizada en la primera sesión de evolución	67
Anexo 4. Preguntas y explicaciones insertos en el vídeo-cuestionario	68
Anexo 5. Juego realizado en la segunda sesión de evolución	70
Anexo 6. Cuestionario del final de las sesiones de evolución	76
Anexo 7. Gráficas hechas con los datos de la simulación de los alumnos.	79

1. Introducción

1.1. Tema escogido

La evolución biológica es uno de los aspectos de la biología más importantes, al punto de que la idea de que «la diversidad de los organismos, vivientes y extintos, es el resultado de la evolución» ha sido considerada como una de las catorce grandes ideas de la educación en ciencias (ver Harlen, 2010:25).

Por un lado, la evolución permite dar sentido al origen de la inmensa variedad de seres vivos que conocemos y a sus características, permitiendo establecer las relaciones de parentesco que hay entre ellos. De esta forma, la evolución está relacionada en mayor o menor medida con todas las ramas de la biología, desde la genética hasta la ecología pasando por la fisiología. Como dijo uno de los fundadores de la teoría sintética de la evolución, Theodosius Dobzhansky, como título de su famoso ensayo de 1973, «[n]ada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución». En relación con esto, conocer el mecanismo evolutivo es importante para entender y hacer predicciones en torno a procesos de gran importancia para la sociedad, como la aparición de resistencia a los antibióticos o a los herbicidas y pesticidas (Scharmann, 2005).

Por otro lado, la evolución tiene una serie de implicaciones filosóficas y teológicas relacionadas, por ejemplo, con el hecho de que todos los organismos descendamos de un ancestro común; o de que los cambios evolutivos naturales sean ciegos y azarosos; o de que aparentemente no haya una discontinuidad clara entre los seres humanos y los animales de los que provenimos (o de la materia viva y la inanimada).

A lo largo del presente máster he tenido la oportunidad de profundizar en ciertos aspectos sorprendentes de la evolución, que ya conocí por primera vez durante mis estudios para obtener el Grado en Biología. Se trataba de contenidos que no recordaba haber estudiado en el instituto, pero que encontraba muy interesantes y sugerentes y que deseaba investigar más a fondo. Había aquí, por tanto, un posible campo para actualizar la enseñanza de biología en secundaria.

1.2. Consideraciones didácticas

Elegido, pues, el tema a abordar, había de decidirse la metodología escogida para enseñarlo. En el pasado, la educación estuvo muy influida por el modelo conductista, en la que el alumno era un sujeto pasivo al que transmitir la información, que llegaría a aprender por un proceso de memorización y entrenamiento (Castillero, s.f.). Sin embargo, en la actualidad ese modelo se considera insuficiente y, en su lugar, ha cobrado especial importancia el modelo constructivista, según el cual el alumno debe crear su propio conocimiento y, para ello, se debe tener en cuenta cómo es su proceso de aprendizaje, especialmente en lo que se refiere a sus ideas alternativas. Las ideas alternativas son concepciones o explicaciones a hechos que no se ajustan a la realidad científica; que pueden ser previas al aprendizaje del tema o ser inducidas en la propia enseñanza del mismo; y que tienen ciertas características como, por ejemplo, su resistencia a ser sustituidas por las explicaciones correctas debido a factores tales como su cierta coherencia interna y su utilidad para proporcionar una visión operativa del mundo (Sanmartí, 1997).

Otro factor de suma importancia es la motivación de los alumnos, que puede fomentarse de muchas formas, como introduciendo novedades en los contenidos o utilizando una metodología variada. Una de las metodologías útiles en este aspecto es el aprendizaje cooperativo (Williams y Williams, 2011). El aprendizaje cooperativo es una metodología de trabajo en grupo que incorpora una serie de elementos básicos entre los que destaca la responsabilidad individual y la codependencia positiva entre los miembros del grupo. El trabajo cooperativo tendría como

principal ventaja aumentar la inclusión de los diversos alumnos y ayudarles a desarrollar algunas competencias (Pujolàs y Lago, 2011). Más innovaciones metodológicas con efectos positivos en el aprendizaje y en la motivación son las clases invertidas, en las que se manda materiales a estudiar o revisar en casa y posteriormente se debaten o se trabajan de forma práctica en clase (González *et al.*, 2017); y la ludificación (Papp, 2017), que consiste en la utilización de elementos propios de juegos en contextos distintos al del juego (Deterding *et al.*, 2011).

Por último, además de las ideas alternativas, en el ámbito de la evolución es también importante tener en cuenta las creencias religiosas de los alumnos (Barnes y Brownell, 2017), pues dichas creencias y la importancia que tengan para ellos son el principal factor para predecir su aceptación de la evolución, en bastante mayor medida que la comprensión que se tenga del fenómeno evolutivo, como afirma Barnes y Brownell (2017), citando a varios autores. Sin embargo, el grado de aceptación de la evolución en España parece ser alto, aunque no así el grado de comprensión de su funcionamiento (Rivas y González, 2016).

2. Objetivos

Teniendo en cuenta todo lo anterior, y tomando como referencia el libro que publicó este año uno de mis profesores de evolución biológica del Grado (Novo, 2019), el objetivo del presente trabajo de fin de máster (TFM) es contribuir a la incorporación en la educación secundaria española de ciertas aportaciones relevantes, pero poco abordadas, al conocimiento de la evolución considerando para ello las metodologías educativas actuales. En concreto, se propone incorporar la importancia de la deriva genética, la biología evolutiva del desarrollo (evo-devo), la exaptación y la importancia de las duplicaciones génicas a los contenidos, y el aprendizaje cooperativo, los vídeo-cuestionarios y la ludificación a las metodologías a utilizar con esos contenidos. Con esto se pretende contribuir a que los alumnos tengan un conocimiento más completo, profundo y actualizado del mecanismo e historia evolutivos; ayudar a combatir sus ideas alternativas al respecto; y aumentar su motivación y su aceptación de la evolución.

Dentro del objetivo general, los objetivos específicos son los siguientes:

- Aportar una revisión sobre las aportaciones escogidas que pueda servir como referencia al profesorado interesado en incorporarlas a sus clases; e incluso que pueda ser tenida en cuenta por parte de centros educativos y editoriales.
- Estudiar el tratamiento de dichas aportaciones al conocimiento de la evolución en el currículo actual en Navarra y en una muestra de libros de texto de educación secundaria.
- Probar los nuevos contenidos mediante una intervención en el aula que tenga en cuenta las ideas alternativas habituales de los alumnos en relación con la evolución y utilice las metodologías activas de enseñanza-aprendizaje existentes en la actualidad.
- Estudiar, antes y después de la intervención, el grado de conocimiento, comprensión y aceptación que poseen los alumnos acerca de la evolución en general y de los nuevos contenidos en particular.
- Discutir, con base en lo anterior, las formas de incorporar las aportaciones sugeridas a la enseñanza de la evolución biológica en secundaria.
- Aportar una reflexión final sobre la compatibilidad entre los conocimientos actuales en evolución y la religión católica, tradicional en España, dadas sus implicaciones docentes.

A pesar de tener mucha relación con el tema, las hipótesis sobre el origen de la vida y sobre la evolución de las moléculas prebióticas y de las primeras formas de vida no se abordará en este trabajo.

3. Revisión: La evolución en la actualidad

Para comenzar, se hará una revisión del estado de la cuestión en el ámbito de la evolución a la luz de las nuevas aportaciones que se sugiere introducir, siguiendo el esquema del siguiente mapa conceptual:

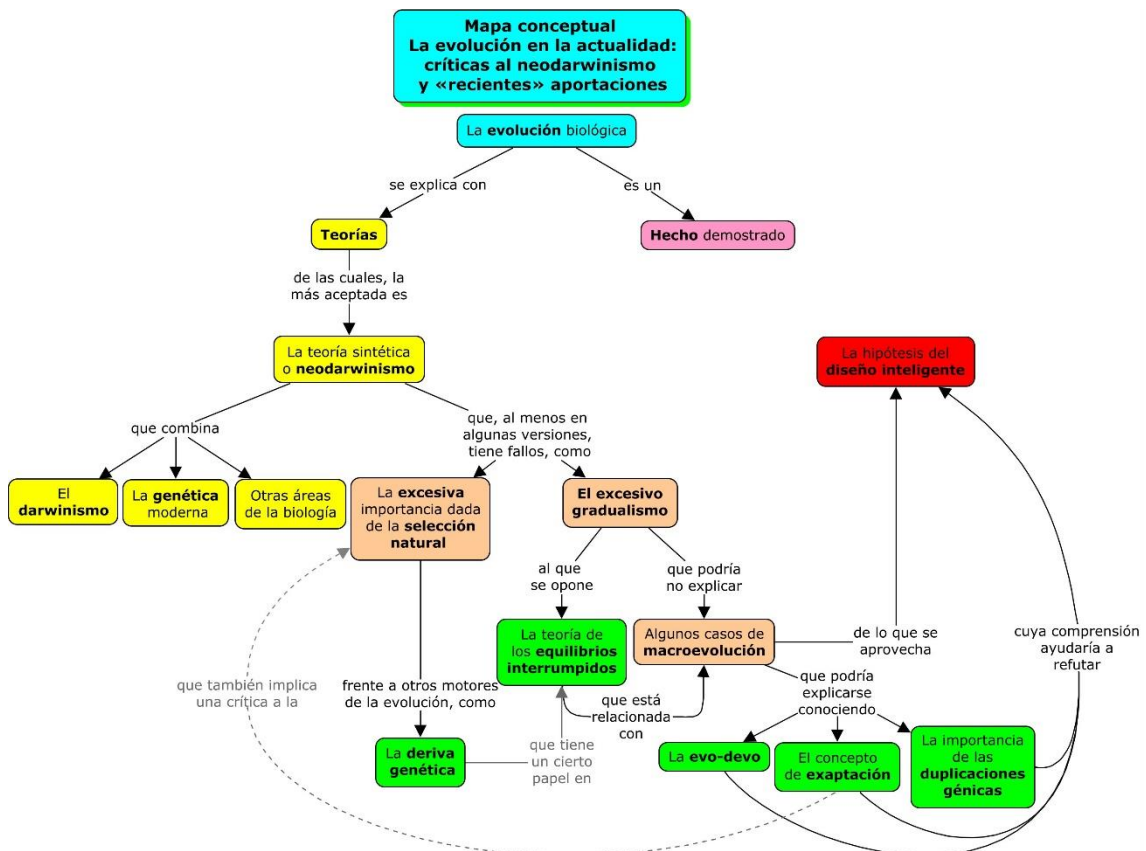


Figura 1. Mapa conceptual, realizado mediante el programa CmapTools (IHMC, 2019) que recoge los conceptos clave de las críticas y aportaciones a las teorías de la evolución recogidas en la revisión bibliográfica del presente TFM.

3.1. Teorías básicas de la evolución

3.1.1. Darwinismo

La evolución biológica, entendida como el cambio en las características de las especies con el transcurso de las generaciones y el paso de unas especies a otras por procesos naturales, se considera actualmente un hecho demostrado. El mecanismo detrás de estos cambios de forma muy básica, aunque no exclusiva, es el explicado por Darwin y Wallace en sus respectivas teorías de la evolución a través de la selección natural. De forma resumida, la selección natural funciona de la siguiente manera: Dentro de las poblaciones de organismos normalmente existen variaciones hereditarias en las características de sus individuos. Para unas determinadas condiciones ambientales, aquellos organismos con características que les faciliten sobrevivir o reproducirse en mayor medida, sobrevivirán o se reproducirán con mayor probabilidad, pasando sus rasgos hereditarios a su descendencia. Así lo largo de las generaciones, la proporción de individuos con características hereditarias favorables para esas condiciones aumentará a medida que se reproduzcan y sobrevivan más, en detrimento de los individuos con rasgos menos favorables. De esa forma, las características de la población variarán a lo largo de las generaciones, promoviendo que la población se adapte al medio (Barbadilla, 1999).

En relación con esto, mi experiencia conversando con personas o incluso leyendo artículos de divulgación científica popular es que es frecuente que este mecanismo básico del proceso

evolutivo no sea bien comprendido o plenamente aceptado. Así, creo que es relativamente común escuchar afirmaciones tales como que nuestro mayor uso de cierto órgano, como por ejemplo del dedo índice con los ratones de los ordenadores (o del cerebro), resultará en un mayor desarrollo de dicho órgano a lo largo de las generaciones. Este tipo de afirmaciones, sin más explicación sobre el mecanismo subyacente, parecen puramente lamarckianas y, por tanto, erróneas. Posiblemente hoy por hoy las ideas alternativas relacionadas con el lamarckismo (intencionalidad en los cambios, herencia generalizada de caracteres adquiridos, etc.) sean las más comunes; y es que se trata de explicaciones de la evolución posiblemente más intuitivas (ver Gallego y Muñoz, 2015) y, quizás también, menos conflictivas con diversas creencias personales (ver Fernández y Sanjosé, 2007).

3.1.2. Neodarwinismo

Como se ha mencionado, Darwin y Wallace sentaron las bases de las teorías evolutivas actuales. Posteriormente, sus teorías fueron completadas con los descubrimientos hechos en genética, que permitían comprender cómo se originaba las variaciones, dónde residían los caracteres hereditarios y cómo se transmitían; con la genética de poblaciones; y con otras disciplinas biológicas. De esa integración de saberes nació la síntesis evolutiva moderna, también llamada teoría sintética de la evolución o neodarwinismo (ver Folguera y González, 2012), que es aún hoy el modelo vigente (González y Meinardi, 2013). Es esta teoría la que, en mi opinión, principalmente aprenden los estudiantes de biología de secundaria e incluso del grado de Biología.

La falta de comprensión o aceptación de la explicación básica de la evolución ya ha sido abordada en muchos artículos especializados (Fernández y Sanjosé, 2007; Gallego y Muñoz, 2015; Gil *et al.*, 2015; Tamayo, 2010) y en anteriores TFM de este y otros másteres (González, 2015; Montoya, 2012). En consecuencia, estas concepciones entre el alumnado no serán centrales en el presente TFM, abordándose sobre todo aspectos de mayor profundidad.

3.2. Críticas al neodarwinismo y nuevas aportaciones

A pesar de poder servir bien como teoría evolutiva básica, el neodarwinismo es considerado por algunos científicos como insuficiente para explicar algunos aspectos de la evolución y de la historia de la vida. Diversos otros modelos, teorías y conceptos han venido, en el último medio siglo aproximadamente, a suplir esas deficiencias (Folguera y González, 2012), en lo que algunos han denominado biología evolutiva post-síntesis. Algunas de ellas, como la teoría neutralista de la evolución molecular de Kimura o la de la endosimbiosis seriada de Margulis, ya se enseñaban cuando yo iba al instituto. Otras, como la epigenética¹, que abarca casos de herencia de caracteres adquiridos, ya han sido abordados en otros TFM (Zudaire, 2016). Es por ello que, siguiendo el esquema de Novo (2019), el presente TFM se centrará en los cuatro puntos ya mencionados: La importancia de la deriva genética, la biología evolutiva del desarrollo, el concepto de exaptación y la importancia de las duplicaciones génicas. Es importante destacar, antes de proseguir, que ninguna de las aportaciones mencionadas representa una alternativa a la teoría sintética de la evolución, sino que sólo la complementan, como opinan también Muñoz (2005) respecto a la evo-devo y González y Meinardi (2013) respecto a la evo-devo y a los equilibrios interrumpidos, así como respecto a la herencia epigenética y a las teorías de la endosimbiosis seriada y el neutralismo. Dicho esto, veamos qué aspectos de la síntesis han sido a menudo criticados:

¹ «La epigenética es el estudio de los cambios heredables reversibles en la función de los genes que ocurren sin cambios en la secuencia de ADN» (Macías *et al.*, 2008:50).

3.2.1. Excesivo énfasis en la selección natural y papel de la deriva

Uno de los errores de cierto neodarwinismo es darle, en ocasiones, una excesiva importancia a la selección natural, despreciando otras fuerzas motrices de la evolución, tales como la deriva genética (Novo, 2019). La deriva genética es el cambio de las frecuencias alélicas en una población debido a la selección por azar. Este fenómeno se da con más fuerza cuanto más pequeña sea la población y puede llevar a la fijación de un alelo —que esa versión del gen pase a ser la única en la población— o a su desaparición (Biologydictionary.net, 2019; ver Figura 2). La deriva genética pudo ser importante en la historia evolutiva dado que en numerosas ocasiones la evolución ha partido de poblaciones pequeñas, como, por ejemplo, tras grandes extinciones o tras la colonización de nuevos ambientes (Novo, 2019).

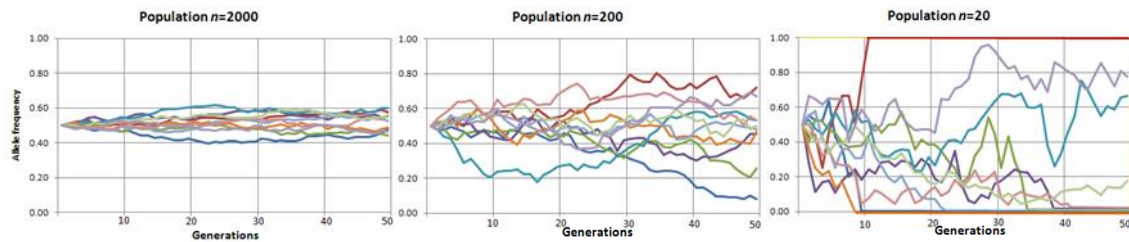


Figura 2. Múltiples simulaciones de la evolución en las frecuencias de un alelo no sujeto a selección natural, en poblaciones de 2.000, 200 y 20 individuos, a lo largo de 50 generaciones. Pueden observarse cambios debidos al azar (deriva genética) que son mayores a menor tamaño poblacional; y que, en algunas simulaciones hechas con la población de 20 individuos, llegan a hacer desaparecer o fijarse al alelo en menos de 50 generaciones. En principio, la probabilidad de que el alelo desaparezca o quede fijado en la población es la misma para este ejemplo, pues la frecuencia inicial es del 50%. Créditos de la imagen original: Por Professor marginalia – Trabajo propio, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6052806>

Yendo a efectos concretos de la deriva genética, es posible que en poblaciones pequeñas la deriva genética conduzca a la fijación de macromutaciones no adaptativas (Hoekstra y Coyne, 2007, citando a varios autores). Asimismo, la deriva podría llevar a que poblaciones pequeñas pasen de una zona adaptativa a otra dentro del paisaje adaptativo (Lande, 1976)². Quizás, en relación con todo lo anterior, la deriva genética pueda ser la causa de algunos de los «sucesos históricos afortunados, que dieron paso a estructuras funcionales especializadas, las cuales se atrincheraron ancestralmente y condicionaron desde entonces toda variación de la forma» de determinado organismo de los que hablan Martínez y Andrade (2014). De acuerdo con Lynch (2007) «[n]umerosos aspectos de la arquitectura genómica, la estructura génica y las vías del desarrollo son difíciles de explicar sin recurrir a las fuerzas no adaptativas de la deriva genética o la mutación». Además de todo esto, la deriva genética puede contribuir al proceso de especiación (ver, p.ej., Uyeda *et al.*, 2009); es útil comprenderla para comprender la teoría neutral de la evolución molecular de Kimura (1983) o para entender mejor las dificultades, ligadas a la pérdida de variabilidad genética provocada por la deriva, que entraña la conservación de especies amenazadas (ver, p.ej., Weeks *et al.*, 2016).

3.2.2. Ritmo de la evolución y macroevolución

Otro de los errores del neodarwinismo es defender un gradualismo excesivo, explicando que la aparición de nuevas especies se da a un ritmo constante, lento y más o menos uniforme, lo que se conoce como gradualismo filético. Ante esto se opone, por ejemplo, la teoría de los equilibrios interrumpidos de Eldredge y Gould (1972), que propone que la aparición de nuevas

² El paisaje adaptativo, como explica este autor, es un espacio en el que la altura representa el grado de aptitud (*fitness*) y las otras dimensiones representan las distintas frecuencias génicas de la población o los distintos fenotipos. A su vez, por fenotipo se entienden los rasgos observables de un individuo fruto de la expresión de su genotipo (i.e., del conjunto de sus genes o ADN) en interacción con el ambiente.

especies en periodos de cambios fenotípicos relativamente rápidos, tras lo cual las nuevas especies formadas experimentan periodos de estabilidad, o de estasis, que pueden llegar a ser muy prolongados en el tiempo.

Aquí es importante explicar que la teoría de los equilibrios interrumpidos no implica el saltacionismo, entendida como la ausencia de estadios intermedios en el cambio (Dawkins, 1989, citado en González y Meinardi, 2013; ver Figura 3), ya que los periodos de estabilidad se podrían explicar por selección estabilizadora y los periodos de cambio por especiación peripátrica, que es la especiación que se da en pequeñas poblaciones periféricas y que puede ocurrir de forma relativamente rápida debido a la deriva génica (Futuyma, 2009; Ridley, 2004; citados en González y Meinardi, 2013), deriva genética de cuya importancia ya se ha hablado.

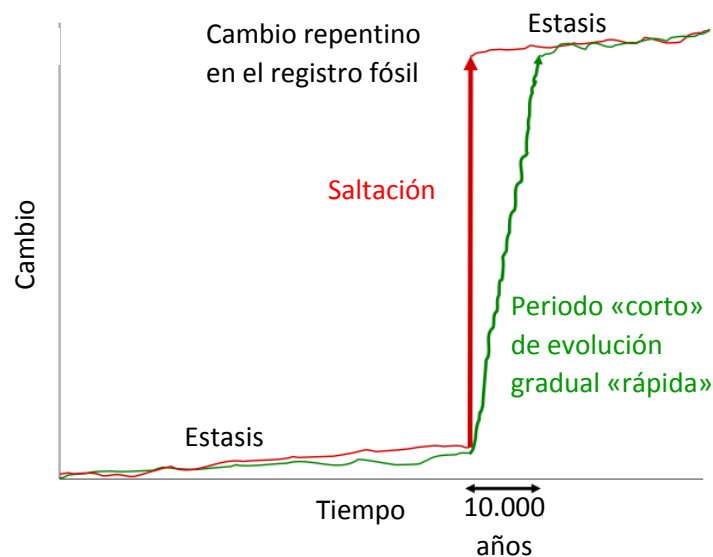


Figura 3. Explicaciones saltacionista (en rojo) y gradualista (en verde) al patrón en el registro fósil de algunos linajes en el que se apoya la teoría de los equilibrios interrumpidos. Créditos de la imagen original: Por Ian Alexander – Trabajo propio, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=62643136>

A pesar de que los equilibrios interrumpidos no requieren de un proceso de saltación, la saltación, entendida como parasaltación³, sigue considerándose posible a través de diversos mecanismos (Zander, 2010). Algunos de estos mecanismos, como mutaciones en genes clave del desarrollo (Theißen, 2006) o aislamiento genético inmediato por poliploidía⁴ (Zander, 2010, citando varios autores) están relacionados con los siguientes apartados del TFM.

En relación con el gradualismo excesivo, otra crítica que se ha hecho al neodarwinismo es que quizás no podría explicar grandes cambios evolutivos, como la evolución de los niveles superiores al de especie conocida como macroevolución (Folguera y González, 2012; Theißen, 2006). Ante esa supuesta deficiencia, han ido surgiendo diversas aportaciones y descubrimientos que permitirían explicarla de forma más satisfactoria.

³ «Modificación genética que es expresada como un profundo cambio fenotípico en dos o varias generaciones y resulta en un linaje evolutivo potencialmente independiente» (Bateman y Dimichel, 2002).

⁴ «Condición en la cual una célula u organismo normalmente diploide adquiere un o más juegos adicionales de cromosomas» (Encyclopædia Britannica, s.f.).

3.2.3. Evo-devo

En primer lugar, está la biología evolutiva del desarrollo, también conocida como evo-devo, que une la evolución y el desarrollo de los organismos (tanto embrionario como posterior). Siendo más específicos, se podría definir como la rama de la biología que se ocupa de identificar aquellos mecanismos en el desarrollo que provocan cambios evolutivos en el fenotipo de los organismos (Hall, 2003). Se trata de una disciplina nacida hacia los años 80 del siglo pasado, la década siguiente al nacimiento de la teoría de los equilibrios interrumpidos. De acuerdo con Muñoz (2005), «[s]u objetivo fundamental es el de establecer las bases genéticas de las grandes innovaciones evolutivas o, dicho de otra forma, relacionar los cambios que se localizan en el origen de los grandes grupos con cambios en patrones espaciales o temporales de expresión de los genes relevantes para el desarrollo».

Un descubrimiento importante en esta área fue que el número de genes implicados en las primeras fases del desarrollo es muy reducido y que es frecuente que estos genes tengan el mismo origen en diferentes organismos (genes homólogos). Así, por ejemplo, los genes Hox se encargan de organizar el eje anteroposterior de todos los animales bilaterales, sean gusanos, insectos o seres humanos (Figura 4). La importancia de esto es que pequeños cambios en estos pocos genes o en sus patrones de expresión pueden ser origen de importantes novedades morfológicas (Muñoz, 2005). Estos cambios bruscos no encajarían con la acumulación gradual de pequeñas variaciones por la que, de acuerdo con Muñoz (2005) abogaríamos el neodarwinismo.

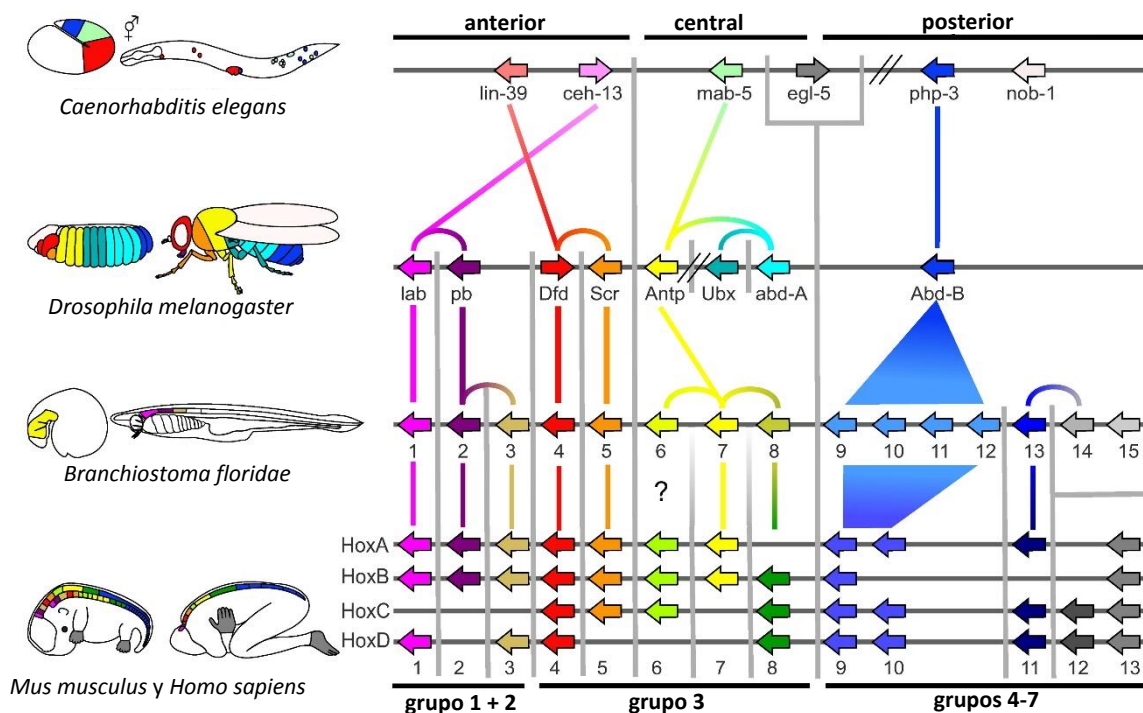


Figura 4. Representación de los genes Hox, que se encargan de determinar la identidad de las regiones del cuerpo del embrión a lo largo del eje anteroposterior, en un gusano nematodo, una mosca, un anfibio (procordado) y un ratón y un ser humano, indicándose la homología entre unos y otros. Obsérvese que los genes se expresan espacialmente en el cuerpo en el mismo orden en que están dispuestos en el cromosoma (colinealidad espacial); y que el humano y el ratón presentan cuatro copias de varios genes (ver hipótesis 2R, más adelante). Créditos de la imagen original: Por Stefanie D. Hueber, Georg F. Weiller, Michael A. Djordjevic y Tancred Frickey, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=19867115+>

Un ejemplo interesante de la evo-devo fue la investigación Freitas *et al.* (2012), de la cual se hace eco Novo (2019) en su libro. En esta investigación, se potenció la expresión del gen *hoxd13a*

en el pez cebra, lo que hizo que desarrollara aletas similares a las patas de los tetrápodos⁵. Es probable que un cambio similar estuviera detrás de la aparición de este grupo al que pertenecemos. Se trata de un interesante ejemplo de la evo-devo experimental que vaticinó Muñoz (2005) y que en el futuro quizás podría darnos importante información de la historia evolutiva de diversos organismos.

3.2.4. Exaptación

En segundo lugar, está el concepto de exaptación y de cooptación. La exaptación es un término acuñado por Gould y Vrba (1982) para referirse a caracteres que evolucionaron debido a que servían para una determinada función (o ninguna en absoluto —véase nonaptación más adelante—) y más tarde pasaron a desempeñar una función distinta. A esta utilización de un carácter para un nuevo uso la llaman cooptación. En su artículo, Gould y Vrba se hacen eco de casos de exaptación a partir de adaptaciones previas que afectan a órganos conocidos por todos: Por ejemplo, que las plumas de los ancestros de las aves originalmente no servían para el vuelo sino que fueron seleccionadas por su utilidad desempeñando alguna otra función (p.ej., aislamiento térmico); o que el hueso, que los vertebrados terrestres necesitamos en nuestro esqueleto para sostenernos, posiblemente evolucionó originalmente como reserva de fósforo; o incluso que muchas funciones de nuestro cerebro que actualmente son importantes en nuestra vida en sociedad habrían surgido a partir de su compleja estructura, originalmente seleccionada por su utilidad desempeñando otra serie de funciones. Diversos ejemplos más de exaptaciones estructurales, comportamentales, genéticas o moleculares, incluidos otros más de importancia para nuestra evolución, pueden encontrarse en la literatura (ver, p.ej., Figura 5).

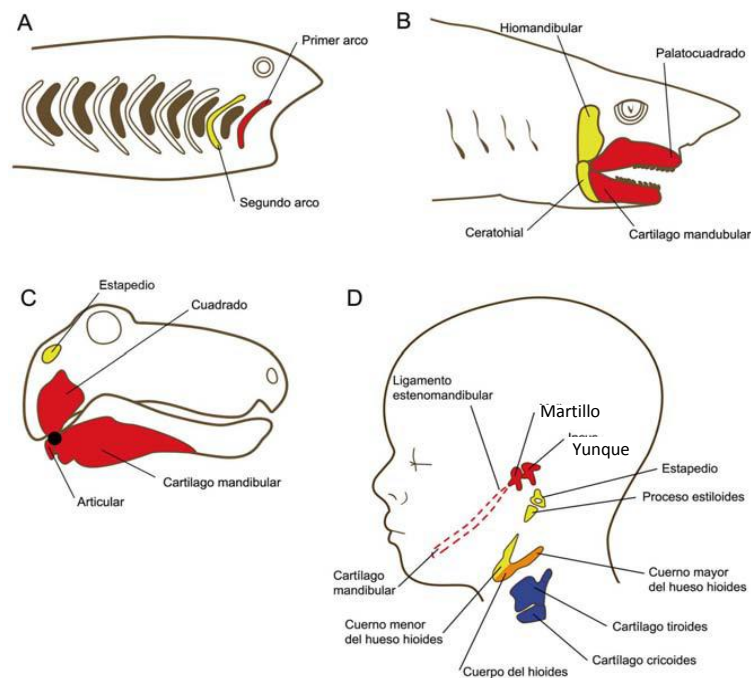


Figura 5. Correspondencia entre los huesecillos martillo y yunque de nuestro oído interno (en rojo, imagen D), con los huesos de la mandíbula de un reptil ancestro de los mamíferos (imagen C), y, a través de los peces con mandíbula, con el primer arco branquial de los peces agnatos (sin mandíbula, imagen A). La estructura original habría de función cambiado (i.e., habría sido cooptada) en dos ocasiones hasta dar lugar a los huesecillos, que serían, por tanto, un ejemplo de exaptación. Fuente de la imagen: Meruane *et al.* (2012).

⁵ Grupo de vertebrados que originalmente presentaba cuatro patas y que incluye a los anfibios, reptiles, mamíferos y aves.

Además de exaptación, Gould y Vrba (1982) también acuñaron el término de nonaptación para referirse a caracteres que en un determinado momento no cumplen ninguna función, siendo subproductos de la evolución en algunos casos. Según ellos, buena parte del ADN repetitivo que tenemos en nuestros núcleos podría ser un ejemplo de nonaptación. Aunque no haré énfasis en este término en el presente trabajo, es interesante mencionarlo como ejemplo de que no todo en la evolución es producto de la selección natural, volviendo a la crítica hecha al hablar de la deriva genética. La reserva de rasgos no adaptativos constituye una importante fuente de flexibilidad para la evolución vía futuras exaptaciones (Gould y Vrba, 1982). Como viene a decir Novo en su libro (2019), y, si el genoma de plantas o animales careciera, como ocurre con las bacterias, de esa gran cantidad de ADN (provisionalmente) inútil que tiene y que es fruto de una selección natural menos eficaz que en las numerosas bacterias (y de una mayor fijación de caracteres no adaptativos por deriva genética), probablemente el planeta aún hoy sólo estaría habitado por bacterias.

Por medio de procesos de aparición de exaptaciones, singulares o encadenados, ocurren grandes transformaciones que probablemente no hubieran podido surgir por pura adaptación creciente (Gould y Vrba, 1982).

De acuerdo con Larson *et al.*, (2013), el término exaptación no ha sido ampliamente utilizado en el ámbito de la biología principalmente debido a que carece de una definición que lo distinga claramente del término adaptación (p.ej., es probable que cualquier rasgo adaptativo realizara una función distinta en algún momento de su evolución). Por tanto, desaconsejan su uso para casos de evolución guiada por procesos de selección ciega. A pesar de ello, opino que conocerlo sigue siendo relevante para entender cómo la evolución muy a menudo actúa reutilizando el material o características biológicas existentes anteriormente. Además, el término exaptación actualmente se utiliza en otros ámbitos, como en el de la historia de la tecnología, que Larson *et al.*, (2013) mencionan y en donde sí aprueban su utilización. El término exaptación tiene, por tanto, un interesante elemento de transversalidad.

3.2.5. Duplicaciones génicas

En tercer lugar, y muy relacionado con la exaptación, está el descubrimiento del papel de las duplicaciones de genes en la evolución. De acuerdo con Ohno (1970, citado en Magadum *et al.*, 2013) la duplicación génica es una fuerza evolutiva y «el único medio por el cual un nuevo gen puede surgir». Tras la duplicación, una de las copias puede seguir haciendo sus funciones y la otra puede sufrir mutaciones y perderse o realizar nuevas funciones. Alternativamente, ambas copias pueden retener parte de las funciones originales o incluso todas ellas (Magadum *et al.*, 2013). Esto queda representado en la siguiente Figura:

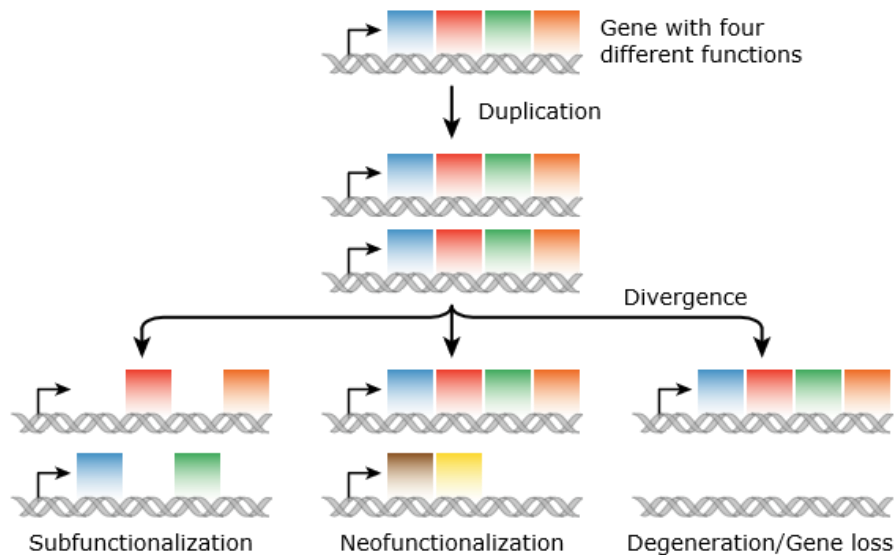


Figura 6. Representación de la duplicación de un gen y su evolución posterior. Posteriormente a la duplicación, ambas copias pueden conservar las funciones originales o puede haber una divergencia, en cuyo caso pueden pasar tres cosas: Que cada copia haga parte de las funciones originales (subfuncionalización); que una de las copias pase a hacer nuevas funciones (neofuncionalización); o que una de las copias pierda sus funciones (degeneración). Créditos de la imagen: Por Smedlib – Trabajo propio, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=60328096>

La duplicación puede afectar a genes individuales, a parte o la totalidad de un cromosoma o incluso a genomas (nucleares) completos. Duplicaciones de todo el genoma completo, han tenido lugar en el linaje de la levadura de la cerveza; en los ancestros de las angiospermas (plantas con flor); dentro de las angiospermas, probablemente en familias tan importantes como las crucíferas, las leguminosas, las asteráceas, las gramíneas y las orquidáceas; e incluso en los ancestros de los vertebrados (Ren *et al.*, 2018, ver Figura 7). Respecto a esto, sendas duplicaciones de todo el genoma ocurrieron en nuestro linaje coincidentes con el origen de los vertebrados y de los vertebrados con mandíbulas (Crow y Wagner, 2006). Esto se conoce como la hipótesis 2R (dos rondas de duplicación) y cuenta con una fuerte evidencia a favor por lo que el debate al respecto parece estar ya resuelto (Van de Peer *et al.*, 2010). Además de estas duplicaciones, una tercera duplicación de todo el genoma tuvo lugar en el origen de los peces teleósteos, que es el grupo de peces óseos (y de vertebrados) más diverso (Crow y Wagner, 2006).

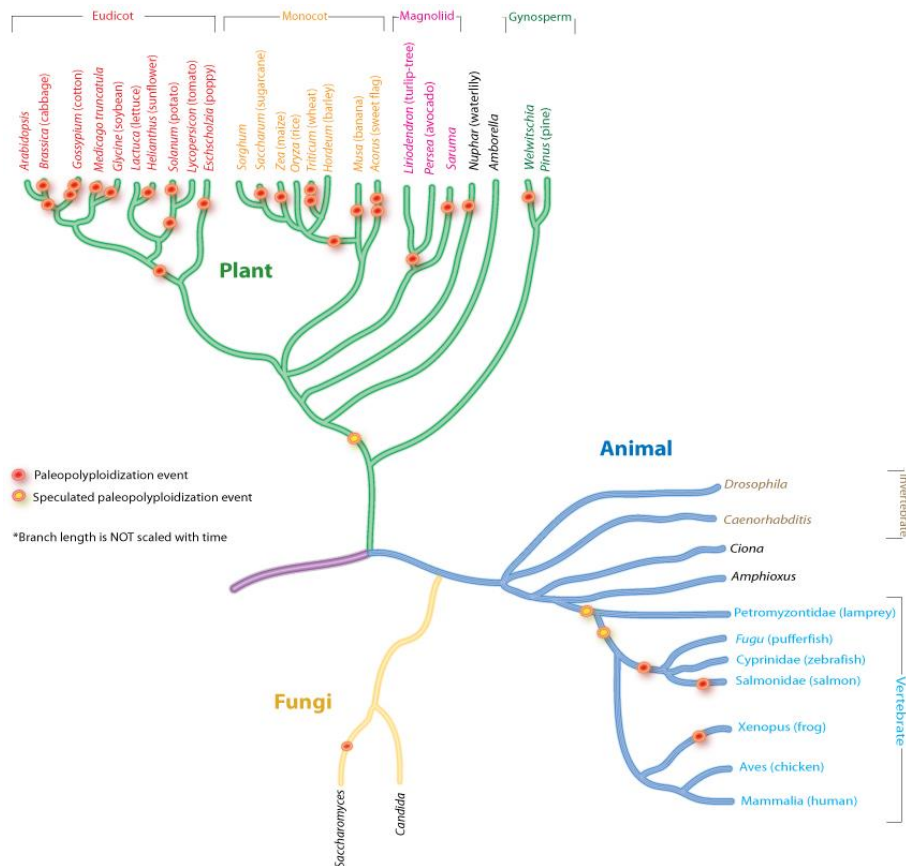


Figura 7. Eventos de antiguas poliploidizaciones (aumento del número de juegos completos de cromosomas) en el linaje de las plantas (ramas verdes), los hongos (ramas amarillas) y los animales (ramas azules). Cabe destacar la duplicación del genoma completo en el origen de las plantas con flor (angiospermas) y en el origen de los vertebrados y, más tarde, en el de los vertebrados con mandíbula, actualmente con fuerte evidencia a su favor. Créditos de la imagen: Por 5dPZ en la Wikipedia en inglés, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7501493>

Las duplicaciones completas del genoma pueden contribuir a la aparición de novedades evolutivas y a la adaptación (Moriyama y Koshiba-Takeuchi, 2018), así como a un descenso en la probabilidad de extinción, si bien no resulta claro que exista una estrecha correlación entre las duplicaciones genómicas y un aumento en la complejidad y en la diversidad de especies (Crow y Wagner, 2006). El mecanismo detrás de estas duplicaciones puede ser la autoploidía —con genomas provenientes de una única especie ancestral— o la alopoliploidía —con genomas provenientes de más de una especie ancestral— (MacKintosh y Ferrier, 2018).

3.2.6. Otras aportaciones: Transferencia horizontal de genes

Por último, a las aportaciones mencionadas en este tan amplio campo que es la evolución pueden añadirse otras muchas algo más secundarias que en este trabajo sería excesivo abordar. Sin embargo, hay una de ellas que creo que sí merece la pena mencionar y que está muy relacionada con la endosimbiosis seriada de la que se ha hablado anteriormente: Se trata de los descubrimientos que se han ido haciendo sobre la importancia de la transferencia genética horizontal, es decir, la que no se da a través de la relación progenitor-descendiente.

La transferencia genética horizontal es un fenómeno que es frecuente en procariontas y que les ha permitido adquirir rasgos como «resistencia a antibióticos, patogénesis y vías metabólicas» y «explorar nuevos hábitats», facilitando su rápida evolución (Quispe-Huamanquispe *et al.*, 2017, citando a varios autores). En cuanto a los eucariotas, también se ha

observado con frecuencia en organismos unicelulares, pero sólo recientemente se está empezando a descubrir también en pluricelulares. Así, por ejemplo, en animales invertebrados se ha encontrado genes bacterianos y fúngicos que podrían ayudarles a la síntesis de vitaminas o de carotenoides o que podrían ser útiles para la digestión de polisacáridos vegetales (Di Lelio *et al.*, 2019, citando a varios autores). En el caso de los mamíferos, se ha descubierto genes víricos implicados en la correcta formación de la placenta en diversos grupos, incluidos el de los perros, los gatos, los conejos y los humanos (Zimmer, 2009, citando a varios autores).

Al permitir adquirir nuevos genes en una sola generación, este proceso, en opinión de Boto (2010), estaría «lejos del principio gradualista y de cambio lento propuesto por los neodarwinistas». Asimismo, la importancia que se está descubriendo que tiene este mecanismo iría contra una supuesta insistencia neodarwinista en el origen endógeno y aleatorio de las variaciones (Dupré, 2009).

3.3. Refutación del diseño inteligente

Las aportaciones mencionadas opino que son importantes de cara a desmentir el creacionismo especial (i.e., de las especies), al dar posible explicación natural a grandes cambios evolutivos. Además, aportaciones como la exaptación refutarían la hipótesis del diseño inteligente pues, como dice, Claramonte (2010:52) admitirla «conlleva negar el carácter abrupto, inmediato y estanco en el surgimiento de las especies, elemento imprescindible en cualquier hipótesis creacionista». De acuerdo con Fernández y Sanjosé (2007), la idea del diseño inteligente, «que considera que los sucesos azarosos no pueden convertir el caos en órganos complejos» es una explicación aún presente en estudiantes universitarios. Dentro del diseño inteligente, el argumento de la complejidad irreducible, que viene a decir que estructuras con varias partes necesarias para su funcionamiento no podrían haber evolucionado, es refutado de forma muy ilustrativa para el caso del flagelo bacteriano en el vídeo de ajuiciado (2008), que se mencionará más adelante.

4. Análisis del currículo y libros de texto

Establecidos ya las aportaciones que se propone deben introducirse en la enseñanza de la evolución de secundaria, toca ahora examinar si, efectivamente, dichas aportaciones están ausentes en la enseñanza del tema o en qué grado y de qué forma son abordadas de estar presente. Para ello, se examinaron los contenidos de evolución del currículo de secundaria de Navarra, que establece los contenidos y criterios de evaluación mínimos a aplicar; y, después, se examinó una selección libros de texto de las asignaturas pertinentes.

4.1. Revisión del currículo

Como resumen general, en primer lugar, como se ha dicho, se examinó el currículo actual de ESO y Bachillerato de Navarra, establecido por el DF 24/2015 y 25/2015 para ESO y Bachillerato, respectivamente, para aquellas asignaturas que incluyeran una importante cantidad de contenidos relacionados con la evolución. Asimismo, dado que se hizo un análisis de los libros de textos, accedidos en su mayor parte a través de la biblioteca de la universidad, y muchos de ellos eran anteriores al currículo actual, también se revisó el currículo anterior, establecido DF 25/2007 y 49/2008 para ESO y Bachillerato, respectivamente, lo cual se esperó que daría una perspectiva del tema temporalmente más amplia.

Las principales partes de dichos currículos en relación con la evolución se muestran más adelante, en las Tablas 1, 2 y 3. Como puede observarse, se examinaron los currículos de las asignaturas de Biología y Geología de 4º de la ESO y de 1º de Bachillerato, Ciencias para el Mundo

Contemporáneo de 1º de Bachillerato (asignatura ya inexistente), Cultura Científica de 1º de Bachillerato (establecida con la última ley y currículo) y Biología de 2º de Bachillerato.

En el primer curso en que aparece una cantidad importante de contenidos relacionados con la evolución, en Biología y Geología de 4º de la ESO, se aprende resumidamente toda la evolución, empezando por los genes y sus mutaciones y terminando por las distintas teorías y mecanismos evolutivos. Se trata, por tanto, de que los alumnos acaben la etapa obligatoria con los conocimientos más completos sobre el tema. A grandes rasgos, existen pocas variaciones entre ambos currículos. Como punto destacable, en el currículo antiguo se habla de teorías actuales, el gradualismo y el equilibrio «puntuado» (interrumpido), mientras que actualmente aparece el gradualismo y el saltacionismo, añadiéndose también el neutralismo.

En Ciencias para el Mundo Contemporáneo de 1º de Bachillerato del currículo anterior se daba un repaso a las distintas teorías, desde el fijismo hasta el evolucionismo y su explicación genética en la actualidad, como ya se indica, «para que el alumno comprenda la contribución de la ciencia y la tecnología a la explicación... de... la vida».

Por su parte, en la optativa Cultura Científica de 1º de Bachillerato se da un resumen más o menos completo de la evolución (darwinismo, especiación...) y, como punto destacable, se menciona al equilibrio «puntuado» (interrumpido). Entre los criterios de evaluación del bloque en que se trata la evolución, se habla de que los alumnos conozcan los últimos avances científicos en el estudio del desarrollo de la vida, aunque no se especifica nada novedoso en concreto. Se ha omitido el análisis de la asignatura de Cultura Científica de 4º de la ESO por tratar puntos demasiado básicos para este trabajo; aunque en ella aparece también algún punto interesante, como el criterio de evaluación 1: «Diferenciar las explicaciones científicas relacionadas con... la evolución de las especies de aquellas basadas en opiniones o creencias».

Ya en Biología y Geología de 1º de Bachillerato, el currículo actual se centra en el proceso de especiación y los factores que lo favorecen, todo ello fundamental para comprender la evolución. Asimismo, se da especial importancia en relación con la biodiversidad a la especiación en islas. En el currículo anterior no había menciones explícitas a la evolución en este curso.

En Biología de 2º, por su parte, se trata el papel de las mutaciones en la evolución, ya tratados en 4º; pero, además, el currículo actual vuelve a explicar el darwinismo y el neodarwinismo, explica la genética de poblaciones y profundiza en aspectos de Biología y Geología de 1º, concretamente en los mecanismos que aumentan la diversidad y en los tipos de especiación. La repetición de contenidos a lo largo de los cursos que va añadiéndoles profundidad es la característica de los llamados currículos en espiral

Como se ha mencionado, el primer curso en tratar seriamente la evolución sería 4º de la ESO, en la asignatura no común de Biología y Geología, por lo que una parte importante de la población estudiantil abandonará el sistema educativo sin conocimientos escolares sobre la evolución a pesar de su importancia, circunstancia ya resaltada por Vázquez-Ben (2015). Esto es agravado por el hecho de que la única asignatura común de Bachillerato en la que se tratan estos contenidos, Ciencias para el Mundo Contemporáneo, ha desaparecido con la LOMCE sin ser reemplazada por ninguna otra asignatura común, como ya indica Rivas y González (2016). Sin embargo, con esta desaparición el tema de la evolución ha aumentado su peso curricular en Biología de 2º de Bachillerato y ha recuperado su presencia en 1º de Bachillerato, perdida con la ley anterior. Todo esto probablemente contribuya a solucionar el tratamiento «somero y poco ambicioso» que, según Barberá *et al.* (2011:119), se le daba anteriormente; y además dé más margen para profundizar en los temas que se sugiere introducir.

Tabla 1. Partes del currículo de Biología y Geología 4º de la ESO de 2007 y 2015 más relacionadas con la evolución y, resaltadas, con el contenido de este TFM.

Asignatura	Currículo	Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje
Biología y Geología 4º de la ESO Asignatura no común	LOE (2006) DF 25/2007	<p>Bloque 3. La evolución de la vida ...</p> <p>Origen y evolución de los seres vivos – Hipótesis sobre el origen de la vida en la Tierra. Evolución de los seres vivos: teorías fijistas y evolucionistas. – Datos que apoyan la teoría de la evolución de las especies. Reconocimiento de las principales características de fósiles representativos. Aparición y extinción de especies. – Teorías actuales de la evolución. Gradualismo y equilibrio puntuado. - Valoración de la biodiversidad como resultado del proceso evolutivo. El papel de la humanidad en la extinción de especies y sus causas. - Estudio del proceso de la evolución humana.</p>	<p>6. Conocer que los genes están constituidos por ADN y ubicados en los cromosomas. Interpretar el papel de la diversidad genética (intraespecífica e interespecífica) y las mutaciones... ...conoce el concepto molecular de gen, así como la existencia de mutaciones y sus implicaciones en la evolución y diversidad de los seres vivos.</p> <p>7. Exponer razonadamente los problemas que condujeron a enunciar la teoría de la evolución, los principios básicos de esta teoría y las controversias científicas, sociales y religiosas que suscitó. El alumnado debe conocer las controversias entre fijismo y evolucionismo y luego entre distintas teorías evolucionistas como las de Lamarck y Darwin, así como las teorías evolucionistas actuales más aceptadas. Se trata de valorar si el alumnado sabe interpretar, a la luz de la teoría de la evolución de los seres vivos, el registro paleontológico, la anatomía comparada, las semejanzas y diferencias genéticas, embriológicas y bioquímicas, la distribución biogeográfica, etc.</p> <p>8. Relacionar la evolución y la distribución de los seres vivos, destacando sus adaptaciones más importantes, con los mecanismos de selección natural que actúan sobre la variabilidad genética de cada especie.</p>	
	LOMCE (2013) DF 24/2015	<p>BLOQUE 1.–LA EVOLUCIÓN DE LA VIDA ...</p> <p>Concepto de gen. Expresión de la información genética. Código genético. Mutaciones. Relaciones con la evolución. ...</p> <p>Origen y evolución de los seres vivos. Hipótesis sobre el origen de la vida en la Tierra. Teorías de la evolución. El hecho y los mecanismos de la evolución. La evolución humana: proceso de hominización.</p>	<p>...</p> <p>7. Comprender cómo se expresa la información genética, utilizando el código genético.</p> <p>8. Valorar el papel de las mutaciones en la diversidad genética, comprendiendo la relación entre mutación y evolución. ...</p> <p>16. Conocer las pruebas de la evolución. Comparar lamarckismo, darwinismo y neodarwinismo.</p> <p>17. Comprender los mecanismos de la evolución destacando la importancia de la mutación y la selección. Analizar el debate entre los partidarios del gradualismo, el saltacionismo y el neutralismo.</p> <p>18. Interpretar árboles filogenéticos, incluyendo el humano.</p> <p>19. Describir la hominización.</p>	<p>...</p> <p>7.1. Ilustra los mecanismos de la expresión genética por medio del código genético.</p> <p>8.1. Reconoce en qué consisten las mutaciones y sus tipos, y conoce algunos ejemplos de mutaciones concretas con los efectos que producen. ...</p> <p>16.1. Distingue las características diferenciadoras entre lamarckismo, darwinismo y neodarwinismo.</p> <p>17.1. Establece la relación entre variabilidad genética, adaptación y selección natural.</p> <p>17.2. Analiza los argumentos a favor y en contra de las distintas teorías que existen sobre la evolución.</p> <p>18.1. Interpreta árboles filogenéticos.</p> <p>19.1. Conoce las fases de la hominización.</p>

Tabla 2. Partes del currículo de 1º de Bachillerato de 2008 y 2015 más relacionadas con la evolución y, resaltadas, con el contenido de este TFM.

Asignatura	Currículo	Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje
Biología y Geología 1º de Bachillerato Asignatura de la modalidad de Ciencias y Tecnología	LOE (2006) DF 49/2008	-	-	-
	LOMCE (2013) DF 25/2015	BLOQUE 4.–LA BIODIVERSIDAD ... Factores que influyen en la distribución de los seres vivos: geológicos y biológicos. La conservación de la biodiversidad. El factor antrópico en la conservación de la biodiversidad.	... 9. Relacionar la biodiversidad con el proceso evolutivo. 10. <u>Describir el proceso de especiación y enumerar los factores que lo condicionan.</u> ... 12. Conocer la importancia de las islas como lugares que favorecen la biodiversidad y contribuyen a la evolución de las especies. 9.1. Relaciona la biodiversidad con el proceso de formación de especies mediante cambios evolutivos. 9.2. Identifica el proceso de selección natural y la variabilidad individual como factores clave en el aumento de biodiversidad. 10.1. <u>Enumera las fases de la especiación.</u> 10.2. Conoce y explica los factores que favorecen la especiación. 12.1. Enumera factores que favorecen la especiación en islas. ...
Ciencias para el Mundo Contemporáneo 1º de Bachillerato Asignatura común	LOE (2006) DF 49/2008	2. Nuestro lugar en el Universo ... – E l origen de la vida...: principales hipótesis. – Del fijismo al evolucionismo. La selección natural darwiniana y su explicación genética actual. – De los homínidos fósiles al <i>Homo sapiens</i> . Los cambios genéticos condicionantes de la especificidad humana	4. Valorar la contribución de la ciencia y la tecnología... Se pretende conocer si el alumnado ha comprendido la contribución de la ciencia y la tecnología a la explicación... de... la vida, ...nuestro origen...	
Cultura Científica 1º de Bachillerato Asignatura «específica»	LOMCE (2013) DF 25/2015	BLOQUE 2.–LA TIERRA Y LA VIDA ... <u>El origen de la vida: principales hipótesis.</u> La evolución biológica. Darwinismo. Variabilidad. Presión de la selección natural y la adaptación. <u>Especiación.</u> Pruebas de la evolución. Origen y evolución de la especie humana. Evolución de los homínidos. <u>Neodarwinismo. Equilibrio puntuado.</u>	... 5. Establecer las pruebas que apoyan la teoría de la selección natural de Darwin y utilizarla para explicar la evolución de los seres vivos en la Tierra. 6. Reconocer la evolución desde los primeros homínidos hasta el hombre actual y establecer las adaptaciones que nos han hecho evolucionar. 7. Conocer los últimos avances científicos en el estudio de la vida en la Tierra.	... 5.1. Describe las pruebas biológicas, paleontológicas y moleculares que apoyan la teoría de la evolución de las especies. 5.2. Enfrenta las teorías de Darwin y Lamarck para explicar la selección natural. 6.1. Establece las diferentes etapas evolutivas de los homínidos hasta llegar al <i>Homo sapiens</i> , estableciendo sus características fundamentales, tales como capacidad craneal y altura. 6.2. Valora de forma crítica, las informaciones asociadas al universo, la Tierra y al origen de las especies, distinguiendo entre información científica real, opinión e ideología. 7.1. Describe las últimas investigaciones científicas en torno al conocimiento del origen y desarrollo de la vida en la Tierra

Tabla 3. Partes del currículo de Biología de 2º de Bachillerato de 2008 y 2015 más relacionadas con la evolución y, resaltadas, con el contenido de este TFM.

Asignatura	Currículo	Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje
<p style="text-align: center;">Biología</p> <p style="text-align: center;">2º de Bachillerato</p> <p>Asignatura de la modalidad</p>	<p>LOE (2006)</p> <p>DF 49/2008</p>	<p>3. La herencia. Genética molecular</p> <p>...</p> <p>Alteraciones en la información genética; las mutaciones. Los agentes mutagénicos.</p> <p>Mutaciones y cáncer. Implicaciones de las mutaciones en la evolución y aparición de nuevas especies.</p>	<p>...Explicar el papel del ADN como portador de la información genética y relacionarla con... su importancia en el avance de la genética, las mutaciones y su repercusión en la variabilidad de los seres vivos, en la evolución y en la salud de las personas.</p> <p>...Además ha de poder describir el concepto de mutación génica, sus causas y su trascendental influencia en la diversidad y en la evolución de los seres vivos, valorando los riesgos que implican algunos agentes mutagénicos</p>	
	<p>LOMCE (2013)</p> <p>DF 25/2015</p>	<p>BLOQUE 3.–GENÉTICA Y EVOLUCIÓN</p> <p>...</p> <p>Las mutaciones. Tipos. Los agentes mutagénicos.</p> <p>...</p> <p>Evidencias del proceso evolutivo.</p> <p>Darwinismo y neodarwinismo: la teoría sintética de la evolución.</p> <p>La selección natural. Principios. Mutación, recombinación y adaptación.</p> <p>Evolución y biodiversidad.</p>	<p>...</p> <p>6. Definir el concepto de mutación distinguiendo los principales tipos y agentes mutagénicos.</p> <p>...</p> <p>11. Diferenciar distintas evidencias del proceso evolutivo.</p> <p>12. Reconocer, diferenciar y distinguir los principios de la teoría darwinista y neodarwinista.</p> <p>13. Relacionar genotipo y frecuencias génicas con la genética de poblaciones y su influencia en la evolución.</p> <p>14. Reconocer la importancia de la mutación y la recombinación.</p> <p>15. Analizar los factores que incrementan la biodiversidad y su influencia en el proceso de especiación.</p>	<p>...</p> <p>6.1. Describe el concepto de mutación estableciendo su relación con los fallos en la transmisión de la información genética.</p> <p>6.2. Clasifica las mutaciones identificando los agentes mutagénicos más frecuentes.</p> <p>...</p> <p>11.1. Argumenta distintas evidencias que demuestran el hecho evolutivo.</p> <p>12.1. Identifica los principios de la teoría darwinista y neodarwinista, comparando sus diferencias.</p> <p>13.1. Distingue los factores que influyen en las frecuencias génicas.</p> <p>13.2. Comprende y aplica modelos de estudio de las frecuencias génicas en la investigación y en modelos teóricos.</p> <p>14.1. Ilustra la relación entre mutación y recombinación, el aumento de la diversidad y su influencia en la evolución de los seres vivos.</p> <p>15.1. Distingue <u>tipos de especiación</u>, identificando los <u>factores que posibilitan la segregación de una especie original en dos especies diferentes.</u></p>

4.2. Revisión de libros de texto

Tras el análisis del currículo, se decidió estudiar también el tratamiento de las aportaciones a la evolución revisadas en este TFM dentro de los libros de texto de las asignaturas mostradas de los currículos. Para ello, se tomó una muestra de libros de texto a revisar, que es la que se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 4. Libros de texto analizados. Se muestra en gris aquellos que, por su fecha de publicación, seguían el anterior currículo para la ESO y Bachillerato (DF 25/2007 y 49/2008 respectivamente). A cada libro se le ha asignado un código para su posterior comentario.

Editorial	ISBN	Año	Código	Editorial	ISBN	Año	Código
Biología y Geología - 4º de la ESO				Biología - 2º Bachillerato			
Santillana	978-84-680-0028-2	2011	sa4º11	Akal	978-84-460-2625-9	2009	ak2º09
Bruño	978-84-696-1310-8	2016	br4º16	Anaya	978-84-667-8257-9	2009	an2º09
Edelvives	978-84-140-0304-6	2016	ede4º16	Bruño	978-84-216-6443-8	2009	br2º09
SM	978-84-675-8697-8	2016	sm4º16	Editex	978-84-9771-545-4	2009	edi2º09
Biología y Geología - 1º de Bachillerato				Everest	978-84-241-9094-1	2009	ev2º09
Editex	978-84-9771-409-9	2008	edi1º08	McGraw-Hill	978-84-481-6708-0	2009	mc2º09
Bruño	978-84-216-7417-8	2015	br1º15	Oxford	978-84-673-5055-5	2009	ox2º09
Edelvives	978-84-263-9958-8	2015	ede1º15	Santillana	978-84-294-0979-6	2009	sa2º09
SM	978-84-675-7652-8	2015	sm1º15	SM	978-84-675-3471-9	2009	sm2º09
Ciencias para el Mundo Contemporáneo 1º Bachillerato				Edelvives	978-84-140-0336-7	2016	ede2º16
Editex	978-84-9771-391-7	2008	ediCMC09	Santillana	978-84-680-3314-3	2016	sa2º16
Cultura Científica - 1º de Bachillerato							
Bruño	978-84-696-0936-1	2015	brCC1º15				
Santillana	978-84-680-1186-8	2015	saCC1º15				

A continuación, se muestra el tratamiento que se da en los libros de texto revisados a los temas tratados en el presente TFM:

4.2.1. Deriva genética

Respecto a la deriva genética, a ella se refiere, en primer lugar, el libro que he llamado por el código sm4º16 (ver Tabla 4), dentro de una subsección que habla de la teoría del neutralismo, como el aumento o disminución de determinados alelos debida exclusivamente al azar.

En br1º15 la deriva genética se incluye entre los factores que favorecen la especiación, afirmándose que «[o]curre cuando por casualidad solo ciertos miembros de la población se reproducen y transmiten sus alelos a la generación siguiente». Además, explica el efecto fundador como ejemplo de deriva. En sm1º15, tras explicar los tipos de adaptación, aparece una pequeña subsección llamada «no todo es adaptación», en el que se explican rasgos no adaptativos (colaterales o vestigiales) y también se explica la teoría neutralista aludiendo al mantenimiento o desaparición al azar de mutaciones. En ede1º15 no parece haber nada de esto.

En saCC1º15 la deriva genética se explica de forma poco comprensible en una subsección sobre el ritmo de la evolución diciendo que en una pequeña población aislada «[l]as mutaciones que se produzcan, si no son perjudiciales, se propagaran con eficacia, deriva genética, debido al pequeño número de individuos».

En sa2º09, sm2º09, ede2º16 y sa2º16 se explica la deriva genética, dentro de la genética de poblaciones, como uno de los cuatro factores que alteran la frecuencia de los alelos de la

población, junto con la mutación, la migración y la selección natural. Como los demás factores, tiene una subsección propia, pequeña o grande, en la que se explica en qué consiste el fenómeno (muestreo no representativo que se da en o especialmente en poblaciones pequeñas) y explicando también en algunos casos (sa2º09, sm2º09, y sa2º16) el efecto fundador y el cuello de botella, como ejemplo o no de la deriva genética. En ede2º16 también se explica que la deriva supone una pérdida de la variabilidad genética.

4.2.2. Ritmo de la evolución y macroevolución

Respecto a la teoría de los equilibrios interrumpidos, de ella se habla ya en muchos libros; aunque en todos los casos menos dos (sm4º16 y sm1º15) se la nombra como teoría de los equilibrios puntuados, la cual considero una traducción incorrecta del término original en inglés *punctuated equilibria*. En sa4º11, br4º16, sa2º09 y sa2º16 se explica correctamente la teoría haciendo alusión (por su nombre o sin él) a los periodos de estasis y especiación. Además, br4º16 presenta a esta teoría frente al gradualismo del neodarwinismo, que no explicaría todos los cambios; y sa2º16 dice que la especiación según esta teoría se da en pequeñas subpoblaciones que han quedado aisladas en áreas reducidas (recordando por tanto a la especiación peripátrica), y que luego se han extendido. Los libros de Santillana sitúan a los equilibrios «puntuados» dentro de teorías «alternativas» al neodarwinismo (lo cual ya se ha visto que no es exacto) o de otras perspectivas sobre los cambios evolutivos, que incluyen también la simbiogénesis y la teoría neutralista.

En algunos libros se explica correctamente los equilibrios puntuados o interrumpidos, pero llamándola también saltacionismo (ede4º16 y sm1º15) o incluso «forma de saltacionismo extremo» (sm4º16). En otros libros dicen que el registro fósil justifica que la evolución se da también a saltos (brCC1º15) o que la teoría de los equilibrios «puntuados» explica que la evolución se produce a saltos, frente al gradualismo neodarwinista (sm2º09). Todo esto es incorrecto o, como poco, equívoco, como se ha explicado más arriba acerca de los equilibrios interrumpidos y el saltacionismo; y para estos casos, quizás debería hablarse mejor de gradualismo filético frente a equilibrios interrumpidos.

En saCC1º15 se explica que los periodos de especiación se dan por macromutación «que cambia muchos rasgos a la vez». Esto, en relación con lo comentado de la saltación, es incorrecto pues, como explica Stephen Jay Gould, uno de los dos autores de la teoría, «[el] equilibrio interrumpido no es una teoría de macromutación... no es una teoría de ningún proceso genético... da la bienvenida a la macromutación como fuente de iniciación de las especies... [p]ero [el] equilibrio interrumpido no requiere ni implica macromutación, ya que fue formulada como la consecuencia geológica esperada de la alopatria mayriana» (Gould, 1982:88). De acuerdo con la Wikipedia (2019), Ernst Mayr propuso dos modelos de especiación alopátrica: La dicopátrica (división en dos grandes subpoblaciones) y la peripátrica, ya explicada.

En relación con lo anterior, br4º16 y sm2º09 dicen que los cambios evolutivos rápidos de los equilibrios puntuados podrían deberse a cambios en la regulación de genes que controlan otros genes o en mutaciones en genes reguladores que controlan otros genes, relacionándolo por tanto con la evo-devo.

Aunque no aparece relacionado con los equilibrios interrumpidos, en varios libros se menciona a las especies llamadas «fósiles vivientes», que es un término no científico para designar especies vivas que han cambiado muy poco respecto a sus ancestros o parientes fósiles de hace muchos millones de años. Así, por ejemplo, al final de la sección sobre las pruebas de la evolución ede4º16 explica el término y pone ejemplos como el ginkgo, el celacanto o el cangrejo

herradura (también conocido como cangrejo cacerola). Por su parte, sm4¹⁶ define el término y pone el ejemplo del cangrejo cacerola en un cuadro de información aparte en la misma página que los equilibrios interrumpidos, pero no relaciona ambos temas explícitamente. Por último, hablando de los tipos de selección natural dentro de la genética de poblaciones, edi2⁰⁹ y sm2⁰⁹ dicen al para acabar de explicar de la selección estabilizadora (la que favorece fenotipos intermedios) que esta ha sido responsable de los fósiles vivientes. Como hemos comentado, la selección estabilizadora es una posible explicación a los periodos de estasis que describe los equilibrios interrumpidos. Además, sm2⁰⁹ comenta al pie de una imagen de la sección de «límites del neodarwinismo» que los fósiles vivientes plantean serios interrogantes sobre los mecanismos evolutivos. Ambos libros mencionan como fósiles vivientes al ginkgo y al nautilo.

Respecto a la macroevolución y la microevolución, sa2¹⁶ la definen brevemente; y sm2⁰⁹, además, afirma que el neodarwinismo no explica bien la macroevolución y menciona la aparición de las alas emplumadas durante la evolución de las aves a partir de los reptiles como un cambio fenotípico grande ocurrido en un tiempo relativamente corto, todo ello en una subsección llamada «límites del neodarwinismo». El cambio de las plumas de las aves que les hizo ser aptas para el vuelo es un ejemplo clásico de exaptación; aunque no está claro que el libro se refiera a eso y no a algún tipo de saltación u otro fenómeno.

4.2.3. Evo-devo

Respecto a la evo-devo, la única mención por su nombre reseñable que he encontrado ha sido en sm1¹⁵, donde se le dedica una subsección completa de media página llamada «Evo-devo: ¿el nuevo paradigma?». En esta subsección se explica la información básica que creo más relevante de este tema: Que el número de genes que determinan el diseño corporal es escaso y se recurre a ellos reiteradamente («caja de herramientas genética»); que frecuentemente son los mismos o muy parecidos entre organismos muy distintos; y que cambios en estos genes están detrás del origen de grandes grupos y del surgimiento de la novedad. Esta subsección se encuentra justo después de otra, algo más corta, dedicada al «saltacionismo» (equilibrios interrumpidos) frente al gradualismo, que a su vez está después de una página entera dedicada al neodarwinismo. Al final de la subsección se indica correctamente que «[I]a evo-devo, como los equilibrios interrumpidos, no refuta en modo alguno el neodarwinismo, sino que lo completa en el marco de una teoría evolutiva mucho más comprensiva». Como ejemplo, en el margen de la página se habla de un gen único que controla el número de alas de la mosca.

Aparte de esto, edi1⁰⁸, que de acuerdo el currículo de entonces no tiene ningún tema dedicado a la evolución, hace referencia a cambios en genes que controlan la forma, tanto por mutación como por duplicación, como posibles responsables de eventos como la explosión Cámbrica; y nombra como ejemplo a los genes Hox. Esta información se encuentra al inicio del tema «Biodiversidad y nutrición animal» en la sección 2, «Evolución de los animales».

4.2.4. Exaptación

En relación con el mencionado ejemplo de las alas de las aves, en un ejercicio de final del tema 12 «Historia de la vida y de la Tierra» de sm1¹⁵ se habla del dinosaurio emplumado con apariencia de tener cuatro alas *Anchiornis*. Además, se explica que entre los dinosaurios emplumados algunos poseían plumas no aptas para el vuelo, preguntando a continuación qué función podían tener. En este mismo libro, pero al final del tema 7 «La nutrición en animales I: respiración y digestión», en una página de información adicional sobre anatomía comparada, analogías y homologías, se dice que los pulmones son homólogos respecto a la vejiga natatoria de los peces y los huesecillos de nuestro oído interno son homólogos respecto a los arcos branquiales de los peces. Sin embargo, esto no se relaciona con la exaptación.

Diversos libros de texto hablan de órganos homólogos (i.e., que comparten el mismo origen, pero no necesariamente la misma función), órganos vestigiales (i.e., que ya no conservan su función original) e incluso otros rasgos no adaptativos (ver sm1º15). Estos conceptos, sobre todo el de homología, están estrechamente relacionados con el concepto de exaptación, pues evidencian que las estructuras biológicas no tienen por qué desempeñar actualmente la función que desempeñaban originalmente. Los órganos vestigiales y otros rasgos no adaptativos, al ser muchas veces útiles, estarían más bien relacionados con el concepto de neofunción. Como vemos, la exaptación es un término muy relevante en el ámbito de la evolución biológica.

4.2.5. Duplicación génica

Respecto a las duplicaciones, en ak2º09 en el tema de las mutaciones habla de que duplicaciones en un gen pueden hacer que la copia adicional disponible acumule mutaciones hasta llegar a tener una función distinta. También de que dichas mutaciones pueden afectar tanto a su secuencia codificadora como a la secuencia que regula su expresión, alterando la expresión del gen tanto en el espacio como en el tiempo. Por su parte, ox2º09 habla de la importancia de las mutaciones cromosómicas, poniendo como ejemplo que «parece demostrado que la duplicación y posterior mutación de fragmentos cromosómicos han hecho posible la aparición de las diversas cadenas de hemoglobinas (α , β , δ y γ), y de la mioglobina humana... a partir de una única globina ancestral» (p.322).

Respecto a las duplicaciones de todo el genoma, brCC1º15, ox2º09 afirman que la poliploidía favorece la especiación o la evolución; ev2º09 dice que es poco frecuente en animales pero que ha jugado un papel importante en la evolución de las plantas, siendo poliploides muchas angiospermas; y ev2º09 y ox2º09, además, que el ser humano utiliza muchas plantas poliploides porque habitualmente tienen los órganos más desarrollados que las diploides. Asimismo, edi2º09 habla de que la mayor parte de los vegetales han evolucionado por mutaciones numéricas (alteración del número de cromosomas). Por su parte, sa2º09 pone la poliploidía como un ejemplo de especiación cuántica (casi instantánea, *sic*). En la edición posterior del libro, sa2º16, habla de la especiación cuántica, «saltacionista» o instantánea como la que se da en una sola generación. Este libro reconoce como excepcional puesto que contradirían el gradualismo de la teoría sintética; y dice que los casos más estudiados son los de mutaciones genómicas, especialmente poliploidías (alo y auto), relativamente comunes en plantas.

Algunos libros, de 2º, como an2º09, y ede2º16, hablan de duplicaciones y poliploidías al explicar las mutaciones cromosómicas y genómicas respectivamente; pero, aunque esta información se encuentra en el mismo tema que la evolución, no relacionan ambas cosas.

4.2.6. Otros temas

El diseño inteligente se menciona como una versión moderna del creacionismo en br1º15, brCC1º15. Asimismo, en el libro ediCMC09 de la asignatura ya inexistente de Ciencias para el Mundo Contemporáneo, se profundiza más, pues se habla del creacionismo, el diseño inteligente, de que algunas personas utilizan la evolución para justificar el ateísmo y materialismo y que entre los cristianos lo más general es creer en la evolución del cuerpo, pero decir que el alma ha sido creada directamente por Dios.

En sa4º11, dentro de la sección «Otras perspectivas teóricas sobre los cambios evolutivos» se explica en qué consiste la transferencia génica (o genética) horizontal, para después pasar a explicar la teoría de la simbiogénesis. Respecto a esto último, la teoría de la simbiogénesis se afirma que sostiene que la asociación entre organismos es el motor evolutivo. En este mismo sentido o similar, que no es equivalente a la teoría de las endosimbiosis seriada, la exponen

también ede4º16 y sa2º09. Por otra parte, en br4º16, brCC1º15, saCC1º15, an2º09, mc2º09 y ox2º09, se habla, en temas como el dedicados al origen de la vida (los de Cultura Científica) o el dedicado a la célula (los demás), de la teoría de la endosimbiosis o endosimbiosis seriada (sólo brCC1º15), explicando el origen de las células eucariotas, las mitocondrias y cloroplastos a partir de células procariotas. Asimismo, ede2º16 lo explica hablando del proceso (que no teoría) de la endosimbiosis. De estos libros, br4º16, brCC1º15 y an2º09 incluyen en la teoría, sin hacer matizaciones al respecto (al contrario que mc2º09), a otros orgánulos como cilios y flagelos, que habrían surgido de la simbiosis con espiroquetas. Actualmente el origen endosimbiótico de las mitocondrias y los cloroplastos está ampliamente aceptado; sin embargo, no se ha encontrado ninguna relación directa entre cilios y flagelos y espiroquetas (Keeling, 2014); y, en general, su origen endosimbiótico no ha podido ser probado (Archibald, 2015). Si bien éste no es el tema central de este TFM, se trata de un error que he detectado y opino se debería corregir.

Además de todo esto, y en relación con ejemplos que se utilizarán para las sesiones diseñadas durante la exposición llevada a cabo en clase, ede4º16, ede1º15 y sm1º15 muestran al *Acanthostega* (y en algún caso también al *Tiktaalik*) como fósiles de transición, explicitando o no que esta transición es entre los peces y los anfibios (o los peces y los demás vertebrados). Asimismo, sm1º15 afirma que las aves vienen de los dinosaurios y los mamíferos de los reptiles en el tema en el que se estudian las distintas eras y periodos geológicos de la Tierra. Aparte de esto, br1º15, ede1º15 y probablemente otros, dice que las esponjas son los animales más simples (br1º15) o más primitivos (ede1º15) en el tema sobre la clasificación de los animales.

4.3. Valoración de los currículos y libros revisados

Los currículos anterior y actual no mencionan explícitamente ninguna de las aportaciones propuestas. Para algunas de ellas esto no sería un problema, pues podrían aparecer dentro de los distintos criterios de evaluación existentes: En 4º de la ESO, en «[c]omprender los mecanismos de la evolución» podría entrar la deriva, la evo-devo, la exaptación y la duplicación génica, aunque difícilmente todas a juntas. En Biología y Geología de 1º de Bachillerato, en «[c]onocer la importancia de las islas como lugares que... contribuyen a la evolución de las especies» podría entrar la deriva. En Cultura Científica de 1º, en «[v]alora de forma crítica las informaciones asociadas al origen de las especies, distinguiendo entre información científica real, opinión e ideología» podría entrar la refutación del diseño inteligente o incluso las críticas al neodarwinismo, y en «[c]onocer los últimos avances científicos en el estudio de la vida» la evo-devo o, en menor medida, las demás aportaciones (ejemplo de la hipótesis 2R, etc.). En 2º, en «[d]efinir el concepto de mutación distinguiendo los principales tipos» y «reconocer la importancia de la mutación» podría entrar la evo-devo (mutaciones en genes controladores del desarrollo o en zonas que regulan su expresión), la duplicación génica y la exaptación; y, por supuesto, la deriva debe seguir estando en la parte de genética de poblaciones («[c]omprende y aplica modelos de estudio de las frecuencias génicas»). A pesar de todo ello, y aun contando con él a menudo comentado problema del exceso de contenidos del currículo, se echa de menos la mención explícita de la evo-devo, por ejemplo, en 4º detrás de «gradualismo, el saltacionismo y el neutralismo» o en Cultura Científica de 1º tras «Neodarwinismo. Equilibrio puntuado».

En cuanto a los libros de texto, como se puede observar, muchas de las aportaciones que se desea incluir en el currículo están más o menos representadas en al menos algunos de los libros de texto revisados; y en alguna editorial se encuentran presentes al menos desde la edición pasada, cuando estaba vigente el currículo anterior; aunque también se han encontrado algunos errores. Sólo una «aportación» no ha aparecido y es la exaptación, a pesar de sí aparecer otros conceptos relacionados. Asimismo, no se han encontrado referencias a la evo-devo o a la

duplicación génica en su relación con la evolución en ninguno de los libros de 4º examinados; y tampoco en 2º en el caso de la evo-devo, aunque la muestra de libros fue pequeña. Por otra parte, la importancia evolutiva de la deriva genética no aparece del todo bien reflejada.

El hecho de que tantas de las aportaciones mencionadas aparezcan, aunque sea de forma irregular, quizás sea una confirmación de su relevancia y actualidad. Por otro lado, el hecho de que no se haya generalizado su inclusión podría deberse a que los libros deban ceñirse en cierta medida al currículo. Algo parecido podría suceder con libros virtuales como la página web biologia-geologia.com, que incluye los equilibrios interrumpidos; o con apuntes de internet como los de la profesora Ana Molina, de los que se hablará más adelante, que explican la aparición de nuevos genes tras la duplicación génica. Parece claro que la incorporación de nuevos descubrimientos al currículo es lenta. Así, los equilibrios interrumpidos, que es una teoría formulada en los años 70, aunque se daba ya en el currículo anterior en 4º de la ESO no ha empezado aprenderse en Bachillerato de forma más generalizada hasta 2015-2016. De igual forma, la evo-devo, que comenzó en los 80, ya debería empezar a aparecer sistemáticamente en los libros u otros materiales de referencia vayan a utilizarse en el futuro próximo.

Respecto a los errores, la confusión entre saltación y equilibrios interrumpidos podría estar en el mismo currículo, en el que se ha pasado del contenido «[t]eorías actuales de la evolución. Gradualismo y equilibrio puntuado» del currículo de 2007 al criterio de evaluación «Analizar el debate entre los partidarios del gradualismo, el saltacionismo y el neutralismo». En mi opinión, el significado exacto de saltación no es claro y todavía parece haber bastante discusión científica en torno a su importancia en la evolución y la profundidad de los cambios fenotípicos que suponen los casos de saltación. Por la literatura estudiada, además, parece que tras fenómenos de saltación sería necesario un periodo de modificación y adaptación de las novedades evolutivas aparecidas, no pareciendo que se dé la aparición de una nueva especie en su forma bien establecida «final» instantáneamente, como una persona no experta en el tema podría imaginar. Por todo ello, quizás sería conveniente abandonar el término y dejar la explicación de grandes cambios evolutivos para los hipotéticos futuros puntos dedicados a la evo-devo, la exaptación y la duplicación génica. Por otro lado, debería conservarse la especiación cuántica como forma de especiación en 2º de Bachillerato, aunque debe tenerse en cuenta que la aparición de una especie por aislamiento reproductivo instantáneo o muy rápido no implica necesariamente que la nueva especie tenga rasgos enormemente distintos a los de la antigua, condición normal para hablar de saltación; ni un gran cambio fenotípico implica necesariamente especiación instantánea (ver Tattersall, 2002 y Theißen, 2009).

Aparte de todo esto, cabría preguntarse qué cantidad de los libros de texto no sólo se asimila sino siquiera se imparte realmente en los institutos. En este sentido, algún profesor de biología de estos cursos que he llegado a conocer desconocía la teoría de los equilibrios interrumpidos, por ejemplo. Además, los libros de texto contienen grandes cantidades de información que no necesariamente se enseñan en su integridad y muchos conceptos que aparecen brevemente pueden ser pasados por alto. Por ello, las principales aportaciones de las que trata este TFM quizás deberían aparecer mencionadas en el currículo.

5. Intervención en el aula

Tras hacer un estudio preliminar del currículo y los libros de texto, se decidió poner a prueba en el aula los nuevos contenidos comentados hasta ahora y evaluar su recepción por parte de los alumnos a través de dos sesiones que incorporaran nuevas metodologías docentes. Las actividades llevadas a cabo, que se describirán a continuación, se resumen en la siguiente Tabla:

Tabla 5. Tabla resumen del conjunto de «actividades» sobre la evolución llevadas a cabo a lo largo de dos pares de sesiones en sendas dos clases de 1º de Bachillerato del centro en que se realizaron las prácticas del máster. Tabla basada en la «Ficha para la planificación de una sesión invertida» del curso de 2018 sobre el aprendizaje invertido impartido por David González Gómez y Jin Su Jeong para el Grupo 9 de Universidades.

Tabla de planificación de las sesiones de evolución impartidas					
Tema		Evolución biológica: Nuevas aportaciones			
Curso	1º de Bach.	Contenidos clave:	Neodarwinismo, Errores del neodarwinismo, Deriva genética, Evo-devo, Exaptación, Duplicación génica, Ideas alternativas		
Trabajo en el aula	Duración	Actividad	Objetivo	Competencia trabajada	Evaluación / Seguimiento
Primera sesión	20 min	Comienzo de la clase y cuestionario inicial	Conocer las ideas alternativas y los conocimientos de partida de los alumnos. Hacerles reflexionar sobre lo que saben y mejorar su predisposición a aprender	-	Evaluación de los resultados del cuestionario
	16 min	Exposición magistral	Transmitir contenidos	-	Preguntas acerca del darwinismo para aumentar la atención y la participación
	14 min	Estructura cooperativa simple «folio giratorio»	Repasar cooperativamente lo aprendido	Aprender a aprender Competencias sociales y cívicas Comunicación lingüística	Seguimiento durante la realización Evaluación de las respuestas individuales
	5 min	Explicaciones acerca del vídeo-cuestionario de tarea	Enseñar cómo acceder, introducir el nombre y hacer el vídeo-cuestionario	-	-
Trabajo en casa	Duración	Actividad	Objetivo	Competencia trabajada	Evaluación/Seguimiento
Vídeo-cuestionario	10-30 min	Vídeo-cuestionario refutando el diseño inteligente en el flagelo bacteriano	Profundizar en el proceso evolutivo. Refutar la idea de diseño en la evolución Repasar los siguientes conceptos: Exaptación, duplicación génica y homología	Aprender a aprender Competencia digital	Evaluación de la respuesta a las preguntas Retroalimentación final
Trabajo en el aula	Duración	Actividad	Objetivo	Competencia trabajada	Evaluación / Seguimiento
Segunda sesión	35 min	Comienzo de la clase y juego-simulación sobre la selección natural y la deriva genética	Comprender el funcionamiento de la deriva genética y de la selección natural	Competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología Competencias sociales y cívicas	Proyección de las gráficas realizadas con los datos obtenidos por cada grupo Fotografiado de las gráficas realizadas manualmente.
	5 min	Explicación de los gráficos proyectados obtenidos a partir de los datos grupales	Visualizar y entender la deriva y la selección natural a partir de los datos de los alumnos participantes	-	-
	15 min	Cuestionario final	Conocer las ideas alternativas y los conocimientos de los alumnos y cómo han cambiado tras las sesiones	-	Evaluación de los resultados del cuestionario
Resultados de aprendizaje a alcanzar					
Tener una visión más actualizada y correcta del mecanismo e historia evolutivos					

Las sesiones planeadas se llevaron a cabo en un centro de secundaria en el contexto de la realización de las prácticas de profesorado específicas de la especialidad de Biología y Geología (asignatura *Prácticum II*). Para ello, a pesar de realizar mis prácticas en 2º y 3º de la ESO, cursos en los que enseñaba mi tutor de prácticas del centro, por cortesía del profesor de Biología y Geología de 1º de Bachillerato dispuse de dos sesiones completas de esa asignatura en las dos clases que tenía para ello el centro durante el presente curso académico (dos sesiones en cada una). Se trataba de las últimas dos sesiones antes de las vacaciones de Semana Santa, pensadas para hacer algo distinto; aunque la presencia de algún examen de otra asignatura esos días pudo influir en el ánimo de los alumnos. Las sesiones tuvieron lugar el lunes y el martes en una clase y el lunes y el miércoles, último día antes de vacaciones, en la otra. El número total de alumnos de ambas clases fue de 51 (23 y 28), si bien no todos participaron en ambas sesiones, concentrándose las faltas de asistencia en la segunda sesión de una de las clases, por causa de un torneo deportivo.

El centro es un colegio concertado católico de Pamplona del Segundo Ensanche. En este colegio la utilización de tecnologías de información y la comunicación (TIC), tales como los *iPad* y los ordenadores portátiles para hacer trabajos o las gafas de realidad virtual para otras actividades, así como otras innovaciones para la enseñanza, como la aplicación de estructuras cooperativas tanto simples y como complejas (p.ej., aprendizaje basado en proyectos), es habitual en secundaria desde hace unos años, especialmente en la ESO. Por tanto, los alumnos participantes en las sesiones preparadas deberían de estar familiarizados con esta clase de metodologías. En el centro, los contenidos curriculares de ciencias se distribuyen con cierta libertad siguiendo criterios propios entre los distintos cursos de cada etapa (ESO o Bachillerato), evitando repeticiones consideradas innecesarias, así como dentro de cada curso, pudiendo variar el orden de los temas.

El tema de la evolución fue impartido por el profesor poco antes de empezar mis prácticas y en torno a cinco semanas antes de llevarse a cabo las sesiones diseñadas; si bien, en el momento de impartirlas se encontraban dando el relacionado tema de la histología animal (bloque 6 del currículo, «Los animales: sus funciones y adaptaciones al medio»). A decir del profesor, en 1º de Bachillerato dieron sobre todo el darwinismo, las mutaciones y los factores que «las amplifican» (el aislamiento reproductivo, la selección, etc.), dejando para 2º de Bachillerato otros puntos como las pruebas de la evolución y, eventualmente, algo de genética de poblaciones. Por su parte, el profesor de Biología y Geología de 4º de la ESO me comunicó que para el tema de la evolución este año harían un trabajo cooperativo en el que cada grupo trabajaría una teoría histórica y su contexto histórico (quién la formuló y qué se pensaba en aquella época). Temas parecidos se dieron también otros años anteriores. El material de referencia para las clases de 1º eran los apuntes de la profesora Ana Molina (s.f.), disponibles en internet, y varios libros de texto, como el de SM de 2015, ya revisado en este trabajo.

La secuenciación de las actividades propuestas se podría ajustar a un esquema que va de lo global (explicación teórica general) a lo particular (estudio en profundidad del ejemplo del flagelo bacteriano y de la simulación de la selección natural y de la deriva genética); o, quizás, de lo abstracto a lo concreto. A continuación, se explicará más detalladamente en qué consistieron las distintas actividades llevadas a cabo:

5.1. Primera sesión

5.1.1. Cuestionario inicial

Para comenzar, en la primera sesión se repartió un cuestionario en papel con 11 preguntas, algunas de ellas de tipo test dicotómicas (de escoger una opción entre dos), otras politómicas (una opción entre más de dos) y otras de respuesta larga, a completar en los primeros 15-20 minutos aproximadamente. En las preguntas de test se pidió que se indicara, además de su respuesta, el grado de seguridad de la misma en una escala Likert del 0 al 3 extraída de Zudaire (2016). Con el cuestionario, cuyas preguntas se extrajeron de diversos artículos, se pretendía detectar las ideas alternativas de los estudiantes y conocer, en general, la comprensión y el grado de aceptación de la evolución de los que partían para compararlos después con la comprensión y el grado de aceptación de la evolución con los que se irían, estudiados a partir de los resultados de otro cuestionario. Además, se esperaba que las preguntas les hicieran reflexionar y los predispusieran para una buena recepción de los contenidos impartidos a continuación. Las preguntas de las que constaba el cuestionario y las ideas alternativas abordadas en cada una de ellas se muestran en el Anexo 1. Por requerir el cuestionario que los alumnos comprendieran las preguntas y se expresasen de forma escrita podría considerarse que con él y con sus preguntas largas trabajarían la competencia en comunicación lingüística.

5.1.2. Exposición

En los siguientes 15 minutos se expusieron magistralmente los contenidos que se deseaba que conocieran con ayuda de una presentación de *PowerPoint* (Anexo 2). La exposición comenzó con una introducción acerca del interés de la evolución por su relación con la biodiversidad; a continuación, se pasó a explicar brevemente y con ejemplos los contenidos del apartado «Revisión: La evolución en la actualidad»; y después se refutaron ideas erróneas especialmente importantes que podrían tener los alumnos. De entre las concepciones equivocadas, se hizo una primera refutación del diseño inteligente y se indicó que se vería en más profundidad, junto con conceptos vistos en la exposición, en un vídeo-cuestionario mandado para hacer en casa antes de la siguiente sesión. Finalmente, se mencionó y recomendó el libro de Novo (2019) como bibliografía de referencia. Para diversas partes de la exposición, se tomaron ejemplos utilizados por Novo (2019), como que, frente al diseño inteligente, existen órganos con fallos, como el punto ciego del ojo humano (aunque una revisión bibliográfica posterior me ha indicado que no era un buen ejemplo); o que, frente a la idea de progreso, se hipotetiza que las esponjas, animales sin neuronas, podrían haberlas tenido en el pasado y haberlas perdido a lo largo de su evolución (ver Dunn *et al.*, 2015).

5.1.3. «Folio giratorio»

En los últimos 15 minutos de la primera sesión se repartió una plantilla extraída de Pujolàs y Lago (2011:64), a la que se le añadió el título indicativo «conocimientos aprendidos de evolución» (Anexo 3), para llevar a cabo la estructura cooperativa conocida como «folio giratorio»; si bien se llevó a cabo una versión modificada de dicha estructura. El «folio giratorio» empleado constó de una parte grupal y otra individual:

- En primer lugar, para la parte grupal los alumnos debían juntarse en grupos de cuatro. Dentro de cada grupo, un alumno debía escribir, en el espacio A de la plantilla, uno de los principales contenidos que hubiera aprendido en la exposición, pasándole a continuación la hoja al compañero de al lado y repitiéndose el proceso hasta que no recordaran más contenidos. Transcurridos unos minutos, se les indicó que cada grupo pasara su plantilla al grupo de al lado. En la nueva plantilla recibida debía escribirse, en el espacio B de la misma, aquellos contenidos que no tuvieran

escritos del paso previo el grupo al que pertenecía originalmente. A continuación, se volvía a pasar la plantilla a otro grupo y se repetía el proceso en el espacio C de la plantilla recibida. De esta forma se pretendía conseguir la interdependencia positiva, en este caso intra e intergrupala; la interacción simultánea; y la participación equitativa de todos los miembros de cada grupo de las que habla Pujolàs y Lago (2011).

- Finalmente, se dejaron los últimos minutos para que cada alumno escribiera de forma individual en un pedazo de folio los principales contenidos o ideas aprendidos. De esta forma se pretendía poder evaluar lo aprendido de la exposición y de los compañeros por parte de cada alumno. De ser un trabajo calificable, este último paso habría aportado en cierta medida el elemento de responsabilidad individual a la actividad.

Tanto en la parte grupal como en la individual, se recalcó a los alumnos que debían reflejar con prioridad conceptos clave frente a ejemplos concretos, pues la aparición de estos fue relativamente frecuente al principio de la actividad. Esta actividad permitiría trabajar en cierta medida las siguientes competencias básicas: Competencias sociales y cívicas, por la necesidad de los alumnos de coordinarse y comunicarse constructivamente dentro del grupo; competencia en comunicación lingüística, por requerirse comunicación e interés en la interacción con los compañeros; y competencia para aprender a aprender, porque se requería que hicieran una reflexión sobre lo que sabían y que tuvieran cierta curiosidad por aprender.

5.2. Tarea: Vídeo cuestionario sobre el diseño inteligente

Al final de la primera sesión se mandó de tarea un vídeo-cuestionario a hacer en casa antes de la sesión del día siguiente, explicándose a los alumnos las instrucciones para entrar e indicar su nombre a través del enlace que les fue facilitado a través de su profesor. El vídeo-cuestionario consistía en un vídeo de cuatro minutos y medio con explicaciones y preguntas intercaladas (Anexo 4). Las preguntas eran de respuesta corta o de tipo test politómicas (Figura 8) y debían responderlas para poder continuar el vídeo. Además, durante el visionado del vídeo se podía retroceder, pero no saltar hacia adelante hasta un punto en el que no se hubiera llegado aún.

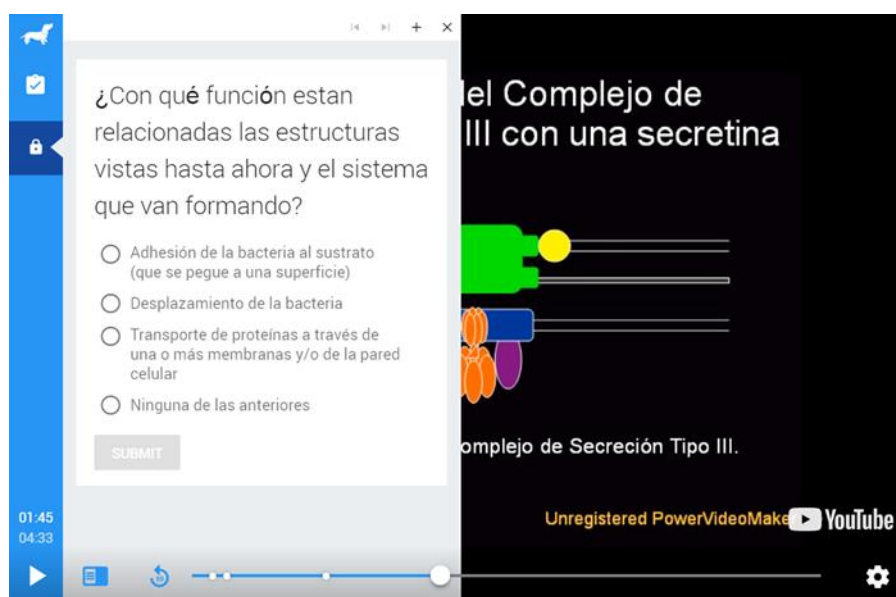
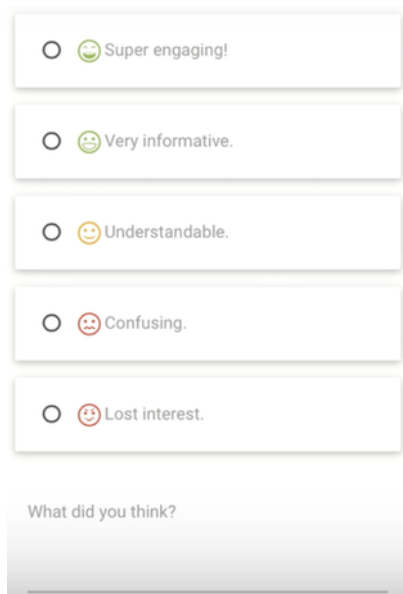


Figura 8. Ejemplo de pregunta del vídeo-cuestionario, elaborado en la plataforma PlayPosit a partir de un vídeo de YouTube (ajuiciado, 2008), que se mandó completar a los alumnos en sus casas. Para mejor visibilidad, la imagen se ha extraído de la versión moderna de PlayPosit.

Al responder a cada pregunta se indicaba si la respuesta era correcta o no y, de no serlo, se mostraba la respuesta correcta. Al final del vídeo, se pedía que valoraran la actividad del uno al cinco y aportaran su opinión de ella (retroalimentación o *feedback*; ver Figura 9).



The image shows a vertical list of five radio button options for a feedback form. Each option consists of a radio button, an emoji, and a text label. The options are: 'Super engaging!' with a green smiley face, 'Very informative.' with a green neutral face, 'Understandable.' with a yellow neutral face, 'Confusing.' with a red sad face, and 'Lost interest.' with a red sad face. Below these options is a text input field with the placeholder text 'What did you think?'.

Figura 9. Pregunta de valoración (*feedback*) que aparece al final del vídeo cuestionario realizado en PlayPosit. A esta pregunta sólo se ha conseguido acceder a través de la versión clásica de la aplicación, que permite introducir su nombre al alumno.

El vídeo-cuestionario se realizó en el entorno de aprendizaje en línea «PlayPosit» a partir de un vídeo extraído del canal de YouTube «ajuiciado» (2008). El vídeo era la traducción de otro vídeo, a su vez basado en la propuesta de Matzke (2003) sobre el origen del flagelo bacteriano. En el vídeo se refutaba con detalle el ya mencionado argumento de complejidad irreducible de la hipótesis del diseño inteligente, sirviendo a su vez para repasar los conceptos de exaptación y, en menor medida, de duplicación génica, además de otros que ya debían conocer tales como la homología. El enlace al vídeo-cuestionario, aún abierto, es el siguiente:

<https://www.playposit.com/listcode/994888/f7cf78y?classCode=1297119-815357>

Con esta actividad para casa se pretendía hacer una aproximación a la metodología de clase invertida, en la que la lección se manda para casa y el tiempo de clase se emplea en resolver problemas o hacer trabajos prácticos (González *et al.*, 2016). Como dicen los propios González *et al.* citando a O’Flaherty y Phillips (2015), «esta metodología permite a los estudiantes aprender por su cuenta... teniendo más flexibilidad para distribuir su tiempo de estudio, pero... también más responsabilidad en el proceso de aprendizaje». No obstante, la tarea no fue calificable y el tiempo disponible para hacerla (entre una y dos tardes) quizás fue algo escaso, por lo que no había garantía de que un número suficiente de alumnos la completara. Esa circunstancia, sumada al número limitado de sesiones disponibles, hicieron que se decidiera no llevar a cabo trabajos un debate o trabajo práctico en el aula en la sesión posterior al vídeo y relacionada con él. De haber sido posible, habría sido interesante debatir en clase sobre las dificultades y dudas que hubieran podido tener y su opinión acerca del diseño inteligente.

Esta actividad permitiría trabajar principalmente competencia para aprender a aprender, por exigir curiosidad o motivación por aprender (más habida cuenta del carácter no calificable de la actividad); y la competencia digital, por la necesidad de aprender a utilizar una aplicación informática probablemente nueva para ellos.

5.3. Segunda sesión

5.3.1. Simulación deriva-selección natural

En la segunda sesión, en los primeros 40 minutos aproximadamente se realizó un «juego» en el que, en grupos de cuatro, simularon un caso de deriva genética o uno de selección natural. Para ello, se leyó y explicó a los alumnos en qué consistía la simulación («Varias semillas de una especie de planta son arrastradas por el viento hasta un islote... y con esto se pretende simular la selección natural y la deriva genética» —ver Anexo 5—) y las instrucciones para llevarla a cabo. A continuación, se les indicó que se colocaran en grupos de cuatro, con una mitad, aproximadamente, de los grupos encargada de simular sendos casos de deriva genética y la otra mitad encargada de simular sendos casos de selección natural (en la que también se observaban muestreos no representativos). El material que necesitaban se hubo repartido previamente mientras comenzaba la clase para ahorrar tiempo. Dicho material consistió en dados; fichas de parchís de tres colores en sendos vasos; una bolsa donde introducir y mezclar el número de fichas que indicaran los dados en cada turno; las instrucciones escritas para la simulación de la deriva genética o de la selección natural, según correspondiera; una tabla de ejemplo con los datos de una simulación ya realizada de deriva o de selección, puestos de la forma en que se sugería se escribieran; y una tabla vacía a rellenar con los datos que obtuvieran. Todo esto se explica con mayor detalle en el Anexo 5, que se corresponde con las fotocopias repartidas a cada grupo; aunque no se les repartió las fotocopias que no perteneciesen a su simulación concreta.

Dentro de cada grupo, para hacer la actividad más ágil y cooperativa, debían repartirse los roles: Uno de ellos sería el responsable de apuntar los datos, los otros tres serían los responsables de sendos colores de fichas (Figura 10) y aquel cuya ficha hubiera sido eliminada primero sería el responsable de ir representando los datos manualmente en una gráfica o de ayudar a los demás compañeros. De esta forma se conseguiría la responsabilidad individual (con los roles) y la codependencia positiva. Además, al tener cada alumno asignado un color, se aumentaría el aspecto lúdico de la simulación que, sumada a la incertidumbre de los resultados, posiblemente aumentaría el interés. Posteriormente a las sesiones se consideró la posibilidad de haber inducido o reforzado posibles casos de problemas con el juego y ludopatía entre los alumnos, que tanta incidencia parece tener actualmente entre la población joven. Sin embargo, esta simulación no se encuentra fácilmente disponible en internet, no supone arriesgar dinero y en ella ni siquiera importa la habilidad individual, al ser completamente aleatoria. Por lo tanto, debería ser menos peligrosa que el juego de parchís de donde se tomaron las fichas; aunque, a pesar de todo lo anterior, el factor juego de azar quizás debiera tenerse en cuenta a la hora de utilizar la simulación si se conocen problemas o riesgo de problemas de juego entre el alumnado.

Conforme fueron teniendo los datos de las ocho generaciones simuladas, los fueron entregando y se fueron pasando a un *Excel* previamente preparado para que se representaran automáticamente las gráficas correspondientes, lo que permitió mostrarles, con ayuda del proyector, los fenómenos de deriva genética y selección natural comparados en varios casos. También se explicó que, si consideráramos cada simulación como lo sucedido en una isla diferente y habida cuenta de que la deriva afecta también a otros genes, podríamos acabar teniendo especies distintas en cada isla por la deriva.

La inclusión de elementos propios de juegos, como son los dados y las fichas de parchís, convierte a esta actividad en un ejemplo de ludificación.



Figura 10. Alumnos realizando la simulación de la deriva genética o de la selección natural durante la segunda sesión sobre la evolución. Se observa un alumno ocupado de tomar los datos y los demás ocupados de manejar las fichas de un color de ficha cada uno.

Esta actividad fomentaría principalmente la competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología, por la necesidad de tomar datos, respetar su veracidad y, eventualmente, representarlos en una gráfica; y las competencias sociales y cívicas, de nuevo por la necesidad de los alumnos para coordinarse y comunicarse constructivamente en grupo.

El juego o simulación se diseñó a partir de los propuestos por Lecointre *et al.* (2009:305-311), a los que se les introdujeron diversas modificaciones. Así, en lugar de haber un rasgo (el color) indicativo del linaje y otro (la forma) indicativo de una eventual diferencia en la capacidad reproductora, se escogió para ambas cosas el color. Asimismo, en vez de partir de seis colores iniciales de objetos se escogió comenzar con seis individuos de tres colores, dos de cada color; puesto que, de esta manera, se simplificaba el juego, se podía asignar un color a cada alumno y la desaparición de alelos no sería tan rápida y numerosa. El número mínimo de generaciones a observar se amplió a ocho para que se vieran casos de fijación de alelos en la simulación de la deriva; y la penalización al alelo menos apto en la simulación de la selección natural se modificó para hacerla más variable y sencilla. Asimismo, se diseñaron todos los detalles explicativos de la simulación (ilustraciones, explicación de que se trata de plantas de distintos colores de flor reproduciéndose por autofecundación en un pequeño islote, etc.) para hacer la simulación más cercana a la realidad; y los materiales escogidos, aparte de los dados, también fueron una aportación propia. Dado que se quería hablar de individuos, entidades más visibles y comprensibles para los alumnos que los alelos, y dado que habría sido muy complicado simular los cruzamientos, por la necesidad de coger al azar alelos en lugar de semillas, ingeniar un método para emparejar los alelos al azar, asignar distinta ventaja a distintas combinaciones de alelos, tirar el doble de dados y meter y sacar el doble de fichas para disponer del mismo número de plantas adultas, se dijo que los individuos se autofecundaban dando siempre a otros del mismo color. Este detalle podría hacer parecer que se trataba de distintas especies compitiendo por los mismos recursos, en lugar de individuos de la misma especie con distintos alelos. Se trata de un ejemplo de la dificultad que entraña en ocasiones conseguir a la vez sencillez y corrección científica en las transposiciones didácticas

El empleo de la mayor parte de la segunda sesión en llevar a cabo una simulación de la deriva genética y a la selección natural, aparte de deberse al deseo de poner en práctica una ludificación, se debió a la dificultad que opino puede entrañar comprender y visualizar mentalmente dichos mecanismos evolutivos, especialmente la deriva genética.

5.3.2. Cuestionario final

Finalmente, se repartió otro cuestionario (Anexo 6) que realizaron aproximadamente en los últimos 15 minutos (Figura 11). Este cuestionario, de las mismas características que el inicial abordaba las mismas ideas que el primero, aunque con distintas preguntas; y, además, pedía a los alumnos su opinión sobre estas sesiones, lo cual era necesario para tener una retroalimentación con que evaluarlas. El número de preguntas de respuesta larga fue mayor en este cuestionario que en el inicial puesto que en el inicial probablemente no habría conocimiento suficiente para responder ciertas preguntas aparte de escogiendo una opción de test; y porque, con los conocimientos transmitidos, la contestación a las preguntas largas del cuestionario final permitiría analizar más aspectos que la simple mejora entre cuestionarios, tales como ciertas ideas alternativas. El orden de las preguntas del cuestionario se aleatorizó respecto al orden de sus análogas del cuestionario inicial.



Figura 11. Alumnos realizando el cuestionario final en los últimos minutos de la segunda sesión.

6. Metodología de análisis de los resultados

Los datos obtenidos y analizados fueron las respuestas y valoraciones obtenidas en los cuestionarios, la parte individual del «folio giratorio» y el vídeo-cuestionario, cuya metodología de estudio se comentará a continuación. Todos los análisis estadísticos fueron realizados con la aplicación para el Excel UNStat4Excel (Calavia y García, 2017).

6.1. «Folio giratorio»

El estudio de las respuestas individuales de los alumnos tras el «folio giratorio» consistió en una descripción de la frecuencia de aparición de las distintas ideas correctas aprendidas. Para ello, se incluyeron las respuestas de todos los alumnos presentes en la primera sesión (50), incluidas las de tres alumnos que a ciencia cierta se perdieron total o parcialmente la exposición, pues se entendió que pudieron aprender el nombre de los conceptos clave con ayuda de sus compañeros.

6.2. Vídeo-cuestionario

Para estudiar los resultados del vídeo-cuestionario, se observó el número de alumnos que lo completaron, al menos en un grado razonable; sus respuestas, el tiempo que necesitaron y las valoraciones que hicieron de esta metodología de aprendizaje-enseñanza empleada.

6.3. Cuestionarios: Preguntas de contenidos

Dentro de los cuestionarios, en las respuestas dadas a las preguntas de contenido o comprensión (todas excepto las dos preguntas relativas a la aceptación de la evolución y el grado de compatibilidad percibida con sus creencias y la pregunta acerca de la valoración de las sesiones) se estudió, por un lado, la evolución de las respuestas a las preguntas de un cuestionario a otro; y, por otro, las distintas ideas alternativas y de otro tipo que expresaron. Para esta parte, sólo se incluyeron las respuestas de aquellos alumnos que estuvieron presentes en las dos sesiones completas (37 alumnos en total), pues se buscaba estudiar qué efecto tuvieron dichas sesiones en su totalidad. No se descontaron los alumnos que no hicieron el vídeo-cuestionario porque el número de los que lo hicieron fue muy reducido.

6.3.1. Evolución de los aciertos y fallos

Para estudiar una eventual mejoría o empeoramiento en las respuestas se siguieron los siguientes pasos: En primer lugar, se categorizaron las respuestas entre correctas (sólo una opción en las preguntas de test) e incorrectas. En segundo lugar, se emparejaron las preguntas del cuestionario inicial con sus análogas del cuestionario final. En tercer lugar, se analizaron los cambios a mejor y a peor mediante la prueba de contingencia de McNemar para dos muestras pareadas, pues se estudiaron las respuestas de los mismos alumnos a las preguntas análogas de en uno y otro cuestionario. Además de esto, dado que el vídeo-cuestionario se centraba en el diseño inteligente y la exaptación, se dividió a los alumnos entre aquellos que habían hecho el vídeo cuestionario completo y aquellos que no, incluyendo entre estos a tres que hicieron las primeras una o dos preguntas. Después, para las preguntas que trataban estos temas, se comparó la distribución de los alumnos en cuatro categorías (ambas respuestas correctas, sólo la del cuestionario inicial correcta, sólo la del cuestionario final correcta y ambas incorrectas) entre ambos grupos para estudiar los efectos de completar el vídeo-cuestionario. Asimismo, se comparó el número de alumnos de las categorías respuesta inicial correcta y respuesta inicial incorrecta entre ambos grupos para ver si los que completaron el vídeo-cuestionario partían de un conocimiento diferente que los que no. Para todo ello se realizaron análisis de bondad de ajuste que, dadas las bajas frecuencias esperadas, emplearon el método de Monte Carlo. Aparte de un eventual cambio en el número de respuestas correctas o incorrectas, se estudió también la efectividad de las sesiones analizando la seguridad de las respuestas correctas a las preguntas análogas de uno a otro cuestionario y lo mismo para las incorrectas (variables ordinales). Para ello, se realizaron diversas pruebas de inferencia estadística no paramétrica para muestras independientes en función del tamaño de las muestras y su similitud en forma y dispersión.

Las preguntas del cuestionario final se nombraron por su número precedido del número de su pregunta análoga del cuestionario inicial entre paréntesis. Para categorizar las preguntas de respuesta larga en correctas e incorrectas se siguieron los siguientes criterios:

- Pregunta 1: Se contaron como correctas aquellas respuestas en las que se diera a entender que los reptiles actuales también han evolucionado. No se contaron como correctas aquellas respuestas que afirmaban que cuando una especie nueva aparece no tiene por qué desaparecer la original o que si un organismo está bien adaptado no tiene por qué cambiar puesto que, aunque son ciertas, podrían reflejar que el alumno piensa

- que los reptiles actuales no han evolucionado desde nuestro ancestro común y; o incluso que la evolución es como una escalera que incluye los peldaños de reptil y de mamífero.
- Pregunta (1) 1: Se contaron como correctas aquellas respuestas que dijeran no estar de acuerdo explicando que cada linaje sigue su propia evolución, o, alternativamente, explicando que una mayor complejidad, desarrollo, tamaño, etc. no implican una mayor evolución. Aunque se podría discutir qué se considera más complejo, desarrollado o evolucionado, se trata de una respuesta rigurosamente cierta que rechaza la idea de progreso, ya que implica que no hay una única dirección y sentido en la evolución de la complejidad, el desarrollo, el tamaño, etc. (i.e., se puede evolucionar diferentemente o retroceder) y, posiblemente también, que distintos linajes deben de haber seguido una evolución paralela.
 - Pregunta 8: Se contaron como correctas aquellas respuestas que dijeran que las plumas originalmente servían para otras funciones (distintas del vuelo), poniendo o no diversos ejemplos.
 - Pregunta (8) 2: Se contaron como correctas aquellas respuestas que definieran la adaptación aludiendo a un cambio en la función de una estructura, proteína, sistema, órgano y/o gen, independientemente de si se indicaba un buen ejemplo, como se pedía; aunque en realidad todos los que la definieron correctamente menos uno dieron un ejemplo correcto, sobre todo el de las plumas pero también el del flagelo bacteriano del vídeo.
 - Pregunta (5) 4: En esta pregunta se fue más laxo, dado que la respuesta perfecta habría requerido al menos de dos atributos del ritmo evolutivo en cada teoría (lenta y constante frente a rápida y con periodos sin cambios); pero lo importante, para compararla con la pregunta 5 del cuestionario inicial, era principalmente comprobar el aprendizaje de la teoría de los equilibrios interrumpidos. Por tanto, se contó como correctas aquellas respuestas que explicaran dicha teoría aludiendo a periodos de evolución rápida (fase de especiación) y/o a periodos sin cambios (fase de estasis). No obstante, también se realizaron sendos análisis descontando como correctas 1. aquellas respuestas que omitieran explicar la fase de especiación; 2. las que omitieran explicar la fase de estasis; y 3. las que omitieran cualquiera de las dos.
 - Pregunta (4) 6: Se contaron como correctas aquellas respuestas que mencionaran la deriva genética, génica o incluso evolutiva (un caso), incluso en aquellos (pocos) casos en que no se explicara aludiendo al azar siempre que no dieran otra explicación incorrecta. No se contaron como correctas las (pocas) respuestas en que se hablaba de derivación genética o génica, incluso si se aludía al azar; pues se considera importante aprender el término de deriva, que evoca el movimiento sin rumbo de un objeto en el mar; aunque que esta sea una metáfora apropiada podría ser discutible. Se contó como correcta una mención a la deriva, sin añadir genética o génica, puesto que respondía correctamente aludiendo a que produce cambios al azar en la población. Tres casos en que se respondía duplicación génica, con o sin explicación, se contaron como incorrectos. El motivo es, por un lado, que se pretende comparar los resultados con la pregunta 4 del cuestionario inicial, donde no se nombra explícitamente la mutación en la respuesta correcta sino sólo el azar. Por otro lado, aunque se contara la duplicación génica como mutación, se trata de una respuesta discutible a la pregunta pues la duplicación génica más que cambiar la frecuencia de los alelos (versiones de un gen) implicaría la aparición de nuevas copias del gen e incluso en algunos casos podría implicar un fenómeno de especiación.

6.3.2. Ideas alternativas y otras ideas

Las ideas alternativas, confusiones o respuestas interesantes se comentaron dando posibles explicaciones a su aparición; pero no se estudiaron estadísticamente por no considerarse relevante para este trabajo.

6.4. Cuestionarios: Aceptación y compatibilidad con las creencias

Para estudiar el cambio en la aceptación de la evolución (preguntas idénticas 10 y (10) 9) y el grado de compatibilidad percibido con sus creencias personales (preguntas idénticas 11 y (11) 10) se ordenaron las respuestas de mayor a menor aceptación o compatibilidad de la a «a» la «e», dándoles números del 5 al 1 (variables ordinales), con la excepción de la respuesta «e» de la pregunta sobre la compatibilidad con las creencias, «No lo tengo claro, pero me interesa saber más sobre el problema», que se consideró la segunda opción con mayor compatibilidad dado que no reconocía ningún conflicto seguro. Posteriormente, estos datos se analizaron mediante métodos de inferencia estadística no paramétrica para muestras pareadas (mismos alumnos antes y después). Dado que las muestras presentaron una alta asimetría real ($|SK_2| > 1/3$), la prueba aplicada fue la prueba de signos; y dado que el tamaño muestral fue pequeño (<25 excluidos los empates) se utilizó la probabilidad exacta. En esto, por los mismos motivos expuestos anteriormente, las respuestas consideradas fueron sólo las de los 37 alumnos mencionados.

6.5. Cuestionarios: Valoración de las sesiones

Para estudiar la valoración de los alumnos, se categorizaron sus respuestas y se ordenaron de mayor a menor frecuencia de aparición. De nuevo, las respuestas contadas fueron las de los 37 alumnos mencionados pues se quería considerar la influencia de la exposición y las otras partes de la primera sesión en la valoración del conjunto de las sesiones.

6.6. Simulación deriva-selección natural

De la simulación de la deriva genética y la selección natural se comentará sencillamente los resultados obtenidos por los alumnos y reflejados después en forma de gráficas de barras.

7. Resultados de la intervención en el aula

A continuación, se muestran los resultados de las sesiones diseñadas y aplicadas al aula:

7.1. «Folio giratorio»

El folio giratorio se realizó aproximadamente en el tiempo estimado, si bien en una de las clases no se llegó a cambiar de grupo más que una vez por falta de tiempo. Salvo la deriva genética, que no se mencionó explícitamente (aunque sí se mencionó el azar como factor evolutivo) todas las principales ideas y términos importantes en relación con las aportaciones a la evolución que se explicaron, además de algunos ejemplos, fueron mencionados al menos en una ocasión. No obstante, las menciones a los temas principales no fueron generalizadas, no llegando en ningún caso al 60% de menciones (Figura 12). En esto pudo influir la cantidad y variedad de contenidos explicados y la notable escasez del tiempo disponible para esta parte de la actividad. Sea como fuere, es de esperar que, tras esta actividad, además de practicar ciertas competencias, los alumnos recuerden duraderamente al menos parte de estas ideas y términos.

Volviendo a las respuestas, la aceptación la definieron algunos y otros sólo la nombraron. En una de las hojas individuales, un alumno indicó que se perdió la exposición pero que haciendo la encuesta había aprendido mucho, aunque no está claro si se refiere al cuestionario inicial o al «folio giratorio».

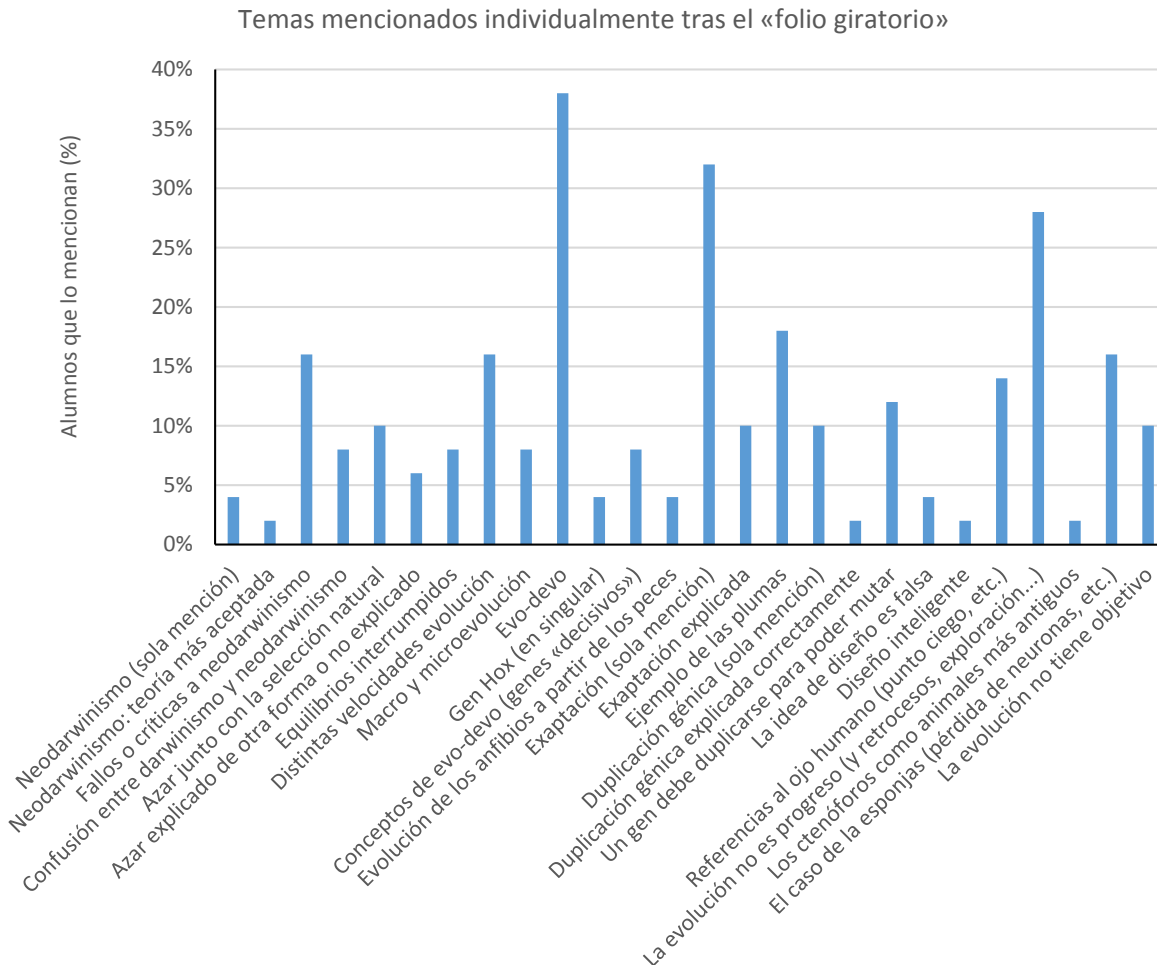


Figura 12. Ideas, términos o ejemplos mencionados por los alumnos en su folio individual tras terminar la parte grupal de la estructura cooperativa simple «folio giratorio». Cada alumno pudo mencionar más de un tema, por lo que los porcentajes no suman 100%. El número de alumnos total es 50, pues un alumno faltó a esta primera sesión y se incluyó a los tres que no asistieron a toda o parte de la exposición puesto que posiblemente aprendieron en el «folio giratorio». Las distintas ideas se presentan siguiendo el orden en el que aparecieron en la exposición.

7.2. Vídeo-cuestionario

De los 50 alumnos que participaron en la primera sesión, 21 realizaron el vídeo-cuestionario al menos parcialmente, de los cuales 15 lo realizaron completamente. Esto pudo ser favorecido, aparte de porque la actividad no era calificable y por el escaso tiempo para realizarla, a dificultades con la aplicación PlayPosit que hicieron necesario explicar y adjuntar a los alumnos unas pequeñas instrucciones para acceder a la versión antigua a través de la nueva y así poder indicar su nombre y apellidos. Por otro lado, aunque se les dijo que necesitarían entre 10 y 15 minutos para completar el vídeo-cuestionario, ya que el vídeo duraba 4:33 minutos, tardaron 16 minutos de media en hacerlo (Tabla 5). Algunos alumnos, aparte de los 21, apenas entraron en el vídeo o lo empezaron, pero después salieron sin hacerlo. Otros, que sí lo hicieron, por algún motivo accedieron dos veces. Salvo la primera y más difícil pregunta, en la que la respuesta era exaptación, el porcentaje de aciertos fue relativamente alto.

La innovación educativa que constituyó el vídeo-cuestionario de refuerzo de los contenidos de clase tuvo aparentes buenos resultados a pesar de basarse en un vídeo complicado. En efecto, las respuestas al segundo cuestionario sobre la evolución indicaron que los alumnos que vieron el vídeo retuvieron conceptos del mismo (relación de la exaptación con el flagelo

bacteriano). A esto pudo ayudar su carácter visual y algo interactivo: Entre los 13 alumnos que lo valoraron la valoración fue de «4,8» sobre un máximo de 5 (tres 4 y diez 5); y, de entre los 11 que además añadieron un comentario escrito, la valoración del vídeo fue unánimemente positiva, calificándolo como visual, muy ameno, muy completo, muy interesante, corto e interactivo, aplicación desconocida (nueva) y entretenida a la vez que presta atención, fácil de entender, enriquecedor que la evolución sea tan compleja, etc. Sin embargo, también es posible que entre los alumnos que completaron (y valoraron) el vídeo-cuestionario hubiera un sesgo hacia los alumnos más motivados o capacitados (cosa que no parece probable, como se verá más adelante), y que los que lo abandonaron prematuramente lo hicieran por la complejidad o extensión de los contenidos del vídeo.

Tabla 5. Resultados de las preguntas del vídeo-cuestionario PlayPosit completadas por los alumnos en casa y tiempo empleado para realizarlas. Las preguntas faltantes de acuerdo con la numeración eran en realidad explicaciones insertas en el vídeo. (*) Recuento contando como correctas las respuestas doble gen, duplicación genética, duplicación cromosómica, copia genética, genes duplicados y duplicación y modificación genética.

	Cuestionario completo	Cuestionario completo*	P.3	P.4	P.5	P.6	P.8	P.9	P.9*
Número de participantes	21	21	21	18	17	17	17	17	17
Puntuación promedio (%)	71,5	76,2	47,6	100	100	88,2	76,5	47,1	82,4
Desviación típica (%)	21,2	22,1	51,2	0	0	33,2	43,7	51,4	39,3
Tiempo empleado promedio (min:s)	16:00	“	1:58	0:37	0:24	0:11	0:42	1:31	“
Desviación típica (min:s)	6:23	“	2:28	0:56	0:20	0:10	0:55	1:42	“
Valoración del alumnado	4,8/5	Número de alumnos que hicieron la valoración							13

Por otro lado, mi valoración de la aplicación no fue tan positiva por una serie de aspectos técnicos que hicieron difícil su utilización: Los mencionados problemas para que los alumnos introdujeran sus nombres; la imposibilidad de acceder a la aplicación en según qué ordenadores; los problemas de manejo de los datos descargados pues, al estar en formato separado por comas, frases del enunciado quedaban separadas al dividir las columnas y los encabezados de columna se separaban; y, aunque esto es algo menor, el hecho de que la ventana de valoración apareciera a los alumnos y los datos y otras etiquetas no estuvieran traducidas al español.

7.3. Cuestionarios: Preguntas de contenidos

7.3.1. Cambios en las respuestas correctas e incorrectas

Como era de esperar en unos cuestionarios que no iban a ser calificados, el porcentaje de respuestas en las preguntas de tipo test fue alto, sólo habiendo un alumno que dejó sin responder una pregunta. Como puede observarse en la Tabla 6, el porcentaje de respuestas en los distintos distractores (opciones incorrectas) de cada pregunta fue variable, aunque las diferencias entre ellos no se analizaron estadísticamente. Antes de pasar a los análisis estadísticos, cabe mencionar los resultados de la pregunta 6 del cuestionario inicial, sin análoga en el final por motivos obvios (los equilibrios interrumpidos se nombran en la pregunta (4) 6). Dicha pregunta revela un desconocimiento bastante generalizado, aunque no total, del término equilibrios puntuados o interrumpidos. Posiblemente esto se deba a que sea estudiada bajo el término saltacionismo, pues, como se ha visto, en al menos uno de los libros de referencia utilizados en el centro este año (sm1º15) aparecen ambos términos como sinónimos. Sin embargo, el bajo porcentaje de respuestas correctas a la pregunta cinco, sobre los ritmos de la evolución, podría más bien indicar que su enseñanza se omitió.

Tabla 6. Respuestas de los alumnos a las preguntas de test dicotómicas o politómicas, acerca de contenidos teóricos. Se indica en negrita y subrayado la respuesta correcta. Precediendo al número de cada pregunta del cuestionario final se indica, entre paréntesis, el número de su análoga en el cuestionario inicial.

		Pregunta del cuestionario inicial						Pregunta del cuestionario final				
		2	3	4	5	6	7	9	(2) 3	(3) 5	(9) 7	(7) 8
Respuestas	a	<u>13,5</u>	59,5	16,2	78,4	<u>8,1</u>	43,2	35,1	2,7	67,6	<u>70,3</u>	37,8
	b	86,5	<u>40,5</u>	<u>59,5</u>	2,7	91,9	<u>54,1</u>	<u>64,9</u>	<u>24,3</u>	<u>21,6</u>	29,7	8,1
	c	0	0	24,3	<u>18,9</u>	-	2,7	-	73,0	10,8	-	<u>51,4</u>
	Vacío	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,7

Asimismo, más allá de posibles mejoras en los alumnos tras las sesiones, que se verán a continuación, es de destacar el alto porcentaje de respuestas incorrectas en las preguntas 2 y 3 y sus análogos, sobre las intuitivos pero incorrectas concepciones lamarckianas (objetivo o intencionalidad en el cambio y usos o desuso/necesidad) (Tabla 6).

El análisis estadístico de las preguntas revela una mejora muy significativa ($p < 0,01$) en la pregunta 1, relativa a la idea de progreso (Tabla 7). Esta diferencia quizás sería achacable a una posible mayor dificultad o inconcreción y al hecho de que respuestas que eran ciertas no se consideraron como correctas por no ajustarse a lo que se pretendía que se respondiera pudo disminuir la cantidad de aciertos entre el alumnado de la pregunta del cuestionario inicial. Además, en la pregunta del cuestionario final se contaron como correctas un tipo adicional de respuestas, relacionadas implícitamente con las otras. Por otro lado, la pregunta 1 del cuestionario final también era algo abierta y complicada, aunque se había aclarado en cierta medida en la exposición. Además, si examinamos los datos, vemos un número idéntico de personas respondiendo correctamente en términos de linajes que siguen una evolución paralela (excluyendo las nuevas respuestas correctas que hacen referencia a que mayor evolución no significa mayor desarrollo); y, de los cuatro alumnos que empeoraron sus respuestas, tres respondieron negativamente, lo cual es correcto, pero sin dar más explicaciones, posiblemente por falta de tiempo, y una respondió afirmativamente apoyándose por confusión en el caso de las arqueobacterias, que se comentará más adelante al hablar de las ideas alternativas.

Tabla 7. Número de alumnos según sus respuestas correctas e incorrectas en las preguntas del cuestionario inicial respecto a sus análogas del final y significación de los cambios en las categorías discordantes de acuerdo con la prueba de McNemar. Precediendo al número de cada pregunta final se indica, entre paréntesis, el número de su análoga en el cuestionario inicial. Se señala en rojo unos datos altamente dependientes del criterio de corrección. (.) Diferencia casi significativa ($p < 0,1$). (*) Diferencia significativa ($p < 0,05$). (**) Diferencia muy significativa.

Preguntas comparadas	Idea clave	Ambas r. correctas	Sólo r. inicial correcta (empeoramiento)	Sólo r. final correcta (mejoría)	Ambas r. incorrectas	Sentido del cambio general	Sig. prueba de McNemar
1 vs. (1) 1	Progreso	6	4	16	11	+	0,007**
2 vs. (2) 3	Objetivo	2	3	7	25	+	0,206
3 vs. (3) 5	S. natural	5	10	3	19	-	0,052.
4 vs. (4) 6	Deriva g.	12	10	8	7	-	0,637
5 vs. (5) 4	Eq. interr.	2	5	20	10	+	0,003**
7 vs. (7) 8	Macroev./ evo-devo	10	10	9	7	-	0,819
8 vs. (8) 2	Exaptación	7	2	9	19	+	0,035*
9 vs. (9) 7	Diseño int.	16	8	10	3	+	0,637

Las respuestas a la pregunta 3, dirigida a contraponer las ideas lamarckianas frente a las darwinistas, empeoraron de forma casi significativa ($p < 0,1$). Analizando los datos, que se muestran en la Tabla 6, vemos una reducción a casi la mitad de la explicación darwinista pero menos de la mitad de ese cambio se debería al ascenso de las ideas lamarckianas. La explicación estaría en el aumento del 10,8% de la explicación referida a agentes mutágenos externos frente al 0% inicial de estas respuestas. Posiblemente este aumento se daba a que esos cuatro alumnos no interpretaron correctamente en qué consistían las mutaciones en genes clave del desarrollo y las duplicaciones génicas explicadas en la exposición; o que, por el contexto, algunos habrían pensado que esa era la respuesta que se esperaba. La significación del aumento de las explicaciones lamarckianas no se ha estudiado. Cabe recordar que en la exposición se explicó brevemente la teoría de Darwin y se desmintieron ideas lamarckianas; y en la simulación se trabajó la selección natural por mayor capacidad de reproducción, aunque esto en mayor medida en aquellos grupos encargados de la selección natural (los otros sólo escucharon las instrucciones sobre la selección natural y la explicación a los resultados de esas simulaciones). Por otro lado, es posible que se reforzaran ideas alternativas por expresiones o explicaciones poco rigurosas que fueron difíciles de evitar durante la exposición (p.ej., «los ancestros de las aves pasaron a usar las plumas “para” volar»; o, «las esponjas no necesitan las neuronas “para” su forma de vida»).

La respuesta a la pregunta 5, sobre los equilibrios interrumpidos, mejoró muy significativamente ($p < 0,01$), lo que pudo ser debido al mayoritario desconocimiento de esta teoría previamente a estas sesiones. Sin embargo, si se escoge un criterio de corrección más estricto, tomando como respuestas correctas no las que sólo aludan a la fase de especiación o a la de estasis (con esas u otras palabras) sino las que no omitan, respectivamente, la especiación o la estasis, la mejora de los resultados resulta sólo casi significativa ($p = 0,061$ y $p = 0,050$) y si exigimos que aludan a las dos se vuelve no significativa ($p = 0,346$), aunque aún positiva.

La respuesta a la pregunta 8, acerca de la exaptación, mejoró muy significativamente ($p < 0,05$). Esto se pudo deber a que quizás los alumnos no estuvieran inicialmente muy familiarizados con la idea de reaprovechamiento de caracteres para distintas funciones; aunque quizás se debiera a que la pregunta del cuestionario inicial resultara más complicada o menos precisa. Sin embargo, si se comparamos los resultados de los 15 alumnos que hicieron todo el vídeo-cuestionario, frente a los que no hicieron el vídeo-cuestionario o no completamente, observamos una mayor proporción de casos de mejoría (40,0% vs. 14,3%) que resultó estadísticamente significativo ($p < 0,05$; Tabla 8) Asimismo, se observó que no hubo diferencias significativas en los resultados del cuestionario inicial entre ambos grupos de alumnos (Tabla 8), y, por tanto, la mejoría se puede achacar al vídeo-cuestionario.

En la pregunta 9, relativa a la idea de diseño, a pesar de la exposición y el vídeo-cuestionario y a pesar de añadirse a la pregunta original del cuestionario final «e incorporando partes del cuerpo que antes tenían una función distinta», que es una referencia a la exaptación, no hubo una mejoría significativa (Tabla 7). Si distinguimos los datos entre alumnos que hicieron el vídeo-cuestionario completo y los que no tampoco hay diferencias significativas (Tabla 8); y, atendiendo a sus preguntas iniciales, parece que ambos grupos fueron estadísticamente iguales (Tabla 8). Por tanto, parece que ni el vídeo ni la exposición hayan tenido efecto en la disminución de esta idea alternativa. Es posible que aumentando el tamaño muestral sí se detectaran diferencias significativas, pues mirando, dejando a un lado las inexistentes diferencias estadísticas, los porcentajes parecen indicar que se partía de una situación peor y se consiguieron resultados mejores. Sin embargo, en todo caso los resultados serían inferiores que

con la exaptación. Cabe preguntarse en qué medida esto se debe a un distinto éxito o énfasis en el abordaje del tema, o a una diferencia en la dificultad para entender la explicación correcta y abandonar la alternativa, o incluso a reticencias en rechazar el diseño inteligente debido a creencias personales. También podría ser que la frase del cuestionario final «se ha formado poco a poco» se relacionara con el gradualismo excesivo que fue criticado de ciertos neodarwinistas. Por otro lado, la pregunta del cuestionario inicial incluye el negativo «es imposible que», pudiendo haber causado confusiones; aunque esto se advirtió a viva voz en ambas clases durante el cuestionario.

Tabla 8. Comparación en el número de alumnos según sus respuestas correctas e incorrectas en las preguntas del cuestionario inicial relacionadas con el vídeo-cuestionario respecto a sus análogas al final en los alumnos que realizaron completo el vídeo-cuestionario respecto a los que no. Se indica la significación del análisis de bondad de ajuste entre ambos grupos siguiendo el método de Monte Carlo. Se indica también la comparación entre ambos grupos de alumnos respecto a sus respuestas tan sólo a la pregunta del cuestionario inicial. Los porcentajes hacen referencia al total de alumnos de cada fila de la tabla. (*) Diferencia significativa ($p < 0,05$).

Pregunta	Idea clave	Alumnos	Ambas r. correctas	Sólo r. inicial correcta (empeoramiento)	Sólo r. final correcta (mejoría)	Ambas r. incorrectas	Sig. Monte Carlo
8 vs. (8) 2	Exaptación	Sí vídeo	3 (20,0%)	1 (6,7%)	6 (40,0%)	5 (33,3%)	0,026*
		No vídeo	4 (19,0%)	1 (4,8%)	3 (14,3%)	14 (61,9%)	
9 vs. (9) 7	Diseño int.	Sí vídeo	6 (40,0%)	3 (20,0%)	5 (33,3%)	1 (6,7%)	0,784
		No vídeo	10 (45,5%)	5 (22,7%)	5 (22,7%)	2 (9,1%)	
Pregunta	Idea clave	Alumnos	Respuesta correcta		Respuesta incorrecta		Sig. Monte Carlo
8	Exaptación	Sí vídeo	4 (26,7%)		11 (73,3%)		0,716
		No vídeo	5 (22,7%)		17 (77,3%)		
9	Diseño int.	Sí vídeo	9 (60,0%)		6 (40,0%)		0,496
		No vídeo	15 (68,2%)		7 (31,8%)		

Por último, también resultó llamativa la falta cambios significativos en las tres preguntas restantes, sobre el objetivo de la evolución, la deriva genética y la macroevolución/evo-devo. En el caso de la deriva genética, probablemente esto se debió a que la pregunta del cuestionario inicial era de test, además de que algo menos de la mitad de la clase no simuló en persona la deriva en el «juego», sino la selección natural. En los otros casos, especialmente en el del objetivo de la evolución, esto pudo deberse a la menor falta de énfasis puesto en el tratamiento de esos contenidos y/o al menor arraigo de ideas alternativas.

En relación con la seguridad de las respuestas, esta no varió ni en las respuestas incorrectas ni en las correctas entre ambos cuestionarios para ninguna de las preguntas (Tabla 9), por lo que no se puede hablar de una mejoría o un empeoramiento en ese aspecto.

El distinto grado de seguridad de las respuestas correctas respecto a las incorrectas en cada pregunta individual no se analizó estadísticamente, pero un análisis descriptivo parece indicar que no es importante (Tabla 10).

Tabla 9. Comparación del grado de seguridad de las respuestas a las preguntas del cuestionario inicial y el de sus análogas del cuestionario final, indicando la significación de la prueba que corresponda. Precediendo al número de cada pregunta del cuestionario final se indica, entre paréntesis, el número de su análoga del cuestionario inicial.

Respuestas comparadas	N inicial	N final	Similar forma y dispersión	Prueba de U de Mann-Whitney			N por grupo	Prueba de la mediana	
				N del grupo mayor	Sig. asintótica	Sig. exacta dos colas		Sig. asintótica	Sig. exacta mid-p
2 vs. (2) 3 incorrectas	32	27	No	>25			≥10	0,511	
2 vs. (2) 3 correctas	4	9	No	≤25			<10		0,608
3 vs. (3) 5 incorrectas	22	28	Sí	>25	0,183		≥10		
3 vs. (3) 5 correctas	13	7	No	≤25			<10		0,821
7 vs. (7) 8 incorrectas	15	16	No	≤25			≥10	0,600	
7 vs. (7) 8 correctas	20	19	Sí	≤25		0,377	≥10		
9 vs. (9) 7 incorrectas	12	11	No	≤25			≥10	0,925	
9 vs. (9) 7 correctas	23	24	No	≤25			≥10	0,528	

Tabla 10. Número de respuestas a cada pregunta de test del cuestionario inicial y su análoga en el final según el grado de seguridad de las mismas. Precediendo al número de cada pregunta del cuestionario final se indica, entre paréntesis, el número de su análoga del cuestionario inicial. En la misma casilla se indica también la idea que abordaba la pregunta.

Grado de seguridad de la respuesta	Respuestas a la pregunta 2/(2) 3 (%). Objetivo				Respuestas a la pregunta 3/(3) 5 (%). S. natural.			
	Cuestionario inicial		Cuestionario final		Cuestionario inicial		Cuestionario final	
	Correcta	Incorrecta	Correcta	Incorrecta	Correcta	Incorrecta	Correcta	Incorrecta
0	0	0	0	0	7,7	4,5	0	0
1	25,0	18,8	22,2	11,1	53,8	54,5	57,1	42,9
2	50,0	62,5	33,3	63,0	30,8	31,8	28,6	39,3
3	25,0	18,8	44,4	25,9	7,7	9,1	14,3	17,9
Grado de seguridad	Respuestas a la pregunta 7/(7) 8 (%). Macroev.				Respuestas a la pregunta 9/(9) 7 (%). Diseño.			
	Cuestionario inicial		Cuestionario final		Cuestionario inicial		Cuestionario final	
	Correcta	Incorrecta	Correcta	Incorrecta	Correcta	Incorrecta	Correcta	Incorrecta
0	5,0	0	0	6,3	0	0	4,2	0
1	65,0	46,7	57,9	50,0	56,5	41,7	29,2	18,2
2	20,0	46,7	26,3	37,5	26,1	41,7	41,7	63,6
3	10,0	6,7	15,8	6,3	17,4	16,7	25,0	18,2

7.3.2. Ideas alternativas y otras ideas

En las preguntas de respuesta larga se observaron diversos errores conceptuales e ideas alternativas, así como respuestas interesantes que se comentarán a continuación:

En la pregunta 1, en primer lugar, en seis casos aparecieron las ya mencionadas respuestas en las que se da a entender que los reptiles actuales son la «especie» de la que provendrían los mamíferos, aludiendo al proceso de especiación para diferenciarnos de ellos. En al menos otros once casos se sostuvo claramente que los reptiles no han evolucionado o se han estancado o

incluso que no todos evolucionamos a la vez, como si la evolución siguiera unas fases determinadas. En segundo lugar, un par de alumnos respondieron que si los reptiles no existieran hoy en día entonces no habría seres humanos, quizás ignorando el fenómeno de la extinción (si nosotros venimos de ellos y las especies no se extinguen, tienen que seguir existiendo). Por último, en un caso se habla de que sigue habiendo reptiles porque son necesarios para nuestra vida, quizás mostrando una visión antropocéntrica o ignorando también la extinción. Aparte de esto, en más de un caso se alude a los reptiles como si fueran una especie, lo que podría deberse a una mala comprensión de este concepto o bien a una simple falta de rigor en los términos.

En la pregunta (1) 1, dos alumnos respondieron que las plantas están más evolucionadas que los invertebrados. Otro par respondió que las bacterias son más complejas que las esponjas, aunque son menos evolucionadas; y otro lo mismo, pero con los microorganismos en lugar de las bacterias. Dado que el concepto básico (mayor evolución no implica necesariamente mayor complejidad) es correcto, se contaron como correcta estas respuestas, aunque el ejemplo fuera científicamente discutible. El ejemplo de la esponja aportado en la exposición, sobre que esta podría ser más derivada que lo más complejos ctenóforos (*phylum* de animales que recuerdan a las medusas y que tienen verdaderos tejidos), sirvió a algunos alumnos, pero quizás a otros los confundió; aunque no recuerdo hablar en esto de ninguna bacteria ni microorganismo. Al menos seis alumnos dijeron que se ha pasado a cada vez mayor complejidad e incluso que nosotros somos el último peldaño. Esta clase de respuestas no fueron las deseadas; sin embargo, podrían discutirse pues, por ejemplo, probablemente las eucariotas tengan mayor complejidad a nivel celular (quizás no así a nivel de rutas metabólicas) que las procariontes; los animales mayor complejidad en cuanto a coordinación de tejidos que las plantas; y el cerebro de los humanos mayor complejidad o desarrollo en general que los demás cerebros. Sin embargo, aunque es posible comparar el grado de evolución y complejidad de rasgos concretos, es más complicado y subjetivo hacerlo para el individuo en general; y no parece haber un criterio objetivo para establecer qué es progreso. Por otra parte, es sencillo entender que las distintas especies actuales constituyen (salvo casos de especies ancestro y descendiente tras especiaciones recientes) ramas paralelas del árbol de la vida y no peldaños en los que se pase de unas a otras. Otra cosa que puede suceder es que se considere a unos grupos taxonómicos actuales como anteriores o ancestrales a otros, pero sin tener en cuenta que dentro de esos grupos las especies han seguido evolucionando desde la aparición del grupo. Estas explicaciones pudieron estar detrás de que una alumna respondiera estar de acuerdo con la afirmación por la que se preguntaba («Los seres vivos menos evolucionados son las bacterias...») porque «los primeros organismos vivos que hay en la tierra eran las arqueobacterias, con lo cual son las menos evolucionadas». Otra alumna menciona también la evolución de las eucariotas a partir de las procariontes, que es la teoría endosimbiótica, correcta pero no como justificación de la idea de progreso. Por otro lado, resulta difícil no darle la razón cuando dice que algunas partes de nuestro cuerpo provienen de especies menos evolucionadas, se entiende que del pasado.

En la pregunta (4) 6, están las comentadas alusiones a la duplicación génica, que posiblemente fueron confusiones con este otro punto de la exposición o intentos de alumnos que no conocen la respuesta. Un alumno dijo que la fuerza evolutiva por la que se pregunta es la supervivencia «para así eviten su extinción y lograr que su especie tenga un territorio propio». Otras respuestas que aparecieron una sola vez fueron las siguientes: Genes decisivos, probablemente pensando en la evo-devo; la selección artificial; el azar, pero en los gametos, que aumentaría la diversidad; las mutaciones, lo cual podría contarse como válido y así se hizo, solo que en virtud de que también mencionaba la deriva; el lamarckismo, explicándolo aunque

después explicando también aparte la deriva; y la deriva como otro modo de prosperar de las especies. En un caso se dice que la deriva genética afecta aleatoriamente a la población; pero después también que ayuda a las poblaciones con facilidad para sobrevivir en determinado entorno, lo cual referido a individuos más aptos puede suceder o no dependiendo del azar. En relación con esto, dos alumnos dicen que la deriva no favorece a ninguna especie o que cuando hay varias especies unas sobreviven o no al azar. Esta confusión probablemente tuvo su origen en que las plantas de la simulación no se cruzaban entre ellas, por lo que bien podrían ser de distintas especies (o poblaciones), como ya se comentó en el apartado de metodología.

En la pregunta (5) 4, apareció mencionada en un caso la ley del más fuerte. Un alumno expresó que no le daba tiempo a completar la pregunta. Efectivamente, el tiempo para el cuestionario final fue algo más escaso, especialmente para su clase. Sendos alumnos, al explicar los equilibrios interrumpidos, hablaron de cambios bruscos, cambios repentinos o gran salto evolutivo; y un par dijo que se evolución de golpe. Estas respuestas se consideraron correctas, aunque no está claro si en realidad estaban pensando en cambios saltacionistas. Otro alumno, más correctamente, habló de evolución relativamente rápida. Una alumna habló de ritmo rápido y arbitrario. En un caso se relacionó la idea de ir siempre a mejor con el neodarwinismo.

En la pregunta 8, seis alumnos respondieron diciendo que las plumas evolucionaron para el vuelo por necesidad, siendo varias de esas respuestas inequívocamente lamarckianas, al explicar también la evolución de los individuos. Además, una alumna que no asistió a la segunda sesión hizo referencia a la adaptación a través del uso. Aparte de esto, al menos un alumno de los 37 dijo que las plumas fueron apareciendo progresivamente de manera que tuvieran cantidad suficiente como para volar. Esta inverosímil idea de acumulación progresiva de caracteres desfavorables en un órgano hasta llegar a un desarrollo del mismo suficiente como para desempeñar la función actual es propia de un gradualismo excesivo y se resuelve con el concepto de exaptación. En alguna respuesta se dio un ejemplo correcto pero la explicación fue incorrecta, lo que sugiere que el concepto no quedó claro.

En la pregunta (8) 2, tres alumnos dijeron que la exaptación tiene que ver con la aparición de órganos (estructuras...) que no se necesitan o bien que tiene que ver con su desaparición. Aparte de esto, algunos alumnos respondieron aludiendo a otros puntos de la explicación, como la modificación de las aletas de los peces o que la evolución no implica avance; o mezclaron la exaptación con el factor azar. Esto pudo deberse a mera incomprensión o a deficiencias en la explicación durante la exposición.

En todas las preguntas hubo un cierto porcentaje, normalmente pequeño, de alumnos que no contestaron o que dijeron no saber, salvo en la pregunta (1) 1, en la que, por otro lado, varios respondieron «no» sin más explicación. Todas estas respuestas se contaron como incorrectas.

7.4. Cuestionarios: Aceptación y compatibilidad con las creencias

Los resultados de las últimas preguntas del cuestionario inicial muestran una aceptación de la evolución y una compatibilidad de la misma con las creencias personales relativamente alta, con el 89,1 y el 75% de las respuestas entre las dos opciones consideradas de mayor aceptación o compatibilidad. Tras las sesiones, la aceptación creció de forma no significativa y la compatibilidad con las creencias creció de forma casi significativa ($p < 0,1$) si se aplica la probabilidad para una cola, y no significativa para dos colas (Tabla 11). Esta última probabilidad sería la más legítima dado que no fue de esperar *a priori* una mayor compatibilidad de la evolución con creencias personales religiosas tras las explicaciones de la macroevolución, la falsedad del diseño inteligente o la falta de propósito en la evolución; y era difícil predecir el

cambio en la compatibilidad con creencias de otro tipo. Respecto a estas preguntas, cabría preguntarse sobre el grado de fiabilidad de sus respuestas, pues quizás los alumnos podrían variarlas de un día a otro por causas independientes del contenido de las sesiones. Asimismo, respecto a su validez, quizás en los alumnos pudo influir cierto deseo de satisfacerme haciendo parecer que las sesiones tuvieron algún efecto positivo en sus creencias acerca de la evolución.

Tabla 11. Respuestas a las preguntas sobre el grado de aceptación de la teoría de la evolución por parte de los alumnos y la compatibilidad que tiene con sus creencias personales; y probabilidad de la prueba estadística aplicada. Se indica las respuestas de los alumnos que asistieron a la integridad de las dos sesiones y respondieron a estas preguntas. Se indica la respuesta y el número asignado para analizar estas preguntas como variables ordinales. La probabilidad en negrita indica una tendencia a la significación ($0,05 < p < 0,1$).

Respuesta	Pregunta sobre la aceptación de la evolución		Respuesta	Pregunta sobre el conflicto con sus creencias	
	C. inicial	C. final		C. inicial	C. final
a - 5	15 (40,5%)	16 (43,2%)	a - 5	24 (66,7%)	29 (80,6%)
b - 4	18 (48,6%)	19 (51,4%)	e - 4	7 (8,3%)	3 (8,3%)
c - 3	3 (8,1%)	2 (5,4%)	b - 3	3 (8,3%)	2 (5,6%)
d - 2	1 (2,7%)	0	c - 2	2 (5,6%)	2 (5,6%)
e - 1	0	0	d - 1	0	0
Prueba estadística aplicada	p exacta		Prueba estadística aplicada	p exacta	
	Dos colas	0,607		Dos colas	0,180
Prueba de signos	Una cola	0,304	Prueba de signos	Una cola	0,090

A pesar de la alta aceptación y compatibilidad general no faltaron unos pocos alumnos que declararon que aceptaban la teoría de la evolución «algunas veces» (o incluso «sólo un poco» en un caso en el cuestionario inicial) o que esta «[m]uchas veces entraba en conflicto con mis creencias personales». Sin embargo, los dos alumnos que respondieron esto último no fueron los mismos en el cuestionario inicial que en el final. Quizás se tratara de errores, pues la versión impresa que se entregó de este cuestionario tenía erróneamente situada esta respuesta como la b, por lo que, con el además algo escaso tiempo disponible para realizar este segundo cuestionario, pudieron pensar que la respuesta escogida era que muchas veces era compatible con sus creencias. De darse estos errores, podrían haber afectado al grado de diferencia en las respuestas iniciales y finales. El número alto de respuestas «b» en la pregunta sobre la aceptación quizás podría achacarse a un sano espíritu crítico y a un reconocimiento de que la ciencia está en constante revisión, suponiendo en ese caso que los alumnos que escogieran dicha opción dudaran sólo de aspectos parciales del mecanismo evolutivo.

Parece interesante notar que no ha habido cambios a peor en la compatibilidad tras refutarse el diseño inteligente o las ideas sobre la teleología de la evolución o sobre la evolución de los individuos en vez de las poblaciones. Quizás en esos dos o tres días los alumnos se replantearon sus creencias. No obstante, para saber a qué se debe esto habría que examinar más en profundidad cuáles eran dichas creencias, cosa que iba más allá del tiempo disponible en estas sesiones y puede que también de ciertos límites relacionados con su vida privada que no es prudente o lícito rebasar por parte de un profesor.

7.5. Cuestionarios: Valoración de las sesiones

La valoración de estas sesiones fue buena, aunque se criticaron algunos puntos, como puede observarse en la Figura 13. Así, las sesiones resultaron interesantes, entretenidas o didácticas para buena parte de los alumnos; pero también se hizo notar la excesiva rapidez o complicación de las mismas. Un punto a destacar fue la popularidad y buena opinión que se tuvo del «juego».

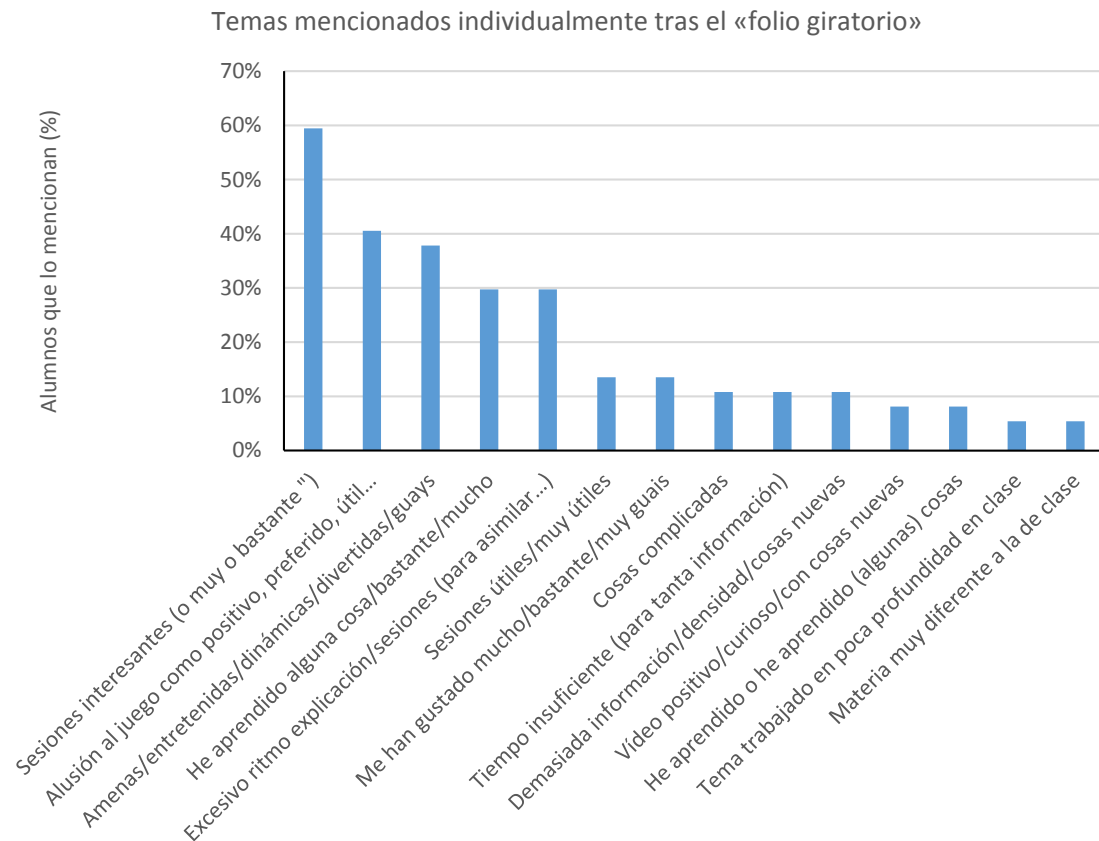


Figura 13. Valoraciones expresadas más frecuentemente (al menos dos veces) por los 37 alumnos que estuvieron presentes durante las dos sesiones de evolución en su totalidad. Cada alumno pudo mencionar más de un tema, por lo que los porcentajes no suman 100%.

Algunas valoraciones de las sesiones aparecidas una sola vez son las siguientes: Aprendizaje de alguna cosa interesante; originalidad de las sesiones; tiempo de las sesiones breve pero suficiente; resolvieron dudas; suscitaron dudas; algunos contenidos no eran claros; utilidad para saber de dónde venimos; utilidad para desmentir mitos que el alumno tenía; utilidad para ver la evolución desde otro punto de vista; mucha satisfacción con la charla y deseo de un día más de oposición; dificultad de la primera sesión; conceptos complejos en el vídeo; y demasiados cuestionarios. Respecto a mi desempeño, tres hacen referencia a mi nerviosismo, una dice que se nota que las clases están bien preparadas y otro, no perteneciente a los 37 por haberse perdido la exposición destacó como patente mi gusto por el tema.

7.6. Simulación deriva-selección natural

La simulación se pudo realizar en el tiempo estimado y arrojó resultados que permitieron mostrar en el proyector los efectos de la deriva genética (variaciones erráticas en las frecuencias alélicas en las que en distintos casos se fijan o desaparecen distintos alelos) y los de la selección natural (tendencia consistente hacia el aumento y, en último término, fijación del alelo más favorable, aunque en esta pequeña población también con variaciones aleatorias). Los

resultados representados en forma de gráfica y mostrados con el proyector en cada clase pueden verse en el Anexo 7. Repasando dichas gráficas, se observa la rapidez en la fijación del alelo favorable en las simulaciones de selección natural, previsible dada la enorme ventaja reproductiva que se le asignó respecto al resto, en especial frente al alelo más desfavorecido. Esto pudo hacer que los grupos de selección acabaran antes, lo cual debería tenerse en cuenta de cara a modificaciones posteriores de la simulación, pues además la selección natural en esta simulación parece menos entretenida, por previsible, que la deriva genética.

Varios grupos pudieron hacer sus gráficas manualmente, las cuales se fotografiaron semanas después. Esto hizo que no se pudieran encontrar más que tres gráficas (Figura 14), que fueron más elementales estéticamente que otras que se observaron. El hecho de que no todos los grupos hicieran sus gráficas se debió a que esta tarea no se indicó a viva voz sistemáticamente, pues el objetivo principal fue tener tiempo para realizar la simulación sin excesiva prisa.

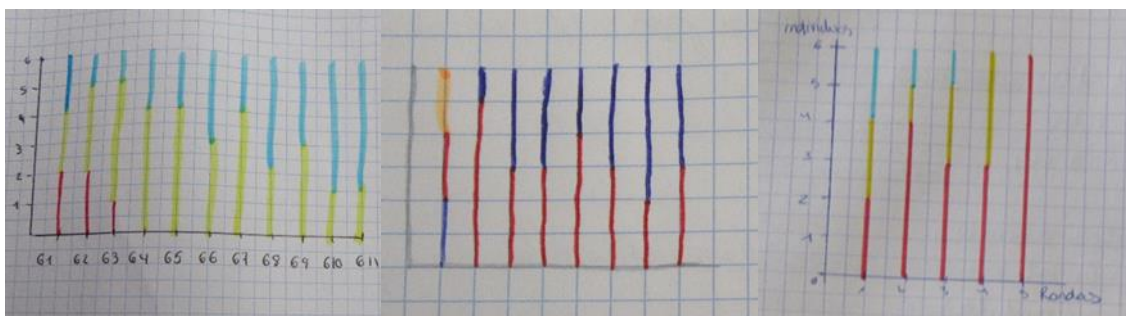


Figura 14. Fotografías de algunas de las gráficas hechas por los alumnos durante la actividad de la simulación de la deriva genética y la selección natural a partir de sus propios datos. Las primeras dos fotografías representan casos de deriva genética y la tercera representa un caso de selección natural.

De la simulación cabe destacar que, además de la positiva valoración de la misma entre el alumnado, expresada en el cuestionario final y en varios casos en persona, también gustó al profesor de Biología y Geología de 1º de Bachillerato, que llamó a una compañera docente para que le explicara y mostrara brevemente la simulación en un momento dado al final de la clase.

8. Discusión general

En el presente trabajo se han aplicado varias metodologías educativas en el contexto de la introducción de nuevos contenidos al tema de la evolución en secundaria. El objetivo no ha sido hacer un estudio en profundidad de la eficacia de unas y otras o del grado y forma exacta con la que se deben incluir los contenidos propuestos, sino llevar a cabo una exploración más general que aportara propuestas diversas y permitiera vislumbrar sus fortalezas y debilidades de cara a la enseñanza de este tema. De esta forma, el análisis de los currículos y libros de texto no ha incluido un estudio de carácter más global que tuviera en cuenta la importancia real, el peso curricular y su relación con la evolución de otros temas pertenecientes a los mismos u otros bloques, cursos e incluso asignaturas, lo cual habría sido útil en cuanto a que la inclusión de temas nuevos afecta a los ya existentes. Tampoco se ha analizado directamente el tratamiento de las aportaciones escogidas en currículos y libros de otros países; ni se ha consultado la opinión de expertos en el sistema educativo y en la enseñanza de biología en secundaria. Por otra parte, la metodología empleada presentó varias limitaciones. Por ejemplo, los cuestionarios utilizados, en parte de elaboración propia y en parte obtenido de artículos con propósitos diversos, se estudiaron comparando preguntas no siempre del todo equivalentes y en algunos casos con distintos formatos (test frente a preguntas largas). Asimismo, como ya se ha comentado, se podría criticar que algunas preguntas análogas pudieran ser desigualmente difíciles o no siempre

claras en lo que se pedía; o se podría discutir la validez y fiabilidad de los métodos empleados para calificar sus resultados. Además, la naturaleza tan intensiva y limitada en el tiempo de las sesiones no permite saber el grado de retención de los cambios significativos detectados en los conocimientos los alumnos más allá del corto plazo. Dicho todo esto, este trabajo bien podría sumarse a otros que han ido apareciendo, tratando metodologías y temas similares, si bien principalmente aplicados a ámbitos universitarios, y que obtuvieron también resultados positivos. Algunas de estas propuestas se discuten a continuación:

En primer lugar, respecto a los contenidos, Kampourakis y Minelli (2014) realizaron una revisión que les llevó a sugerir que la evo-devo, al proveer evidencia de que cambios morfológicos grandes son posibles, podría servir frente a las intuitivas ideas esencialistas y de diseño intencional en la evolución, reduciendo así la resistencia a aceptar la evolución. Por su parte Price y Perez (2016), revisando ese y otros artículos más bien centrados en estudiantes universitarios, pero teniendo también en mente la educación secundaria, encontraron que los estudiantes con una mayor comprensión conceptual de mecanismos como la deriva genética o los implicados en la evo-devo mostraban menos concepciones erróneas en torno a la selección natural. Además, sugirió que entrelazar los distintos mecanismos evolutivos en los distintos cursos y currículos y utilizar analogías puente podría mejorar la comprensión de todos los procesos evolutivos. Ninguno de esos resultados se encontró en el presente trabajo, aunque la causa de esto podría ser la limitada disponibilidad temporal y tamaño muestral y el poco énfasis dado a la selección natural, más que el curso de los alumnos.

En segundo lugar, Abraham *et al.* (2012), de forma similar a este trabajo, llevaron a cabo con estudiantes universitarios de Biología una propuesta de dos sesiones poco espaciadas en el tiempo con ejercicios que trataban patrones macroevolutivos, además de evidencias de la evolución y otros aspectos; e incluyeron, si bien no siempre dentro de las sesiones, un cuestionario inicial y otro final acerca de la aceptación de la evolución. Sus resultados, no obstante, sí arrojaron una ligera mejora en la aceptación; aunque, para ello utilizaron un tamaño muestral muy superior al de 37 utilizado aquí. Otro paralelismo fue que el énfasis en ciertos puntos, en su caso en la complejidad y en el mío en los cambios genéticos, posiblemente reforzó una idea alternativa, en su caso la de que los linajes se vuelven más complejos con el tiempo, idea que probablemente se redujo en el presente trabajo, y en el mío la de los agentes mutágenos como importante factor en la evolución.

En tercer lugar, Staub (2002) consideró que la deriva genética es un importante mecanismo evolutivo que merece un tratamiento más completo e interactivo en el aula. Por ello, diseñó un ejercicio similar al aquí propuesto en que se simulaba el efecto fundador⁶, haciendo a alumnos universitarios tomar de muestras de caramelos M&M de una bolsa, que representa la población original, y anotar las frecuencias alélicas de las distintas muestras relacionándolas con el tamaño muestral. Una evaluación informal mostró que la actividad capturaba el interés de los alumnos, cosa que en este TFM también se observó, y que les ayuda a comprender conceptos difíciles, cosa que no observada en el presente trabajo. Al igual que en este trabajo, Staub incidió en la disminución de la variabilidad intrapoblacional y el aumento de la interpoblacional a consecuencia de la deriva. Otra propuesta para enseñar la deriva genética, en este caso a través de pósts y adaptable a diversos niveles educativos, podemos encontrarla en Lee *et al.* (2017).

⁶ El efecto fundador, como explica Staub (2002), se produce en grupos pequeños de individuos que colonizan nuevos ambientes cuando sus frecuencias alélicas por azar son distintas de las de la población original. En este artículo se lo considera un tipo de deriva genética.

Por último, otros mecanismos evolutivos vistos en este trabajo, además de la deriva genética, también han sido enseñados con buenos resultados a universitarios e incluso estudiantes de instituto a través de juegos *ad hoc*. Así, por ejemplo, Dorrell (2019) propuso un método en el que, con el apoyo también de diapositivas y vídeos, los alumnos comprendieran la evo-devo a través de piezas de Lego y la macroevolución por acumulación de pequeñas mutaciones modificando un dibujo base mediante la adición o sustracción acumulativa de pequeños elementos al mismo. Por su parte, Brown (2016) diseñó una metodología de aprendizaje de la evolución consistente en que los alumnos construyeran muñecos añadiendo piezas a masas de plastilina, la cual demostró aumentos significativos en la comprensión del fenómeno. En ambos casos las propuestas se consideraron aptas para estudiantes tanto universitarios como de secundaria.

Teniendo en cuenta los resultados de este trabajo, parece evidente que las ideas lamarckianas o afines tienen un importante arraigo en los alumnos estudiados, siendo por tanto prioritaria, como afirma González y Meinardi (2013), la comprensión del mecanismo básico de la evolución, que no es otro que la selección natural. Sin embargo, no es menos cierto que en el presente trabajo parece haber aumentado en poco tiempo la comprensión de conceptos como los de equilibrios interrumpidos y exaptación entre el alumnado, por lo que, considerando los artículos explicados anteriormente, opino que justificaría su introducción junto con las metodologías propuestas. Otro motivo para enseñar modelos evolutivos que vayan más allá del neodarwinismo podría ser, como afirma Folguera y González (2012) respecto al neutralismo, los equilibrios interrumpidos y la teoría endosimbiótica, su posible utilidad de cara a la enseñanza de la naturaleza de la ciencia, en cuanto a que muestran «el disenso y el debate» como parte de la ciencia. Por ese motivo y por afectar a supuestos principales del neodarwinismo, argumentan la relevancia de que sean conocidos también por futuros profesores de biología de secundaria, dada la influencia de su formación en el aprendizaje de los alumnos. La importancia de una adecuada formación de los profesores con respecto a la evolución también ha sido comentada por otros autores (p.ej., Rivas y González, 2016; Vázquez-Ben, 2015), incluida la conveniencia de que conozcan mecanismos no darwinianos, tales como la evo-devo (Chávez, 2010). Este es otro punto en el que este trabajo podría ser valioso. Otro posible motivo para introducir los contenidos y metodologías aquí tratados puede ser el interés que, como muestran los resultados (clases interesantes, amenas...), parece suscitar entre el alumnado. En efecto, y como también apunta Vázquez-Ben (2015), la evolución parece ser para ellos un tema de gran interés.

Por otro lado, se ha argumentado que la enseñanza de nuevos modelos evolutivos debe ir acompañada de una adecuada transposición didáctica que, según Folguera y González (2012), todavía no se ha dado. Asimismo, González y Meinardi (2013) afirman también que la incorporación de dichos modelos complementarios al neodarwinismo requiere también de una rigurosa reflexión sobre si está justificada su inclusión y debería quedar supeditada a la disponibilidad de tiempo y recursos para evitar un contraproducente exceso de contenidos.

9. Algunas propuestas

Teniendo todo esto en consideración, opino que, de ser necesario profundizar en diversos aspectos de la evolución, recursos como el vídeo-cuestionario y la simulación propuestas podrían ser útiles. Así, actualmente existen numerosos los vídeos y fácilmente accesibles a través de internet, y que pueden ser proyectados en clase. En particular, considero como especialmente apropiados para enseñar evolución en estas edades canales de YouTube como StatedClearly, que tiene algunos vídeos en español, o CuriosaMente.

En cuanto a la formación del profesorado, libros de divulgación como «Evolución. Para creyentes y otros escépticos» de Novo (2019), ya mencionado anteriormente, podrían ser útiles; si bien, al contrario que Cháves (2010), creo que la recomendación de libros divulgativos de evolución a los alumnos probablemente sea demasiado ambiciosa, pues recordemos que la educación secundaria no es un Grado en Biología o un curso sobre evolución. Sin embargo, otros. Además de los libros y los vídeos, existen diversas webs de divulgación de la evolución. Entre ellas, destacaría la web *Understanding Evolution* por incluir en mayor o menor profundidad buena parte de los contenidos tratados en este TFM y por estar parcialmente traducida al español (ver Evolution.berkeley.edu, s.f.). Dicha web ya ha sido utilizada o recomendada en el ámbito educativo en diversos trabajos (p.ej., Barberá *et al.*, 2011; Nadelson y Sinatra, 2010).

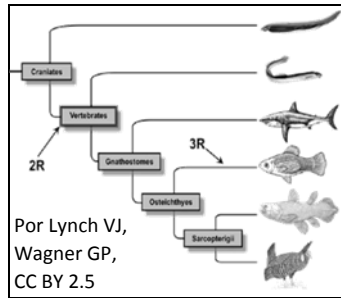
En cuanto las aportaciones a la evolución en las que se centra este trabajo, ya justificada su pertinencia cabría estudiar cómo introducirlos en el temario. Por un lado, de cara al currículo, ya se ha explicado en el apartado 4.3. que su mención explícita, si bien no es imprescindible, parece recomendable para evitar la omisión de estos contenidos. Así, partiendo de los puntos actuales del currículo, se propone que, por ejemplo, en Biología y Geología de 4º de la ESO el criterio de evaluación 17 podría pasar a ser «Analizar el debate entre los partidarios del gradualismo, el saltacionismo y el neutralismo y *la evo-devo*», con las cursivas indicando el cambio propuesto. En Cultura Científica de 1º de Bachillerato, el último contenido del bloque podría pasar a ser «Neodarwinismo. Equilibrio *interrumpido. Evo-devo*». Por último, en 2º de Bachillerato, podría haber un estándar de aprendizaje a continuación del 14.1. «Ilustra la relación entre mutación... y su influencia en la evolución de los seres vivos» que fuera 14.2. «*Argumenta la importancia de las duplicaciones génicas en la evolución de los seres vivos*», quedando el criterio de evaluación correspondiente como 14. «Reconocer la importancia de la mutación, la recombinación y *la duplicación génica*»; aunque esto quizás no encajaría con sería oportuno dado que este curso está más centrado en la genética de poblaciones.

Por otro lado, en cuanto a los libros de texto clásicos o virtuales propongo, por ejemplo, que la evo-devo se situé en una subsección propia tras explicarse el neodarwinismo y los equilibrios interrumpidos, de forma similar a como ya se hace en el libro sm1º15, aunque quizás en 4º de la ESO. Por su parte, la exaptación podría aparecer en aquellas páginas en las que se explique la adaptación o los tipos de adaptación, bien a continuación en el texto, o bien en un cuadro de texto al margen (Figura 15a). Recordemos en esto la subsección «no todo es adaptación», del libro sm1º15. Asimismo, la importancia de las duplicaciones de cara a la evolución debería mencionarse en los libros de todas las editoriales, bien al menos en la parte dedicada al tipo de mutaciones en 2º de Bachillerato o bien con un apartado propio en el tema de la evolución de ese u otros cursos. Otros puntos, como la transferencia genética horizontal, también pueden aparecer brevemente de esa forma en los temas sobre evolución o genética (Figura 15c). Por último, la deriva genética, claro está, debería seguir enseñándose al tratar la genética de poblaciones, pero reflejando más fielmente su importancia. Por último, algunas aportaciones podrían aparecer en la asignatura de Cultura Científica de 1º de Bachillerato como contribución a la cultura y alfabetización científica, aunque quizás no sería conveniente hacerlo si así se sustrajeran de las asignaturas de biología. Aparte de esto, visto que la mejoría de los alumnos participantes en este estudio se debió probablemente al estudio de ejemplos impactantes (las esponjas, las plumas de las aves y el flagelo bacteriano), sería interesante introducir ejemplos en los libros que fueran relevantes (tocantes a nuestro linaje), impactantes o tuvieran relación con su experiencia (relativos a animales conocidos, etc.), como se muestra en la figura 15. En esta figura se omitió el caso de las esponjas por no estar aún bien establecido científicamente.



Por Emily Willoughby,
CC BY-SA 4.0

Las características biológicas no siempre tuvieron que desempeñar las funciones que hacen en la actualidad. Por ejemplo, las plumas de los ancestros de las aves no eran originalmente aptas para volar, sino que podrían haber evolucionado como aislante térmico, una especie de pelaje. A un rasgo que adquiere una nueva función se le llama **exaptación**. En la imagen se muestra una representación de un *Serikornis*, un pequeño dinosaurio emplumado que probablemente nunca hubiera sido capaz de volar.



Por Lynch VJ,
Wagner GP,
CC BY 2.5

Aunque las duplicaciones de todos los cromosomas son más frecuentes en las plantas, también han tenido importancia en la evolución de los animales. Por ejemplo, hoy en día se piensa que en el linaje de los vertebrados con mandíbula ha habido dos duplicaciones de todo el genoma completo. Esta hipótesis se conoce como **hipótesis 2R**, por las dos rondas de duplicaciones.



Por
Jpeccoud,
CC BY 3.0

La **transferencia genética horizontal** es el paso de ADN que se da entre organismos no debida a la relación progenitor-descendiente. Este fenómeno es frecuente en bacterias, e incluso en eucariotas unicelulares, pero sólo recientemente se empieza a conocer en pluricelulares. Por ejemplo, se piensa que pulgones del guisante de color rojo adquieren ese color gracias a que genes fúngicos (de hongos) les permiten sintetizar carotenoides, que son un tipo de pigmentos que el resto de animales sólo podemos obtener de la dieta.

Figura 15. Propuesta de cuadros de texto a introducir en los libros de texto, sobre aportaciones al conocimiento de la evolución importantes, pero quizás no apropiadas para tener una subsección propia; o ejemplos relevantes de esas aportaciones (b). De izquierda a derecha las ideas abordadas son las siguientes: a) exaptación (izda.); b) hipótesis 2R (centro); y c) transferencia genética horizontal (dcha.). El ejemplo de los pulgones proviene de Moran y Jarvik (2010).

La adición de nuevos contenidos, dado el conocido problema de sobrecarga del currículo, podría hacer necesaria la reducción de otros contenidos ya existentes. Empero, a pesar de que varios autores hayan sugerido aumentar el peso de la evolución en el currículo de secundaria o incluso de primaria (p.ej., Vázquez-Ben, 2015) dada su centralidad en la biología, el presente trabajo no permite asegurarlo debido a su limitado alcance; aunque es una posibilidad.

10. Evolución y religión

Para terminar, y aunque no ha sido posible abordar este tema en el aula, como se comentó al principio del TFM, se ha de tener en cuenta que las creencias religiosas de los alumnos son un importante factor de rechazo de la evolución, posiblemente estando detrás de la falta de resultados en las preguntas de aceptación de la evolución. Al respecto, hay autores que consideran importante tenerlas en cuenta o incluso abordarlas directamente para así mejorar los resultados. Así, Barnes y Brownell (2017) recomiendan, entre otras cosas, describir el rango de puntos de vista acerca de la relación entre religión y evolución y ser explícito respecto a la potencialidad compatibilidad entre ambas. Para ello, ofrecen la evolución agnóstica y la llamada evolución teísta como únicas posturas viables, opciones que, refutada ya el creacionismo y la hipótesis del diseño inteligente, parece importante conocer. De estas posturas, el evolucionismo teísta es el sostenido por el ya citado Dobzhansky (1973), frente al creacionismo en su sentido habitual, cuando habla de la evolución es el método de Dios para llevar a cabo la Creación. En esa línea, Novo (2019), en quien se inspira este TFM, propone que Dios habría creado el universo de tal manera que pudiera dar lugar a la vida y a la mente de forma autónoma. De lo contrario, si interviniera en la evolución, como sostiene el diseño inteligente, no sería auténticamente un

Dios que diera sentido a todo sino un dios mago o ingeniero que cometería errores y sería responsable de enfermedades e injusticias. Por tanto, el actuar de Dios debería estar a otro nivel que no comprendemos.

De acuerdo con lo expuesto, el evolucionismo teísta podría ofrecer una explicación más o menos convincente para la compatibilidad entre evolución y Creación. Sin embargo, opino que si se profundiza en el asunto aparecen conflictos con otros puntos de la doctrina católica que esta explicación teísta no resolvería, o al menos no tan convincentemente. De esta forma, cabría preguntarse si hay alguna evidencia de cambio brusco en la transición evolutiva entre animales y personas, dada su importancia para explicar la libertad humana y la inmortalidad del alma. Es por este motivo que uno de mis intereses de cara a realizar este TFM ha sido estudiar el fenómeno de la saltación. Como se ha comentado, el saltacionismo es un término que sería conveniente eliminar como sinónimo de la teoría de los equilibrios interrumpidos; pero el fenómeno que describe sigue considerándose plausible tras diversos eventos. En el caso del hombre, Tattersall (2002), por ejemplo, afirma que los *Homo sapiens* de comportamiento moderno pudieron surgir por saltación, en cierto sentido del término, a partir de *Homo sapiens* anatómicamente modernos, pudiendo representar su comportamiento un ejemplo de exaptación. Estudios posteriores, sin embargo, parecen contradecir esa tesis tanto de cara a la aparición del lenguaje humano moderno (Muszynski, 2015) como a la de materiales culturales simbólico y ciertas innovaciones tecnológicas (d'Errico y Stringer, 2011). Desde el punto de vista genético, es interesante notar, como aparece en el libro de texto ox2º09 al hablar de mutaciones cromosómicas y genómicas, que el cromosoma 2 de los seres humanos parece proceder de la fusión de dos cromosomas ancestrales que todavía conservan los primates superiores actuales. Sin embargo, aunque este libro da una gran importancia evolutiva a las fusiones cromosómicas en general, en la actualidad todavía se desconocen a ciencia cierta los efectos que pudo tener esta fusión concreta (ver Ruiz, 2017) y, de cualquier forma, se ha descubierto que compartimos dicha fusión con el hombre de Denisova y, probablemente también, con el de Neandertal (Meyer *et al.*, 2012). Algo similar ocurre con la versión moderna del «gen del lenguaje» FOXP2 (gen, por cierto, con efectos relacionado con el desarrollo), como menciona Novo (2019). A pesar de esto, también se ha observado, en comparación con el genoma neandertal, que los *H. sapiens* poseemos ciertos genes únicos con ciertas funciones cognitivas aún sin resolver (Stringer, 2011, citado en d'Errico y Stringer, 2011). De cualquier forma, es llamativo que, como indican los libros de texto revisados, actividades más o menos típicamente humanas hayan aparecido secuencialmente a lo largo de nuestro linaje, como es el caso de la fabricación de herramientas de piedra, el dominio del fuego, posibles distintos grados del habla o el enterramiento de los muertos (en este caso en una rama paralela, la del *Homo neanderthalensis*). De todo lo anterior parece desprenderse un origen gradual del ser humano, cosa que, si no me equivoco, el propio Novo (2019) parece reconocer; y probablemente también se desprende que el linaje humano siempre estuvo formado por poblaciones de varios individuos.

En relación con lo anterior, otros dogmas cristianos importantes también parecen tener difícil compatibilización con la evolución. Así, por ejemplo, diversas explicaciones al pecado original se han propuesto recientemente en relación con los conocimientos científicos actuales (p.ej.: Bonnette, 2015; Herce, 2015; Suarez, 2016). Algunas de estas versiones parecen compatibles con la doctrina tradicional, pero dejan cuestiones abiertas o constan de puntos poco verosímiles desde el punto de vista científico; mientras que otras parecen alejarse claramente de la ortodoxia (p.ej., Domning, 2008). En consecuencia, se propone que se ha de conocer la existencia de estas dificultades de compatibilización de cara a la enseñanza de la evolución en ámbitos católicos.

11. Conclusiones

La importancia de la deriva genética junto con la evo-devo, la exaptación y la importancia de la duplicación génica constituyen cuatro aportaciones al ámbito de la evolución que, por su carácter general, por afectar a postulados importantes de la síntesis evolutiva moderna y por su importancia para comprender la macroevolución, y con ella la historia de la vida en la Tierra, es conveniente introducir en la educación secundaria. A pesar de deber mantenerse siempre la centralidad de la enseñanza de la selección natural, estas necesarias actualizaciones del tema deben incorporarse al temario aunque sea discretamente, contemplando para ello la posibilidad de resumir otros puntos del currículo y los libros de texto o de ampliar el espacio dedicado a la evolución.

Las nuevas metodologías, tales como vídeo-cuestionarios o juegos, ofrecen un amplio rango de posibilidades para estudiar las mencionadas aportaciones a la evolución que todavía parece haber sido escasamente explotado en la educación secundaria española e incluso en la internacional. La creciente utilización y flexibilidad de las nuevas tecnologías y metodologías hace posible y necesario ampliar las propuestas y la investigación en esta área de la enseñanza; aunque se debe analizar cuidadosamente la efectividad y conveniencia de aplicar las posibles novedades metodológicas en cada caso.

Por último, si mi investigación es correcta, actualmente existen dificultades para conciliar la evolución con la doctrina católica a las cuales todavía no se ha dado una solución unánime y satisfactoria. En consecuencia, si se cree oportuno abordar estas cuestiones en clase, se recomienda incidir en la naturaleza de la ciencia y en las evidencias que apoyan la evolución; comentar el estado provisional de la cuestión y la existencia de diversas soluciones propuestas; y, si se considera conveniente, ofrecer el evolucionismo teísta como una explicación habitual y posiblemente legítima a la evolución en general desde el punto de vista de la religión.

12. Agradecimientos

Quiero agradecer este trabajo a mi tutor Bosco, que tanta ayuda (y tutorías) me ha dado y con tan buen talante; a Pablo Alvira, profesor de Biología y Geología de 1º de Bachillerato, que se mostró siempre dispuesto a atenderme y, sin apenas conocerme, me cedió generosamente dos sesiones de su asignatura para sus dos clases; al alumnado de 1º de Bachillerato, por su trabajo durante las sesiones y su amabilidad; al personal de la biblioteca de la UPNA, por su amabilidad y diligencia; a Francisco Javier Novo, por lo que me enseñó en el Grado y por darme a conocer sus opiniones y su libro, en el que tanto me he apoyado en este trabajo; y, por su puesto, a mi madre, mis tías, mis hermanas y demás familiares y amigos que me han apoyado a lo largo del proceso de realización del trabajo.

13. Bibliografía

Abraham, J., Perez, K., Downey, N., Herron, J. y Meir, E. (2012). Short lesson plan associated with increased acceptance of evolutionary theory and potential change in three alternate conceptions of macroevolution in undergraduate students. *CBE—Life Sciences Education*, 11(2), pp.152-164.

ajuiciado (2008). *La evolución del flagelo*. [vídeo] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=bhl-clAMMfs> [Accedido 16 mar. 2019].

Archibald, J. (2015). Endosymbiosis and eukaryotic cell evolution. *Current Biology*, 25(19), pp.R911-R921.

- Barbadilla, A. (1999). La selección natural: "Me replicó, luego existo". *Evolución y Filogenia de Arthropoda*, (26), pp.605-612.
- Barberá, Ó., Sanchis, J. y Sendra, C. (2011). La evolución biológica en los libros de texto de Educación Secundaria y Bachillerato. Situación actual. En: M. González y A. Baratas, eds., *Investigación y didáctica para las aulas del siglo XXI: experiencias docentes y estrategias de innovación educativa para la enseñanza de la biología y la geología. Actas del I Congreso de docentes de Ciencias de la Naturaleza*. Madrid: Santillana, pp.115-128.
- Barnes, M. y Brownell, S. (2017). A call to use cultural competence when teaching evolution to religious college students: Introducing religious cultural competence in evolution education (ReCCEE). *CBE—Life Sciences Education*, 16(4), pp.1-10.
- Bateman, R. y DiMichele, W. (2002). Generating and filtering major phenotypic novelties: neoGoldschmidtian saltation revisited. En: C. B. Cronk, R. M. Bateman, y J. A., Hawkins, eds., *Developmental Genetics and Plant Evolution*. Londres: Taylor y Francis, pp.109–159.
- Biologydictionary.net (2019). *Genetic drift - Definition, examples and causes*. [en línea] Disponible en: <https://biologydictionary.net/genetic-drift/> [Accedido 25 may. 2019].
- Bonnette, D. (2015). The rational credibility of a literal Adam and Eve. *Espíritu LXIV*, 150, pp.303-320.
- Boto, L. (2010). Horizontal gene transfer in evolution: Facts and challenges. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1683), pp.819-827.
- Brown, C. (2016). Modeling macroevolution with invented creatures. *The American Biology Teacher*, 78(2), pp.141-148.
- Calavia, D. y García, M. (2017). *UNStat4Excel*. Pamplona, España: Universidad de Navarra. Disponible en: <https://www.unav.edu/departamento/bioquimicagenetica/unstat-es> [Accedido 20 sept. 2017].
- Castillero, O. (s.f.). *Conductismo y constructivismo en psicología: bases teóricas y diferencias*. [en línea] Psicologiaymente.com. Disponible en: <https://psicologiaymente.com/psicologia/conductismo-constructivismo-psicologia> [Accedido 11 jun. 2019].
- Cháves, G. (2010). ¿Enseñamos Evo-Devo?: Implicaciones de las nuevas hipótesis sobre evolución biológica y su incidencia en la escuela. *Bio-grafía: Escritos sobre la biología y su enseñanza*, 3(4), pp.155-166.
- Claramonte, V. (2010). Cómo ilustrar que el diseño inteligente no es Biología sino pseudociencia. *eVOLUCIÓN*, 5(2), pp.43-54.
- Crow, K. y Wagner, G. (2006). What is the role of genome duplication in the evolution of complexity and diversity? *Molecular Biology and Evolution*, 23(5), pp.887-892.
- d'Errico, F. y Stringer, C. (2011). Evolution, revolution or saltation scenario for the emergence of modern cultures? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1567), pp.1060-1069.
- Deterding, S., Dixon, D., Khaled, T. y Nacke, L. (2011). From game design elements to gamefulness: Defining "gamification". En: A. Lugmayr, H. Franssila, C. Safran, I.

Hammouda, eds., *Proceedings of the 15th international academic MindTrek conference: envisioning future media environments*. Tampere: ACM, pp. 9-15.

- Di Lelio, I., Illiano, A., Astarita, F., Gianfranceschi, L., Horner, D., Varricchio, P., Amoresano, A., Pucci, P., Pennacchio, F. y Caccia, S. (2019). Evolution of an insect immune barrier through horizontal gene transfer mediated by a parasitic wasp. *PLOS Genetics*, 15(3), artículo e1007998.
- Dobzhansky, T. (1973). Nothing in biology makes sense except in the light of evolution. *The American Biology Teacher*, 35(3), pp.125-129.
- Domning, D. (2008). A new interpretation of original sin. En: D. P. Domning y, J. F. Wimmer, eds., *Evolution and original sin: Accounting for Evil in the world*. Herndon, VA: The Alban Institute, pp.55-72.
- Dorrell, M. (2019). Teaching evo-devo with Legos: It's not the genes you have, it's how you use them. *The American Biology Teacher*, 81(2), pp.120-125.
- Dunn, C., Leys, S. y Haddock, S. (2015). The hidden biology of sponges and ctenophores. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(5), pp.282-291.
- Dupré, J. (2009). Más allá del darwinismo. *Ciencia Hoy*, 19(113), p. 8-9.
- Eldredge, N. y Gould, S. (1972). Punctuated equilibria: An alternative to phyletic gradualism. En: T. J. M. Schopf, ed., *Models in paleobiology*. San Francisco: Freeman, Cooper y Company, pp.82-115.
- Encyclopædia Britannica. (s.f.). *Polyploidy | genetics*. [en línea] Disponible en: <https://www.britannica.com/science/polyploidy> [Accedido 11 jun. 2019].
- Evolution.berkeley.edu. (s.f.). *¡Bienvenido a la Evolución 101!* [en línea] Disponible en: https://evolution.berkeley.edu/evolibrary/article/0_0_0/evo_01_sp [Accedido 8 jun. 2019].
- Fernández, J. y Sanjosé, V. (2007). Permanencia de ideas alternativas sobre Evolución de las Especies en la población culta no especializada. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 21, pp.129-149.
- Folguera, G. y González Galli, L. (2012). La extensión de la síntesis evolutiva y los alcances sobre la enseñanza de la teoría de la evolución. *Bio-grafía: Escritos sobre la biología y su enseñanza*, 5(9), pp.4-18.
- Freitas, R., Gómez-Marín, C., Wilson, J., Casares, F. y Gómez-Skarmeta, J. (2012). Hoxd13 contribution to the evolution of vertebrate appendages. *Developmental Cell*, 23(6), pp.1219-1229.
- Gallego, A. y Muñoz, A. (2015). Análisis de las hipótesis evolutivas en alumnos de Educación Secundaria y Bachillerato. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 14(1), pp.35-54.
- Gil, A., Mayoral, L. y Sara, C. (2015). Concepciones alternativas sobre evolución en estudiantes de secundaria. En: *IV Jornadas de Enseñanza e Investigación Educativa en el campo de las Ciencias Exactas y Naturales*. Ensenada, Argentina: Universidad Nacional de La Plata.

Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Departamento de Ciencias Exactas y Naturales.

- González, D., Jeong, J., Airado, D. y Cañada, F. (2016). Performance and perception in the flipped learning model: An initial approach to evaluate the effectiveness of a new teaching methodology in a general science classroom. *Journal of Science Education and Technology*, 25(3), pp.450-459.
- González, D., Jeong, J., Cañada, F., y Gallego, A. (2017). La enseñanza de contenidos científicos a través de un modelo «*flipped*»: Propuesta de instrucción para estudiantes del Grado de Educación Primaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 35(2), pp.71-87.
- González, L. y Meinardi, E. (2013). ¿Está en crisis el darwinismo? Los nuevos modelos de la biología evolutiva y sus implicaciones didácticas. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, (27), pp.219-234.
- González, M. (2015). *Origen y evolución de los seres vivos. La inmersión a la cultura científica con el alumnado de 4º de ESO en la asignatura de Biología y Geología*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad de Cádiz.
- Gould, S. y Vrba, E. (1982). Exaptation—a missing term in the science of form. *Paleobiology*, 8(1), pp.4-15.
- Gould, S. (1982). Perspectives on evolution. En: R. Milkman, ed., *The meaning of punctuated equilibrium and its role in validating a hierarchical approach to macroevolution*. Sunderland, MA: Sinauer Associates, pp.83-104.
- Hall, B. (2003). Evo-devo: Evolutionary developmental mechanisms. *The International Journal of Developmental Biology*, 47(7-8), pp.491-495.
- Harlen, W. (2010). *Principios y grandes ideas de la educación en ciencias*. Hatfield, Reino Unido: Association for Science Education.
- Herce, R. (2015). Religion, science, and culture on human origins. *European Journal of Science and Theology*, 11(4), pp.29-42.
- Hoekstra, H. y Coyne, J. (2007). The locus of evolution: Evo devo and the genetics of adaptation. *Evolution*, 61(5), pp.995-1016.
- IHMC (2019). *CmapTools v6.03.01*. Disponible en: <https://cmap.ihmc.us/cmaptools/>
- Kampourakis, K. y Minelli, A. (2014). Evolution makes more sense in the light of development. *The American Biology Teacher*, 76(8), pp.493-498.
- Keeling, P. (2014). The impact of history on our perception of evolutionary events: Endosymbiosis and the origin of eukaryotic complexity. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 6(2), artículo a016196.
- Kimura, M. (1983). *The neutral theory of molecular evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lande, R. (1976). Natural selection and random genetic drift in phenotypic evolution. *Evolution*, 30(2), p.314-334.

- Larson, G., Stephens, P., Tehrani, J. y Layton, R. (2013). Exapting exaptation. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(9), pp.497-498.
- Lecointre, G., Fortin, C., Bénéteau, A., Haessig, T. y Visset, D. (2009). *Guide critique de l'évolution*. París: Belin, pp.305-311.
- Lee, T., Grogan, K. y Liepkalns, J. (2017). Making evolution stick: Using sticky notes to teach the mechanisms of evolutionary change. *Evolution: Education and Outreach*, 10(1), pp.1-13.
- Lynch, M. (2007). The frailty of adaptive hypotheses for the origins of organismal complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(suppl.1), pp.8597-8604.
- Macías, K., Zazueta, V., Mendoza, C., Rangel, A. y Padilla, F. (2008). Epigenética, más allá de la genética. *Acta Universitaria*, 18(1), pp.50-56.
- Mackintosh, C. y Ferrier, D. (2018). Recent advances in understanding the roles of whole genome duplications in evolution [version 2; referees: 2]. *F1000Research*, 6, artículo 1623.
- Magadum, S., Banerjee, U., Murugan, P., Gangapur, D. y Ravikesavan, R. (2013). Gene duplication as a major force in evolution. *Journal of Genetics*, 92(1), pp.155-161.
- Martínez, M. y Andrade, E. (2014). Constreñimientos, variación evolutiva y planos corporales. *Signos Filosóficos*, 16(31), pp.63-96.
- Meruane, M., Smok, C. y Rojas, M. (2012). Desarrollo de cara y cuello en vertebrados. *International Journal of Morphology*, 30(4), pp.1373-1388.
- Meyer, M., Kircher, M., Gansauge, M., Li, H., Racimo, F., Mallick, S., Schraiber, J., Jay, F., Prufer, K., de Filippo, C., Sudmant, P., Alkan, C., Fu, Q., Do, R., Rohland, N., Tandon, A., Siebauer, M., Green, R., Bryc, K., Briggs, A., Stenzel, U., Dabney, J., Shendure, J., Kitzman, J., Hammer, M., Shunkov, M., Derevianko, A., Patterson, N., Andres, A., Eichler, E., Slatkin, M., Reich, D., Kelso, J. y Paabo, S. (2012). A high-coverage genome sequence from an archaic Denisovan individual. *Science*, 338(6104), pp.222-226.
- Molina, A. (s.f.). *Simbiosis*. Ana Molina. [en línea]. Disponible en: <https://anamolina.weebly.com/biologiacutea-y-geologiacutea-1ordm-bach.html#> [Accedido 11 abr. 2019].
- Montoya, C. (2012). *¿Cómo evolucionan los seres vivos?* Trabajo de Fin de Máster. Universidad Pública de Navarra.
- Moran, N. y Jarvik, T. (2010). Lateral transfer of genes from fungi underlies carotenoid production in aphids. *Science*, 328(5978), pp.624-627.
- Moriyama, Y. y Koshiba-Takeuchi, K. (2018). Significance of whole-genome duplications on the emergence of evolutionary novelties. *Briefings in Functional Genomics*, 17(5), pp.329-338.
- Muñoz, R. (2005). Evo-Devo: Hacia un nuevo paradigma en Biología Evolutiva. *Encuentros en la Biología*, (100).
- Muszynski, E. (2015). *Recursion, saltation, but not communication? A critique of Chomsky's language evolution theory*. Tesis del Máster en Filosofía. Université du Québec á Montréal.

- Nadelson, L. y Sinatra, G. (2010). Shifting acceptance of evolution: Promising evidence of the influence of the *Understanding Evolution* website. *The Researcher*, 23(1), pp.13-29.
- Novo, J. (2019). *Evolución. Para creyentes y otros escépticos*. 1ª ed. Madrid: Rialp.
- Quispe-Huamanquispe, D., Gheysen, G. y Kreuze, J. (2017). Horizontal gene transfer contributes to plant evolution: The case of agrobacterium T-DNAs. *Frontiers in Plant Science*, 8, artículo 2015.
- Papp, T. (2017). Gamification effects on motivation and learning: Application to primary and college students. *International Journal for Cross-Disciplinary Subjects in Education*, 8(3), pp.3193-3201.
- Pujolàs, P. y Lago, J. (coords.) (2011). *El programa CA/AC ("Cooperar para aprender / aprender a cooperar") para enseñar a aprender en equipo. Implementación del aprendizaje cooperativo en el aula*. Barcelona: Universidad de Vic. Disponible en: <http://www.elizalde.info/wp-content/uploads/izapideak/CA-ACprograma.pdf> [Accedido 01 abr. 2019]
- Price, R. y Perez, K. (2016). Beyond the adaptationist legacy: Updating our teaching to include a diversity of evolutionary mechanisms. *The American Biology Teacher*, 78(2), pp.101-108.
- Ren, R., Wang, H., Guo, C., Zhang, N., Zeng, L., Chen, Y., Ma, H. y Qi, J. (2018). Widespread whole genome duplications contribute to genome complexity and species diversity in angiosperms. *Molecular Plant*, 11(3), pp.414-428.
- Rivas, M. y González García, F. (2016). ¿Comprenden y aceptan los estudiantes la evolución? Un estudio en bachillerato y universidad. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias.*, 13(2), pp.248-263.
- Ruiz, M. (2017). *El origen de la especie humana: ¿Una fusión cromosómica?* [en línea] OpenMind. Disponible en: <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/biociencias/el-origen-de-la-especie-humana-una-fusion-cromosomica/> [Accedido 7 jun. 2019].
- Sanmartí, N. (1997). Enseñar y aprender ciencias: Algunas reflexiones. En: N. Sanmartí y R. Pujol eds., *Guías Praxis para el profesorado de la ESO (G.P.P). Ciencias de la Naturaleza*. Barcelona: Praxis, pp.1-35.
- Scharmman, L. (2005). A proactive strategy for teaching evolution. *The American Biology Teacher*, 67(1), pp.12-16.
- Staub, N. (2002). Teaching evolutionary mechanisms: Genetic drift and M&M's®. *BioScience*, 52(4), pp.373-377.
- Suarez, A. (2016). "Transmission at generation": Could original sin have happened at the time when *Homo sapiens* already had a large population size? *Scientia et Fides*, 4(1), pp.253-294.
- Tamayo, M. (2010). Dificultades en la enseñanza de la evolución biológica. *eVOLUCIÓN*, 5(2), pp.23-27.
- Tattersall, I. (2002). The case for saltational events in human evolution. En: T. J. Crow, ed., *The speciation of modern Homo sapiens*. Oxford: Oxford University Press, pp.49-59.

- Theißen, G. (2006). The proper place of hopeful monsters in evolutionary biology. *Theory in Biosciences*, 124(3-4), pp.349-369.
- Theißen, G. (2009). Saltational evolution: Hopeful monsters are here to stay. *Theory in Biosciences*, 128(1), pp.43-51.
- Uyeda, J., Arnold, S., Hohenlohe, P. y Mead, L. (2009). Drift promotes speciation by sexual selection. *Evolution*, 63(3), pp.583-594.
- Van de Peer, Y., Maere, S. y Meyer, A. (2010). 2R or not 2R is not the question anymore. *Nature Reviews Genetics*, 11(2), p.166.
- Vázquez-Ben, L. (2015). La evolución biológica en la educación primaria española, un contenido pendiente. *Revista de Estudios e Investigación en Psicología y Educación*, Extr.(06), pp.153-157.
- Weeks, A., Stoklosa, J. y Hoffmann, A. (2016). Conservation of genetic uniqueness of populations may increase extinction likelihood of endangered species: The case of Australian mammals. *Frontiers in Zoology*, 13(1), artículo 31.
- Williams, K. y Williams, C. (2011). Five key ingredients for improving student motivation. *Research in Higher Education Journal*, 2, pp.104-122. 12(3), pp.1-23
- Wikipedia (2019). *Especiación alopátrica*. [en línea] Es.wikipedia.org. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Especiaci%C3%B3n_alop%C3%A1trica [Accedido 4 jun. 2019].
- Zander, R. (2010). Taxon mapping exemplifies punctuated equilibrium and atavistic saltation. *Plant Systematics and Evolution*, 286(1-2), pp.69-90.
- Zimmer, C. (2019). *Mammals made by viruses - The Loom*. [en línea] Discover Magazine. Disponible en: <http://blogs.discovermagazine.com/loom/2012/02/14/mammals-made-by-viruses/#.XOz6mxt7meF> [Accedido 28 may. 2019].
- Zudaire, M. I. (2016). *¿Debe incorporarse la epigenética al currículum de la educación secundaria?* Trabajo de Fin de Máster. Universidad Pública de Navarra.

13.1. Legislación

- DECRETO FORAL 25/2007, de 19 de marzo, por el que se establece el currículum de las enseñanzas de las enseñanzas de la Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Foral Navarra. Boletín Oficial de Navarra número 65, de 25 de mayo de 2007.
- DECRETO FORAL 49/2008, de 12 de mayo, por el que se establecen la estructura y el currículum de las enseñanzas del bachillerato en la Comunidad Foral de Navarra. Boletín Oficial de Navarra número 70, de 6 de junio de 2008.
- DECRETO FORAL 24/2015, de 22 de abril, por el que se establece el currículum de las enseñanzas de Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Foral de Navarra. Boletín Oficial de Navarra número 127, de 2 de julio de 2015.
- DECRETO FORAL 25/2015, de 22 de abril, del Gobierno de Navarra, por el que se establece el currículum de las enseñanzas del Bachillerato en la Comunidad Foral de Navarra. Boletín Oficial de Navarra número 127, de 2 de julio de 2015.

Anexo 1. Cuestionario del principio de las sesiones de evolución

Nombre y apellidos:

Sección:

Responde a las siguientes preguntas. En las preguntas de tipo test marca sólo una opción, la que te parezca más correcta. Cuando se pida, indica la seguridad de tu respuesta redondeando el número de la tabla que corresponda, del 0 al 3.

1. Pregunta. Si, como se ha demostrado, los mamíferos provenimos de los reptiles ¿por qué sigue habiendo reptiles? *Inspirado en Novo (2019)*.

Idea abordada: Idea alternativa de progreso de unas especies contemporáneas menos evolucionadas a otras más evolucionadas y evaluación de la comprensión de la evolución.

2. Pregunta. La evolución de los seres vivos —*pregunta extraída de Fernández y Sanjosé (2007)*—:

- a) **No tiene ningún objetivo. Respuesta correcta.**
b) Se produce con el objetivo de perfeccionar las especies.
c) A veces se produce con el objetivo de degradar alguna especie.

Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

Idea abordada: Idea alternativa de la evolución con dirección predefinida u objetivo (teleología).

3. Pregunta. Según las teorías científicas actuales, las serpientes no tienen patas, a diferencia del resto de reptiles, porque —*pregunta extraída de Fernández y Sanjosé (2007)*—:

- a) No las han usado durante muchas generaciones, ya que aprendieron a obtener sus recursos vitales arrastrándose sobre la hierba.
b) **El debilitamiento y pérdida de las patas supuso una ventaja para su reproducción en sus hábitats naturales. Respuesta correcta.**
c) Sufrieron por accidente una radiación catastrófica que causó una mutación en todas las serpientes prehistóricas, perdiendo las patas en pocas generaciones.

Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

Idea abordada: Idea alternativa del uso y desuso como motor evolutivo (Iamarckismo).

4. Pregunta. Las poblaciones de los organismos evolucionan...
- a) Sólo por selección natural, de forma que sobreviven o se reproducen más los más aptos.
 - b) Por selección natural, azar y otros mecanismos. No siempre los más aptos prevalecen. *Respuesta correcta.***
 - c) Para poder sobrevivir mejor.
- Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

Idea abordada: Conocimiento de la deriva genética.

5. Pregunta. Dentro de una línea evolutiva, la evolución de unas especies a otras...
- a) Sucede siempre de forma gradual, lenta y constante.
 - b) No sucede.
 - c) En ocasiones, sucede de forma más bien rápida para después estar un largo periodo sin grandes cambios. *Respuesta correcta.***
- Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

Idea abordada: Conocimiento del patrón descrito por la teoría de los equilibrios interrumpidos.

6. Pregunta. ¿Has oído hablar de la teoría de los equilibrios puntuados o interrumpidos?
- a) Sí.
 - b) No.
- Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

7. Pregunta. En evolución a veces se distingue entre cambios pequeños y graduales dentro de una especie o población (microevolución), y grandes cambios que dan lugar a nuevas especies, géneros, familias... (macroevolución) ¿Crees que ambos tipos de cambios suceden por los mismos mecanismos (pequeñas mutaciones, selección...), sólo que a diferente escala de tiempo?
- a) Sí.
 - b) No siempre. *Respuesta correcta.***
 - c) No.
- Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

Idea abordada: Procesos específicamente macroevolutivos y crítica al gradualismo excesivo.

8. Pregunta. Atendiendo al registro fósil, se piensa que durante mucho tiempo las plumas de los ancestros de las aves no servían para volar ni para planear. ¿Cómo pudieron aparecer por evolución? ¿Cómo llegaron a servir para el vuelo?

Idea abordada: Concepto de exaptación.

9. Pregunta. Aparatos como relojes, ordenadores, etc. están formados por muchas piezas que se necesitan unas a otras. El aparato se construye de una sola vez con todas las piezas necesarias funcionando coordinadamente. Ahora pensemos en un órgano tan complejo como un ojo, formado por muchas piezas (iris, cristalino, retina, nervio óptico, etc.), funcionando coordinadamente todas a la vez. Es imposible explicar su existencia a partir de la acumulación progresiva de elementos por azar a lo largo de millones de años. *Pregunta extraída de Fernández y Sanjosé (2007).*

a) Estoy de acuerdo.

b) No estoy de acuerdo. Respuesta correcta.

Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

Idea abordada: Hipótesis pseudocientífica del diseño inteligente.

10. Pregunta. Acepto la teoría de la evolución —*pregunta extraída de Rivas y González (2016)*—:

- a) En su totalidad.
- b) En su mayor parte.
- c) Sólo algunas veces.
- d) Sólo un poco.
- e) Nada en absoluto.

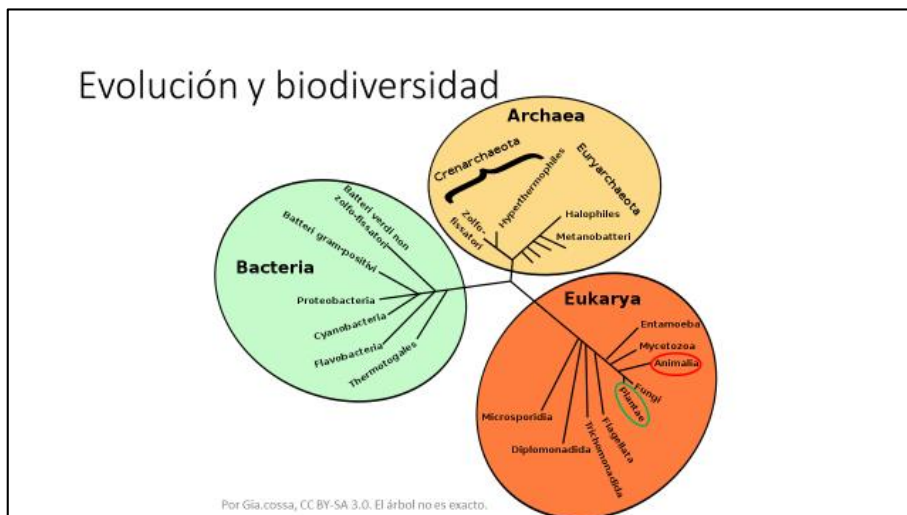
11. Pregunta. Creo que la teoría de la evolución es —*pregunta extraída de Rivas y González (2016)*—:

- a) Compatible con mis creencias personales.
- b) En ocasiones entra en conflicto con mis creencias personales.
- c) Muchas veces entra en conflicto con mis creencias personales.
- d) Nunca podré creer en la teoría de la evolución.
- e) No lo tengo claro, pero me interesa saber más sobre el problema.

Anexo 2. Diapositivas expuestas durante la primera sesión de evolución

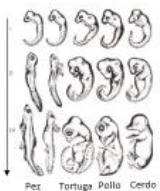

Evolución biológica: Nuevas aportaciones



Juan Franco Goyena



Introducción

- La **evolución** es un **hecho**
- **Actualmente** se explica por la **teoría sintética** (neodarwinismo)
 - Darwinismo + genética +...
 - Acumulación gradual de pequeñas mutaciones
 - Genética de poblaciones
- **Neodarwinismo no explicaría bien ciertos procesos**


+

+
...

*Imágenes de dominio público

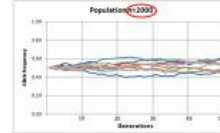
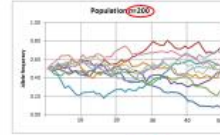
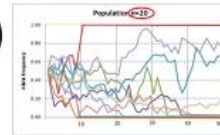
Críticas a cierto neodarwinismo (1)

- **Exagerar** el papel de la **selección natural**
- También existe la **deriva genética**
 - Cambios *al azar* en una población
 - Fuerte en *poblaciones pequeñas*

↓
Evolución a veces parte de **grupos pequeños**



Por OpenStax CNX, CC BY



Por Professor marginalla. Trabajo propio, CC BY-SA 3.0.

Críticas a cierto neodarwinismo (2)

- **Gradualismo excesivo**
 - Defiende ritmo lento, constante y uniforme
- Frente a esto: teoría de los **equilibrios interrumpidos**



Ginkgo biloba

Por James Field (Jame), CC BY-SA 3.0.



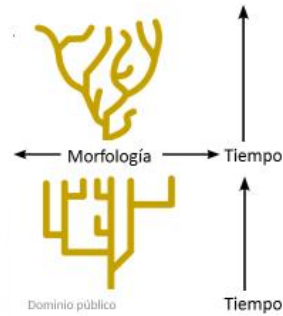
Celacanto

Por Mordcaï 1998, CC BY-SA 4.0.



«Cangrejo» cacerola

Dominio público

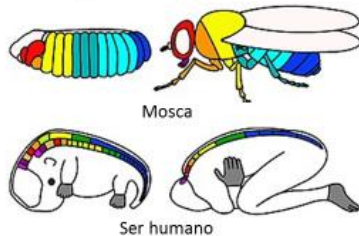


Dominio público

Teoría de la evolución: Nuevas aportaciones

- **Evo-devo** (evolución+desarrollo)

Expresión de **genes Hox**

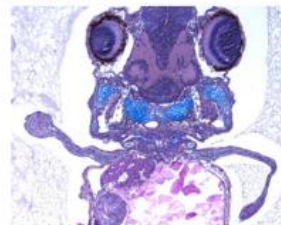


Por Stefanie D. Hueber, Georg F. Weiller, Michael A. Djordjevic, Tancred Frickoy, CC BY 4.0.

sinc
La ciencia es noticia

El gen que facilitó la transición de aletas a patas

CSIC | 10 diciembre 2012 10:00



Fuente: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/El-gen-que-facilito-la-transicion-de-aletas-a-patas>

Teoría de la evolución: Nuevas aportaciones (2)

- Concepto de «exaptación»

EL ESPAÑOL



Descubren una cola de dinosaurio conservada en ámbar, y tiene plumas

Fuente: <https://omicrono.elespanol.com/2016/12/cola-de-dinosaurio-en-ambar/>

EVOLUTION

Did neurons arise from an early secretory cell?

Cell lineage studies of comb jellies and other creatures may suggest a single ancient origin of the nervous system

By Elizabeth Pennisi, in *Times, Florida*

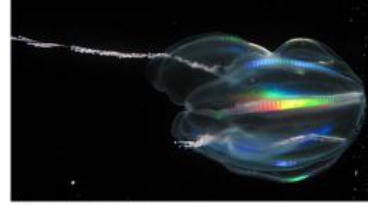
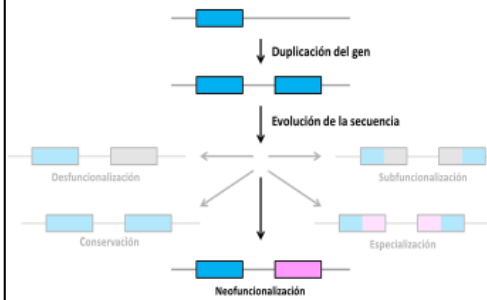


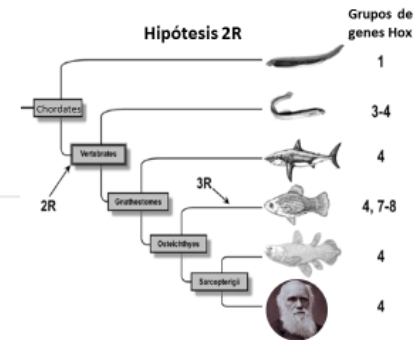
Imagen de dominio público.

Teoría de la evolución: Nuevas aportaciones (3)

- Papel de las duplicaciones génicas



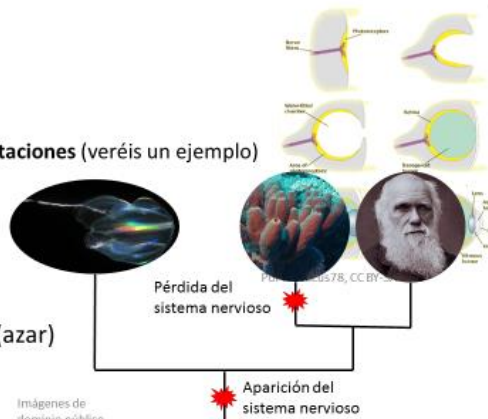
Fuente de la imagen original: <http://www.personal.psu.edu/rua15/research.html>



Esquema por Lynch VJ, Wagner GP. Artículo científico de PLoS Genetics. 2009 Ene;5(1):e1000349. Epub 2009 Jan 23. CC BY 2.5

Ideas finales

- No «diseño inteligente»
 - Selección natural clásica
 - Diseños malos
 - Evo-devo, duplicaciones y **exaptaciones** (veréis un ejemplo)
- La evolución **no es progreso**
 - ...es exploración
- **No hay dirección** predefinida (azar)



Imágenes de dominio público.

Bibliografía base

- Novo, J. (2019). *Evolución. Para creyentes y otros escépticos*. 1ª ed. Madrid: Rialp.



Gracias por vuestra atención

¿Alguna pregunta?

Folio giratorio

CONOCIMIENTOS APRENDIDOS DE EVOLUCIÓN

A.

B.

C.

Anexo 4. Preguntas y explicaciones insertos en el vídeo-cuestionario

Vídeo-cuestionario sobre la complejidad irreducible

Puntos disponibles: 6

1. Minuto (00:09)

Este es un vídeo-cuestionario en el que irán saliendo preguntas a responder. Por favor, respóndelas con atención. Si lo necesitas, puedes pausar el vídeo o volver hacia atrás y después volver a ir hacia adelante hasta donde te habías quedado; pero no podrás acelerar el vídeo ni saltarte preguntas. Tampoco podrás volver a responder a las preguntas si te has equivocado.

En este vídeo de YouTube saldrán muchos nombres (Nicholas Matzke, sintasa, secretinas...) por los que no se va a preguntar. Tan sólo hay que entender las ideas generales.

(Sin puntos)

2. Minuto (00:15)

En este vídeo vamos a hablar del diseño inteligente y, de paso, repasar ciertas cosas que vimos en clase.

En este caso veremos cómo se refuta el argumento de la complejidad irreducible, que dice que si un sistema (como, por ejemplo, el ojo humano) tiene muchas partes y todas ellas hacen falta para que funcione, no puede haber evolucionado por selección natural a partir de sistemas más sencillos. Esto sería así porque esos sistemas previos serían inútiles y habrían sido eliminados por selección natural.

Pero ¿es este un argumento válido? Veamos el caso del flagelo bacteriano, que es el latiguillo que, al girar rápido, permite que ciertas bacterias se desplacen.

(Sin puntos)

3. Minuto (00:59)

¿A qué concepto evolutivo que hemos visto te recuerda el «principio» del que habla el vídeo en este fotograma? Pista: es una de las tres «nuevas aportaciones» del PowerPoint que he expuesto en clase. Responde en una palabra. _____ (*Respuesta: Exaptación, exaptación*)

(Puntos: 1)

4. Minuto (01:46)

¿Con qué función están relacionadas las estructuras vistas hasta ahora y el sistema que van formando? (**Respuesta correcta en negrita**)

(Puntos: 1)

- A. Adhesión de la bacteria al sustrato (que se pegue a una superficie)
- B. Desplazamiento de la bacteria
- C. Transporte de proteínas a través de una o más membranas y/o de la pared celular**
- D. Ninguna de las anteriores

5. Minuto (02:27)

¿Qué función hace ahora el sistema? ¿A qué función ayuda el que el *pilus* (esa estructura de bolitas rojas) pueda moverse? (**Respuesta correcta en negrita**)

(Puntos: 1)

- E. Adhesión de la bacteria al sustrato (que se pegue a una superficie) (Correcta)**
- F. Desplazamiento de la bacteria
- G. Transporte de proteínas a través de una o más membranas y/o de la pared celular
- H. Ninguna de las anteriores

6. Minuto (03:07)

Finalmente, ¿qué función pasa a desempeñar el sistema? **(Respuesta correcta en negrita)**

(Puntos: 1)

- A. Adhesión de la bacteria al sustrato (que se pegue a una superficie)
- B. Desplazamiento de la bacteria (Correcta)**
- C. Transporte de proteínas a través de una o más membranas y/o de la pared celular
- D. Ninguna de las anteriores

7. Minuto (03:45)

Fíjate en que habla de homólogos. ¿Recuerdas las homologías, que has dado en clase este año y que son una prueba de la evolución? ¿Te acuerdas de que la pata de un perro y el ala de un murciélago tienen similar estructura (húmero, cúbito, radio...), aunque hagan cosas distintas (andar y volar) porque tienen el mismo origen evolutivo? Pues lo mismo pasa con las estructuras bacterianas que han ido apareciendo en el vídeo y las partes del flagelo bacteriano. Como se muestra, se piensa que esas estructuras se fueron juntando y modificando hasta producir el flagelo.

(Sin puntos)

8. Minuto (03:60)

¿Cuántas funciones ha desempeñado el sistema que ha dado lugar al flagelo a lo largo de su evolución? ¿Cuántas veces la selección natural ha perfeccionado el sistema para que hiciera mejor su función? Responde con un número. _____(Respuesta: Tres, tres, 3)

(Puntos: 1)

9. Minuto (04:08)

En este momento del vídeo se menciona un proceso clave visto en la charla de clase. Este proceso permite disponer de dos copias de un gen: una copia que siga haciendo su función original, puesto que es necesaria para el organismo; y otra copia que pueda mutar y adquirir una función nueva. ¿De qué proceso se trata? Responde en dos palabras. _____(Respuesta: Duplicación génica/duplicación génica)

(Puntos: 1)

10. Minuto (04:08)

Recuerda que los genes tienen la información para sintetizar las proteínas; y un gen modificado puede suponer sintetizar una proteína modificada.

(Sin puntos)

11. Minuto (04:33)

Ahora que ya has visto el vídeo, deberías haber entendido el concepto de exaptación, que es la respuesta a la primera pregunta.

Una exaptación es una estructura de un ser vivo que desempeña una función, pero que ha evolucionado a partir de otra estructura que desempeñaba una función distinta. El flagelo del vídeo es un ejemplo de exaptación.

¿Lo has entendido? ¿Te parece ahora que el flagelo es demasiado complejo para formarse por evolución?

(Sin puntos)

Anexo 5. Juego realizado en la segunda sesión de evolución

Simulación de un caso de la evolución

Este juego es una modificación de los propuestos por Lecointre *et al.* (2009).

Enunciado común

Las semillas de una especie de planta llegan arrastradas por un fuerte viento a un pequeño islote donde antes no habitaba esa especie. Seis de ellas llegan a adultas, pues en ese pequeño entorno no hay recursos suficientes para que pueda vivir un número mayor de plantas adultas. De esas seis, dos tienen las flores rojas (tipo A), otras dos las tienen amarillas (tipo B) y las últimas dos las tienen azules (tipo C). Esto se debe a que tienen distintas versiones (alelos) del gen que determina el color de las flores. Cada planta la vamos a representar con una ficha de un color, como se indica en la Figura 1.

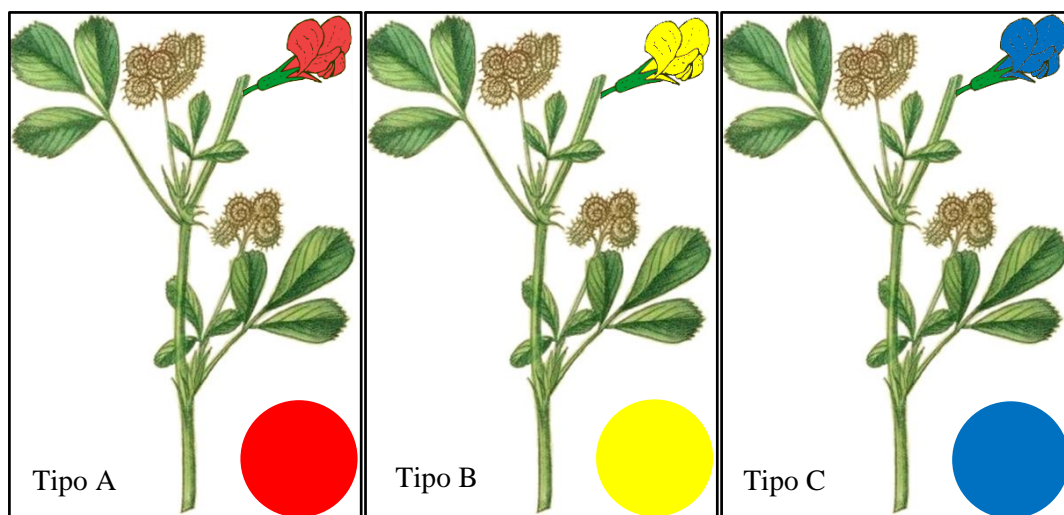


Figura 1. Tipos de plantas del ejercicio y color de las fichas que las representan. Imágenes modificadas de las originales. La imagen original de la flor es de dominio público y la del resto de la planta es de dominio público en Estados Unidos, en su país de origen y en países donde el término del *copyright* es la vida del autor más 70 años o menos.

Cada planta produce un número de semillas que varía al azar, dependiendo de las circunstancias y condiciones ambientales que afecten a esa planta. Estas plantas son anuales (viven un año) y mueren tras producir sus semillas. De todas las semillas, sólo seis pueden llegar a adultas puesto que no hay recursos suficientes para más, como ya se ha dicho. Para simplificar más la simulación, diremos que cada planta sólo produce plantas de su mismo tipo (de su mismo color de flor). Esto se debe a que, como en el islote no existen los insectos que polinizan a esta especie, sus flores se autopolinizan.

Materiales

Los materiales utilizados **por cada grupo de cuatro alumnos** serán los siguientes:

- Fichas de parchís, lacasitos u otros objetos pequeños de igual tamaño y forma entre sí pero distinto color. Debe haber al menos 30 de cada color. En el ejercicio de la selección natural, debe haber 60 para el color rojo, ya que tira el doble de dados (se puede usar otro color similar si hiciera falta, como, por ejemplo, el naranja).
- Al menos un par de dados.
- Tres recipientes donde colocar las fichas de cada color. En este caso, vasos de plástico.
- Una bolsa donde mezclar las fichas.
- Ficha para anotar los resultados y hacer la gráfica.
- Bolígrafos, lápices o rotuladores de tres colores, una regla y una hoja.

Bibliografía

Lecointre, G., Fortin, C., Bénétiau, A., Haessig, T. y Visset, D. (2009). *Guide critique de l'évolution*. París: Belin, pp.305-311.

Islote. Imagen modificada de JoRdi 2008, CC BY-SA.



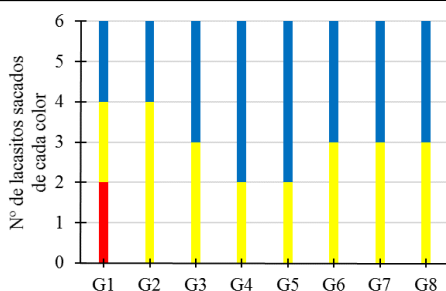
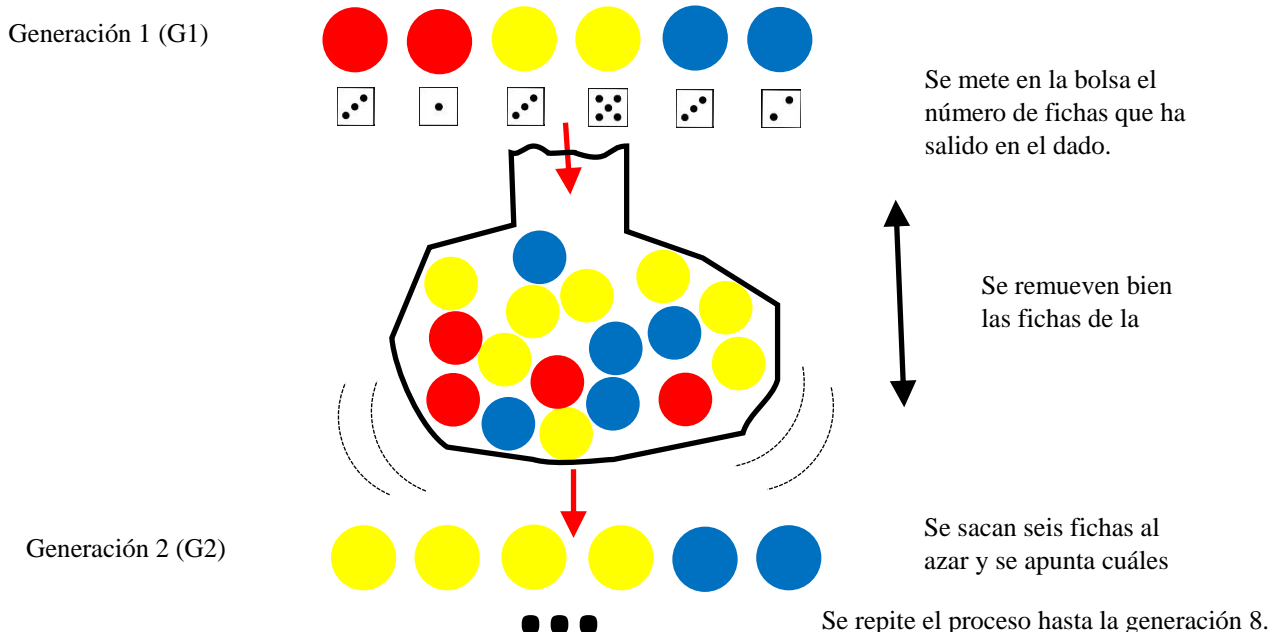
Ejercicio 1. Simulación de la deriva genética

Este ejercicio lo vais a realizar la mitad de la clase, colocándoos en grupos de cuatro personas. En cada grupo, una persona anotará los resultados de los pasos de la simulación y las demás se ocuparán cada una de las fichas de un color, tirando los dados que le toquen a sus fichas y preparando el número de sus fichas que hagan falta cada vez. Si uno de los colores dejara de aparecer, la persona responsable de él se ocupará de dibujar la gráfica o ayudará al resto.

En este ejercicio vamos a simular que las plantas se reproducen durante siete años; y que los distintos tipos de planta tienen **la misma capacidad para sobrevivir y reproducirse** en ese entorno. Los pasos a seguir en la simulación son los siguientes (ver Figura 2, abajo):

1. Se tirará **un dado por cada una de las seis fichas**. El resultado del dado de cada ficha representa el número de semillas que ha producido esa planta adulta.
2. Se introducirá en una bolsa tantas fichas de cada color como los números que hayan sacado las fichas de ese color en los dados. Las fichas de la bolsa representan las semillas de cada tipo.
3. Se agitará la bolsa de forma que se mezclen las fichas y se sacarán de ella seis fichas al azar. Las fichas sacadas representan las semillas que llegan a adultas.
4. Se vaciará la bolsa y se repetirá el proceso hasta llegar a la octava generación de adultos, contando la generación original como la primera.
5. Se irán anotando los resultados de los dados y los colores de las seis fichas sacados cada vez.
6. Se irán representando en una gráfica en una hoja, a ser posible cuadriculada, los resultados de cada generación de adultos (ver Figura 2). Para ello, se utilizarán bolígrafos de distintos colores.

Si un color de ficha no aparece entre las seis escogidas en un momento dado, ese tipo de planta dejará de aparecer: Su alelo habrá desaparecido de la población. Si en un momento las seis plantas adultas son sólo de un tipo se acabará el juego: Ese alelo se habrá «fijado» en la población.



Se va haciendo la gráfica con el número de fichas extraídas cada vez para representar las distintas generaciones de plantas adultas.

Figura 2. Ejemplo de pasos a seguir en el ejercicio y de gráfica del ejercicio completo.

Ejercicio 2. Simulación de la selección natural

Este ejercicio lo vais a realizar la otra mitad de la clase, colocándoos en grupos de cuatro personas. En cada grupo, una persona anotará los resultados de los pasos de la simulación y las demás se ocuparán cada una de las fichas de un color, tirando los dados que le toquen a sus fichas y preparando el número de sus fichas que hagan falta cada vez. Si uno de los colores dejara de aparecer, la persona responsable de él se ocupará de dibujar la gráfica o ayudará al resto.

En este ejercicio vamos a simular que las plantas se reproducen durante siete años; y que los distintos tipos de planta tienen la misma capacidad para sobrevivir, pero **distinta capacidad para reproducirse** en ese entorno, puesto que, p.ej., unos absorben mejor que otros un nutriente escaso del suelo necesario para producir las semillas. Los pasos a seguir en la simulación son los siguientes (ver Figura 2, abajo):

1. Se tirarán **dos dados por cada ficha roja** y **un dado por cada ficha amarilla o azul** de las seis. El **resultado del dado de los azules se dividirá entre dos**, redondeando para arriba (p.ej., un 5 cuenta 3). El resultado de cada ficha representa el número de semillas que ha producido esa planta.
2. Se introducirá en una bolsa tantas fichas de cada color como los números que hayan sacado las fichas de ese color en los dados. Las fichas de la bolsa representan las semillas de cada tipo.
3. Se agitará la bolsa de forma que se mezclen las fichas y se sacarán de ella seis fichas al azar. Las fichas sacadas representan las semillas que llegan a adultas.
4. Se vaciará la bolsa y se repetirá el proceso hasta llegar a la octava generación de adultos, contando la generación original como la primera.
5. Se irán anotando los resultados de los dados y los colores de las seis fichas sacadas cada vez.
6. Se irá representando en una gráfica en una hoja, a ser posible cuadrículada, los resultados de cada generación de adultos (ver Figura 2). Para ello, se utilizarán bolígrafos de distintos colores.

Si un color de ficha no aparece entre las seis escogidas en un momento dado, ese tipo de planta dejará de aparecer: Su alelo habrá desaparecido de la población. Si llega un momento en el que las seis plantas adultas son sólo de un tipo se acabará el juego: Ese alelo se habrá «fijado» en la población.

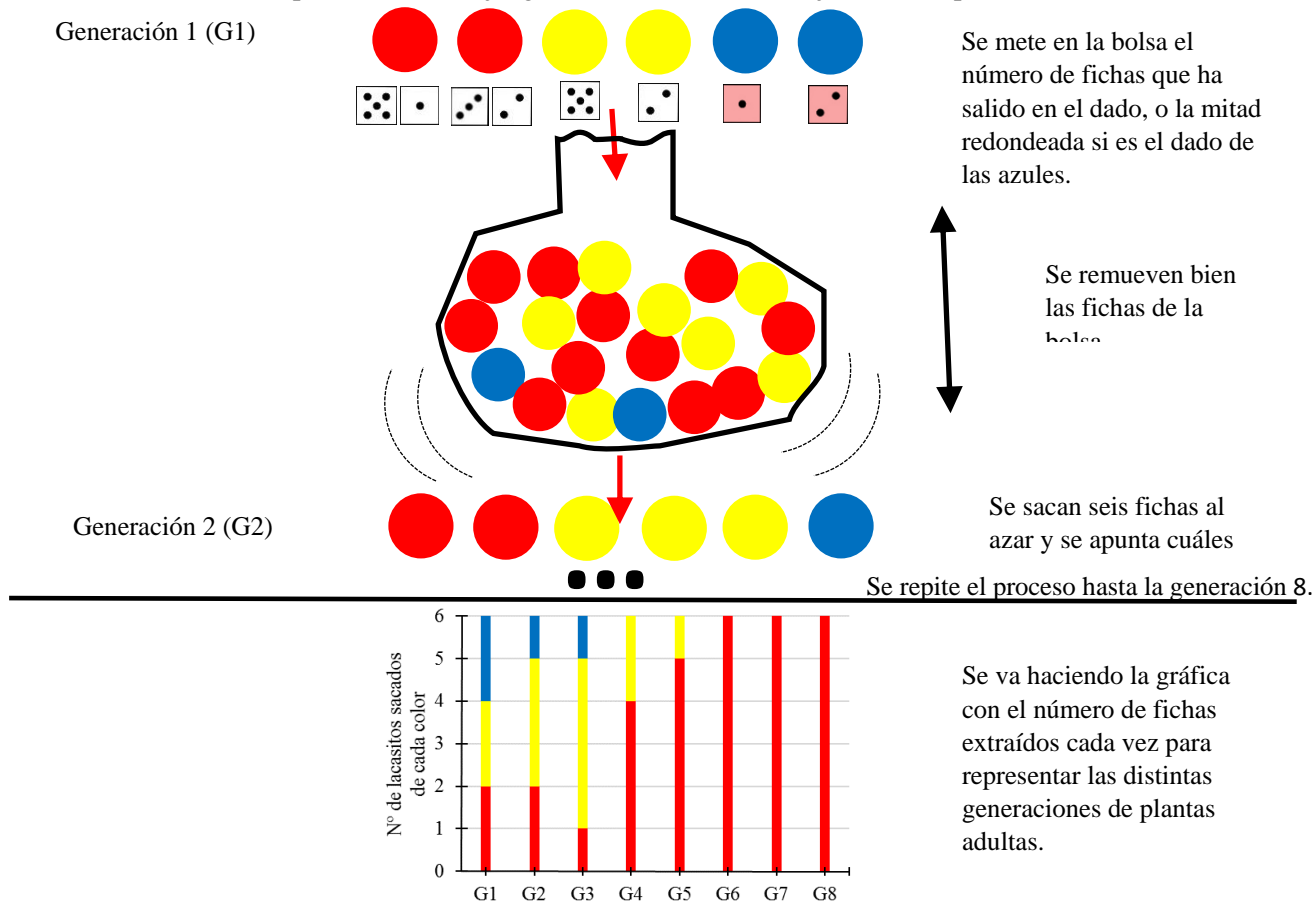


Figura 3. Ejemplo de pasos a seguir en el ejercicio y de gráfica del ejercicio completo.

Ejemplo de tabla de la simulación de la deriva genética rellena

	Fichas Rojas	Fichas Amarillas	Fichas aZules
G1 (generación adulta 1)	RR	AA	ZZ
Dados	3-1	3-5	3-2
Suma	4	8	5
G2		AAAA	ZZ
Dados		4-5-5-6	4-6
Suma		20	10
G3		AAA	ZZZ
Dados		3-1-4	2-1-6
Suma		8	9
G4		AA	ZZZZ
Dados		3-5	1-6-4-6
Suma		8	16
G5		AA	ZZZZ
Dados		3-6	4-1-5-3
Suma		9	13
G6		AAA	ZZZ
Dados		1-3-5	3-6-4
Suma		9	13
G7		AAA	ZZZ
Dados		4-2-1	1-5 3
Suma		7	9
G8		AAA	ZZZ

Ejemplo de tabla de la simulación de la selección natural rellena

	Fichas Rojas	Fichas Amarillas	Fichas aZules
G1 (generación adulta 1)	RR	AA	ZZ
Dados	5-1-3-2	5-2	1-2
Suma	11	7	<u>2</u>
G2	RR	AAA	Z
Dados	5-4-1-5	3-6-6	6
Suma	15	15	<u>3</u>
G3	R	AAAA	Z
Dados	4-4	3-3-1-3	5
Suma	8	10	<u>3</u>
G4	RRRR	AA	
Dados	5-5-4-6-3-3	4-4	
Suma	26	8	
G5	RRRRR	A	
Dados	4-6-4-6-4-2-6-2-5-6	3	
Suma	45	3	
G6	RRRRRR		
Dados			
Suma			
G7	RRRRRR		
Dados			
Suma			
G8	RRRRRR		

Tabla para el juego de simulación

	Fichas Rojas	Fichas Amarillas	Fichas azules
G1 (generación adulta 1)	RR	AA	ZZ
Dados			
Suma			
G2			
Dados			
Suma			
G3			
Dados			
Suma			
G4			
Dados			
Suma			
G5			
Dados			
Suma			
G6			
Dados			
Suma			
G7			
Dados			
Suma			
G8			
Dados (opcional)	(opcional)	(opcional)	(opcional)
Suma			
G9			
Dados			
Suma			
G10			
Dados			
Suma			
G11			
Dados			
Suma			

Anexo 6. Cuestionario del final de las sesiones de evolución

Nombre y apellidos:

Sección:

Responde a las siguientes preguntas. En las preguntas test marca sólo una opción, la que te parezca más correcta. Cuando lo indique, redondea también el número del 0 al 1 para indicar la seguridad de tu respuesta.

1. *(Análoga a la 1 del cuestionario inicial)* Pregunta. Los seres vivos menos evolucionados son las bacterias y otros seres microscópicos, luego las plantas, después los invertebrados, después los vertebrados y, finalmente el hombre, que es el más evolucionado de todos los seres vivos. ¿Estás de acuerdo? Explica por qué. *Pregunta extraída de Fernández y Sanjosé (2007).*

Idea abordada: Idea alternativa de progreso de unas especies contemporáneas menos evolucionadas a otras más evolucionadas y evaluación de la comprensión de la evolución.

2. *(Análoga a la 8 del cuestionario inicial)* Pregunta. Define el concepto de exaptación y pon un ejemplo.

Idea abordada: Concepto de exaptación.

3. *(Análoga a la 2 del cuestionario inicial)* Pregunta. Los seres vivos evolucionan...

- a) Para ser cada vez más complejos.
- b) Los individuos no evolucionan; sólo las poblaciones. *Respuesta correcta.***
- c) Para adaptarse al medio.

Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

Idea abordada: Población como unidad evolutiva e idea alternativa de evolución con objetivo (teleología).

4. *(Análoga a la 5 del cuestionario inicial)* Pregunta. Explica brevemente cómo es el ritmo al que se produce la evolución, por un lado, según algunos neodarwinistas y, por otro lado, según la teoría de los equilibrios interrumpidos.

5. *(Análoga a la 3 del cuestionario inicial)* Pregunta. Los humanos tenemos menos pelo que los otros primates porque —pregunta extraída de Fernández y Sanjosé (2007)—:

- a) Ya no lo necesitamos para protegernos del frío, lo cual atrofia sus raíces generación tras generación.
- b) Ha supuesto una ventaja reproductiva perder pelo, y esa energía se emplea en otras funciones. Respuesta correcta.**
- c) Agentes mutágenos en el ambiente, aún no controlados.

Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

Idea abordada: Idea alternativa de la necesidad y el uso y desuso como motor evolutivo (lamarckismo).

6. *(Análoga a la 4 del cuestionario inicial)* Pregunta. ¿Conoces algún mecanismo o fuerza evolutiva, aparte de la selección natural, que cambie las proporciones de los alelos (versiones de un mismo gen) en una población y que sea muy importante en poblaciones pequeñas? Si conoces alguno, nómbralo y explica en qué consiste.

Idea abordada: Deriva genética.

7. *(Análoga a la 9 del cuestionario inicial)* Pregunta. El oído de los seres humanos es muy complejo, pues está formado por varias partes (tímpano, huesecillos, etc.) que deben actuar coordinadamente para que funcione. Posiblemente, si eliminaras cualquiera de esas partes todo el oído dejaría de funcionar. Sin embargo, se ha formado poco a poco, acumulando modificaciones a lo largo de millones de años e incorporando partes del cuerpo que antes tenían una función distinta. Todos esos pasos intermedios aumentaban el éxito reproductivo del ser vivo que poseía este órgano. *Pregunta modificada a partir de la original de Fernández y Sanjosé (2007).*

- a) De acuerdo. Respuesta correcta.**
- b) En desacuerdo

Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

Idea abordada: Hipótesis pseudocientífica del diseño inteligente y concepto de exaptación.

8. (Análoga a la 7 del cuestionario inicial) Pregunta. Actualmente se piensa que los animales con simetría bilateral (que tienen lado derecho y lado izquierdo simétricos, como nosotros) provienen de animales con simetría radial (que son simétricos respecto a un eje, como las medusas). ¿Cómo crees que sucedió esto?

- a) Por acumulación lenta y progresiva de pequeñas mutaciones.
- b) Es un fenómeno inexplicable hasta la actualidad.
- c) **Por cambios en la expresión de los genes que controlan el desarrollo. Respuesta correcta.**

Indica el grado de seguridad de tu respuesta.

0	1	2	3
Nada seguro	Poco seguro	Muy seguro	Totalmente seguro

Idea abordada: Evo-devo; cambios macroevolutivos por modificaciones en la secuencia o expresión de genes clave del desarrollo.

9. Pregunta. Acepto la teoría de la evolución —pregunta extraída de Rivas y González (2016)—:

- a) En su totalidad
- b) En su mayor parte
- c) Sólo algunas veces
- d) Sólo un poco
- e) Nada en absoluto

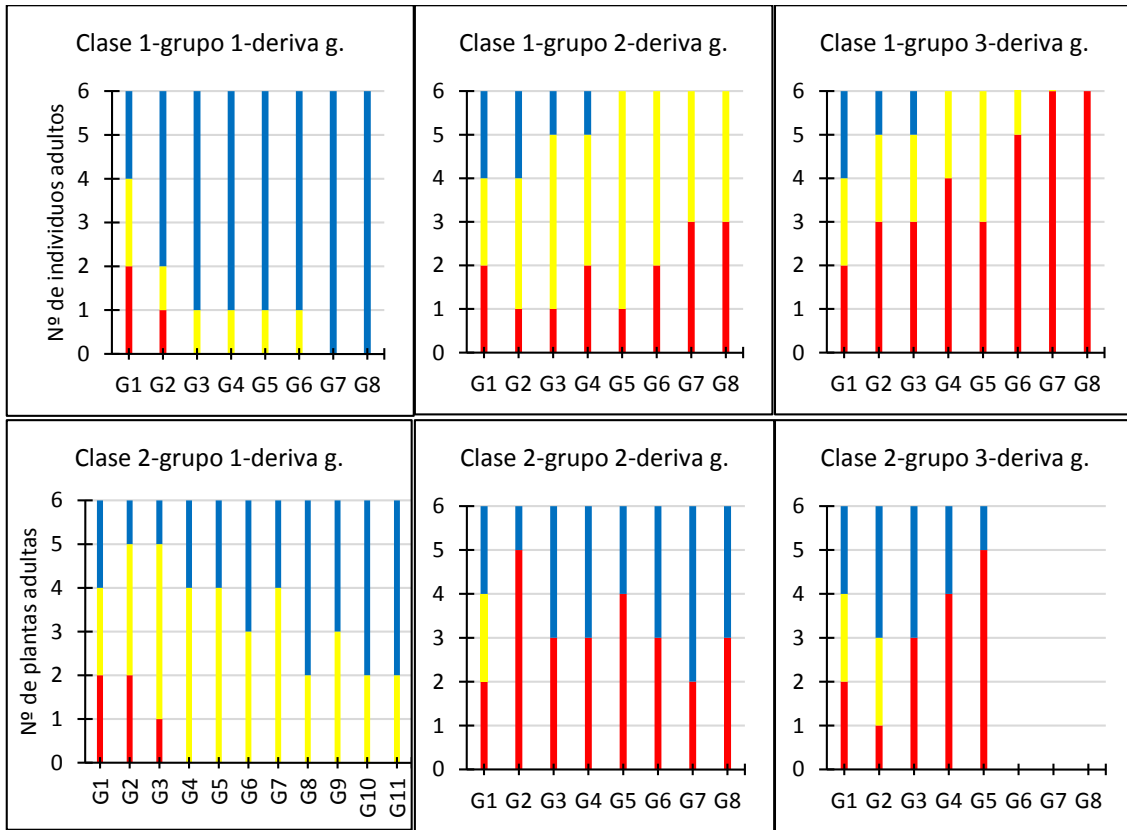
10. Pregunta. Creo que la teoría de la evolución es —pregunta extraída de Rivas y González (2016)—:

- a) Compatible con mis creencias personales.
- b) En ocasiones entra en conflicto con mis creencias personales.
- c) Muchas veces entra en conflicto con mis creencias personales.
- d) Nunca podré creer en la teoría de la evolución.
- e) No lo tengo claro, pero me interesa saber más sobre el problema.

11. Pregunta. ¿Qué te han parecido estas dos clases de evolución (interesantes, aburridas, muy complicadas, he aprendido...)? Explícate y escribe varios puntos positivos y negativos (o a mejorar) que se te ocurran de estas dos clases.

Anexo 7. Gráficas hechas con los datos de la simulación de los alumnos

Simulación de la deriva genética



Simulaciones de la selección natural

