



ugr | Universidad
de Granada

APLICACIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D Y LAS TIC AL DISEÑO DE MATERIAL DOCENTE PARA LA ENSEÑANZA DE LA EVOLUCIÓN.



Iván Fernández Bailón

Granada, septiembre de 2016



Universidad de Granada

**MÁSTER UNIVERSITARIO DE PROFESORADO DE EDUCACIÓN
SECUNDARIA OBLIGATORIA Y BACHILLERATO, FORMACIÓN
PROFESIONAL Y ENSEÑANZA DE IDIOMAS.**

[Especialidad Biología-Geología]

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**APLICACIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D Y LAS TIC AL DISEÑO DE MATERIAL
DOCENTE PARA LA ENSEÑANZA DE LA EVOLUCIÓN.**

Autor	V.B. Director
Fdo.: Iván Fernández Bailón	Fdo.: Ricardo Casas del Castillo

Resumen:

Este trabajo consiste en un banco de actividades para la enseñanza de la evolución biológica, principalmente de los aspectos que están relacionados con sus mecanismos y funcionamiento, haciendo énfasis en las evidencias que la apoyan y en la evolución humana. Partiendo de la detección de las ideas previas del alumnado, sobre las cuales tendrán que reflexionar en distintos momentos, se introducirán los diferentes contenidos mediante el uso de metodologías didácticas como la indagación, la contextualización científica y las actividades prácticas. Además, se ha creado abundante material didáctico específico mediante impresión 3D, que se utiliza junto con varios recursos TIC. Esto permite, no solamente facilitar la introducción de numerosos contenidos, sino mostrar ejemplos que clarifiquen los conceptos estudiados. Mediante el trabajo cooperativo se favorecerá el desarrollo del respeto, la comunicación y el trabajo en equipo. De esta manera, la educación del estudiante está dirigida hacia una mejor comprensión del trabajo científico y un desarrollo de su espíritu crítico para evaluar evidencias y trabajar mediante metodologías propias de las disciplinas científicas, en particular, de la Biología.

Palabras clave: Evolución, selección natural, anatomía comparada, fósiles, evolución humana, impresión 3D, aprendizaje cooperativo.

Abstract

This work consists of a bank of activities for the teaching of biological evolution, mainly of those facets related with its mechanisms and the way it works, and emphasizing the evidences that support it and human evolution. Starting from the detection of the student's misconceptions, about which they will have to think at different times, we will introduce the different contents using methodologies like inquiry-based learning, scientific contextualization and practical activities. Besides, we have created specific teaching materials using 3D printing, that is used together with many IT resources. This allows us, not just making easier the introduction of many contents, but showing examples that will clarify the concepts studied. By means of cooperative learning, the principles of respect, communication and teamwork will be improved. Thus, student's education will be directed to a better understanding of scientific work and the development of critical thinking for evidence assessment and working with typical methods of the scientific disciplines, and specifically, of Biology.

Keywords: Evolution, natural selection, evolution's evidences, comparative anatomy, fossils, human evolution, 3D printing, cooperative learning.

Contenido

1. Introducción y fundamentación teórica	1
1.1. Fundamentación científica	1
1.1.1. Evolución: mecanismos y evidencias.....	1
1.1.2. Evolución humana	5
1.2. Fundamentación didáctica	7
1.2.1. Dificultades en la enseñanza de la evolución.....	8
1.2.2. Alfabetización científica	12
1.2.3. Aproximación a la indagación	15
1.2.4. Aprendizaje cooperativo	17
1.2.1. Uso de las impresoras 3D en docencia.....	20
2. Contextualización curricular	24
3. Objetivos	26
4. Actividades	27
4.1. Estructura de las actividades	27
4.2. Resumen de las actividades	27
4.3. Actividades	31
Actividad 1	31
Actividad 2	35
Actividad 3	42
Actividad 4	48
Actividad 5	54
Actividad 6	60
Actividad 7	70
Actividad 8	83
5. Reflexión final y trabajo futuro	92
6. Bibliografía	94
ANEXOS	101
Anexo I- Glosario	101

Anexo II- Trasposición del artículo de Eiberg	105
Anexo III- Tablas estratigráficas que pueden servir de ayuda a los docentes.....	107

1. Introducción y fundamentación teórica

La evolución es un proceso complejo cuya enseñanza está establecida en el Real Decreto 1105/2014 por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato (2015), y cuya importancia es vital para comprender la construcción teórica fundamental de la biología moderna. Como ya dijo el eminente genetista ruso Theodosius Dobzhansky: “Nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución”.

Siendo fundamental la enseñanza de esta rama de la Biología, es conveniente desarrollar una serie de contenidos que la expliquen y que tengan en cuenta las dificultades encontradas al llevar a las aulas los conceptos involucrados, conociendo las concepciones previas que tienen los alumnos sobre este tema y qué metodologías podrían ayudar a una mejora de su comprensión.

La enseñanza de la evolución puede propiciar el uso de una correcta alfabetización científica y la introducción al alumnado en la metodología científica, además de corregir las posibles visiones deformadas que puedan tener sobre la labor de los científicos. Además, hay que tener en cuenta que es muy importante adquirir un conocimiento correcto del proceso de la evolución y sus mecanismos, ya que su malinterpretación puede dar lugar a ideas y movimientos sociales que fundamentan la segregación y el racismo de manera equívoca. Ejemplo de ello son teorías como el Darwinismo social, tan denunciado por biólogos evolucionistas como Stephen Jay Gould por servir de base teórica a ideologías que más tarde apoyarían a la masacre de millones de personas bajo unas interpretaciones incorrectas desde el punto de vista científico.

El uso de material de impresión 3D y otros recursos TIC en este campo representan herramientas útiles tanto en la enseñanza como en el aprendizaje de este tema, por lo que se ofrecen varias actividades que usan estos materiales con el objetivo de mejorar la calidad de la propuesta didáctica presentada.

1.1. Fundamentación científica

1.1.1. Evolución: mecanismos y evidencias

La gran diversidad biológica que presenta nuestro planeta ha sido estudiada a lo largo de la historia del ser humano. El origen de esta diversidad ha recibido explicación mediante diversas teorías, que se pueden englobar en fijismo, transformismo, y teorías

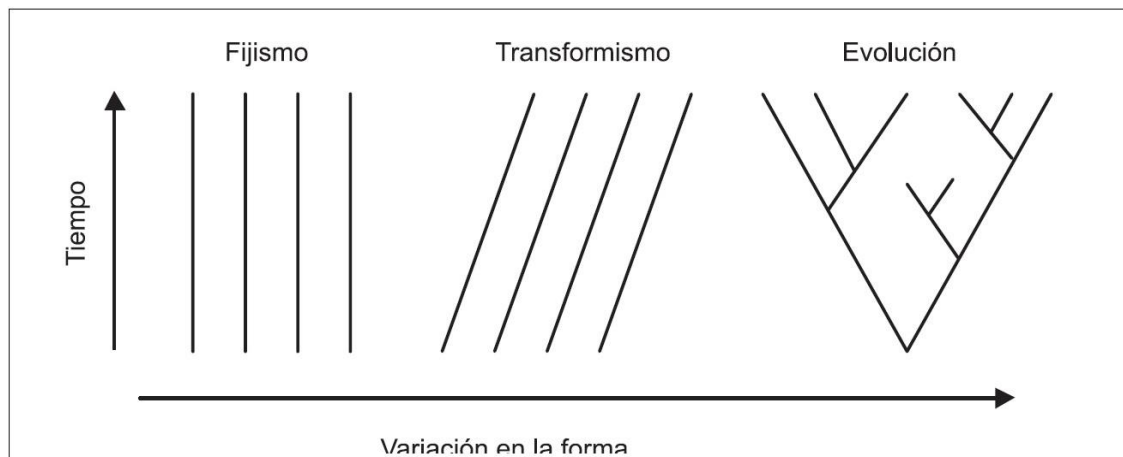


Ilustración 1. Fuente: Zamora (2002). Representación gráfica de fijismo, transformismo y evolución, según el paso del tiempo y la variación en la forma del organismo.

evolutivas. El fijismo defiende la inmutabilidad de las especies a lo largo del tiempo y el origen de los organismos vivos a partir de la creación divina, en contraposición al transformismo y las teorías evolutivas, que apoyan la idea del cambio de las especies con el tiempo, dando lugar a descendientes diferentes, como se representa en la ilustración 1. Por otra parte, las teorías evolutivas sugieren que la diversidad biológica actual se ha alcanzado gracias a modificaciones graduales en la descendencia a partir de un antecesor común, mientras que el transformismo propone el cambio de las especies a lo largo del tiempo a partir de un origen independiente (Zamora, 2002).

Los organismos estudiados en biología, con excepción de individuos clonados y hermanos gemelos, presentan una gran variación como consecuencia de cambios genéticos azarosos o por recombinación genética. Desde el punto de vista de las ideas evolutivas, si bien el azar tiene un importante papel en la producción de variación y en la evolución, los procesos no azarosos también son primordiales, ya que ninguna población es capaz de representar la variación genética que podría producirse por azar debido a la aleatoriedad de la recombinación y a que las poblaciones de organismos son finitas (Kutschera y Niklas, 2004).

Así pues, esta diversidad natural se caracteriza por la existencia de variedades de un mismo gen (alelos) cuya “decodificación” da lugar a una representación física de un determinado carácter (fenotipo). Si se considera que una población tiene una determinada frecuencia para un grupo de alelos, sólo habrá evolución si esa frecuencia cambia a lo largo de las generaciones. Este cambio de frecuencias puede darse por diferentes mecanismos que operan de diversas maneras, si bien el reconocido como más importante es el de la selección natural (Kocher, 2004).

Este cambio de las frecuencias dentro del acervo genético (“gene pool”, el conjunto de alelos de una población para un determinado gen) parte de su propia diversidad inicial dentro de una población de la misma especie. Sin embargo, dada esta variación entre organismos, se hace necesario diferenciar entre aquellos individuos que tienen una diversidad intraespecífica y aquellos otros que esta se debe a que pertenecen a diferentes especies. Mayr (1992) define a la especie como una comunidad de poblaciones que pueden realizar cruzamientos entre sí y que están separados reproductivamente de otras comunidades. Así pues, los fenómenos de especiación son procesos muy complejos que dependen de un determinado contexto, duración, grado de divergencia genética entre las especies hermanas, cómo se reparten estas los recursos disponibles (espacio incluido), localización y procesos estocásticos como la mutación, entre otros factores. Esto da lugar a una clasificación de los tipos de especiación, un proceso cuya causa final es la divergencia genética entre diferentes poblaciones o entre partes de una misma población (de Queiroz, 2005; Gavrilets, 2003).

De esta manera, hay un conjunto de procesos que han modificado la diversidad genética y las frecuencias alélicas en poblaciones de organismos, causando evolución. El considerado más importante es el de la selección natural, una teoría concebida de manera independiente a mitades del siglo XIX por Charles Darwin y Alfred Rusell Wallace y que quedó plasmada en el libro “*El Origen de las Especies*” en 1859. La ampliación y actualización de esta teoría, debida a los nuevos conocimientos en genética, vendría dada en el siglo XX de mano de evolucionistas como Weismann, Dobzhansky, Mayr o Huxley. En la actualidad sigue en expansión debido a la discusión de bastantes temas relacionados, como la selección sexual, las extinciones en masa o el equilibrio puntuado, entre otros. Sin embargo, la base de la selección natural no ha sufrido cambios. Como se ha dicho antes, la variación biológica de una especie puede modificarse por procesos aleatorios, pero también los no azarosos intervienen, ya que, en cada generación, las variantes genómicas menos aptas para un determinado medio son eliminadas de entre la descendencia. Aquellos que sobreviven y se reproducen podrán traspasar su información genética a la siguiente generación (Haldane, 1957; Kutschera y Niklas, 2004). Además, más allá de la supervivencia, siempre habrá diferencias de eficiencia reproductiva entre los diferentes genotipos de una población (concepto conocido como *fitness*), de forma que habrá una selección en la que unos individuos tengan caracteres que les facilite la reproducción (Orr, 2009).

Otro proceso no aleatorio que puede causar un cambio en la proporción de alelos es el apareamiento selectivo (“non-random mating”), como la consanguinidad, donde la no aleatoriedad de los apareamientos propicia la selección de ciertos alelos (Crow, 2010).

Otro mecanismo de importancia es la migración o flujo génico, que introduce nuevos alelos en una población debido a la llegada de individuos inmigrantes a esta (Morjan y Rieseberg, 2004)

Los procesos estocásticos también juegan un papel importante como mecanismos evolutivos. La deriva genética está relacionada con el azar, pues consiste en el cambio de frecuencias alélicas de una generación a otra a causa de una variación aleatoria de los alelos o de la pérdida de los mismos debido al azar (Der et al., 2011; Gillespie, 2001). Estos dos procesos, apareamiento aleatorio y deriva genética, suelen estar relacionados y ambos propician el camino hacia la homocigosidad y, en última instancia, la fijación de los alelos (Crow, 2010).

Otro proceso aleatorio es la mutación. Los errores del ADN, su procesamiento o su estructura pueden tener efectos perjudiciales, neutros o beneficiosos. Siempre que sean heredables, pueden dar lugar a cambios en la proporción alélica, acompañados de otros mecanismos como la selección natural, que escoge aquellos caracteres que resultan ventajosos en la reproducción y la supervivencia (Orr, 2003). Además, constituyen importantes fuentes de variación genética, al poder modificar el genotipo de manera aleatoria (Gillespie, 1984).

Como podemos ver, la evolución no es un proceso simple, sino que está mediado por complejos mecanismos cuyo contexto puede ser muy variable. Desde que Darwin dio a conocer su teoría de la selección natural, evolucionistas y científicos han investigado y descubierto gran cantidad de pruebas a su favor de todo . Las primeras evidencias que se encontraron correspondían a los campos de la biogeografía y la paleontología, y posteriormente se sumaron pruebas pertenecientes a las ramas de la anatomía y la embriología. Con el devenir de los años, las disciplinas más modernas, especialmente la genética, la bioquímica y la biología molecular, aportaron un número mayor de evidencias, y más exactas, lo que ha propiciado que la evolución esté considerada como una teoría bien establecida. Otras disciplinas, como la ecología, la fisiología o la etología también han aportado numerosas pruebas. La comparación de fósiles, partes anatómicas de los organismos, estadíos embrionarios o ADN de diferentes organismos, muestran en muchas especies emparentadas una homología, lo cual apoya la existencia de la evolución (Kutschera y Niklas, 2004; Zamora, 2002). Se pueden encontrar gran

cantidad de casos que representan numerosas evidencias a favor de la misma en Darwin y Mayr (1964), Hickman, Roberts, y Larson (1997), Azzaroli (1992), Majerus (1999) y Shubin, Daeschler y Coates (2004).

1.1.2. Evolución humana

La historia evolutiva del ser humano representa un camino intrincado, con gran variedad de especies, en los que se encuentran descubrimientos muy recientes y existen gran cantidad de huecos por cubrir. Actualmente el *Homo sapiens* es la única especie existente de su género, pero hay pruebas fósiles, que han salido a la luz de forma relativamente reciente (Wood, 2014), de que nuestro árbol evolutivo ha sido bastante diverso.

Los humanos modernos somos mamíferos placentarios pertenecientes a los primates, un grupo que incluye a prosimios (como los lémures, entre otros), simios (monos del viejo y del nuevo mundo, como el macaco y el mico, respectivamente) y los homínidos o primates superiores (gorilas, orangutanes, chimpancés, bonobos y humanos) (Pérez, 2012). Dentro de los homínidos (familia *Hominidae*), los chimpancés y bonobos se incluyen en la tribu de los paninos. Paninos y homininos pertenecen a la subfamilia *Homininae*, separados de los demás primates superiores (ver ilustración 2). La tribu de los homininos (*Hominini*) incluye a los australopitecinos (todos extintos) y a los representantes del género *Homo* (Subtribu *Hominina*), de los que sólo queda viva nuestra especie (Wood y Constantino, 2004).

Así pues, la separación entre primates superiores y homininos ocurrió hace aproximadamente 6 o 7 millones de años (Marques-Bonet et al., 2009), cuando aparecieron géneros como *Sahelanthropus* u *Orrorin*. Hace algunas décadas se creía que algunas especies de australopitecos dieron lugar a otras especies de *Homo*. Sin embargo, las pruebas fósiles recientes muestran que varios de estos géneros coexistieron, por lo que las hipótesis sobre la evolución humana tuvieron que ser reformuladas. Si bien se conocen ciertas relaciones entre los homininos, la falta de más evidencias fósiles hace difícil identificar a los antepasados directos de algunos de ellos, incluida nuestra especie (Wood, 2014). Las hipótesis propuestas señalan una diversidad de australopitecinos mayor que lo esperado (ver ilustración 3), y proponen a *A. anamensis* o *afarensis* como candidatos a antepasados comunes con otros australopitecos. Estos se diversificarían posteriormente en los tradicionalmente llamados australopitecos “gráciles” y “robustos”, correspondientes a los géneros

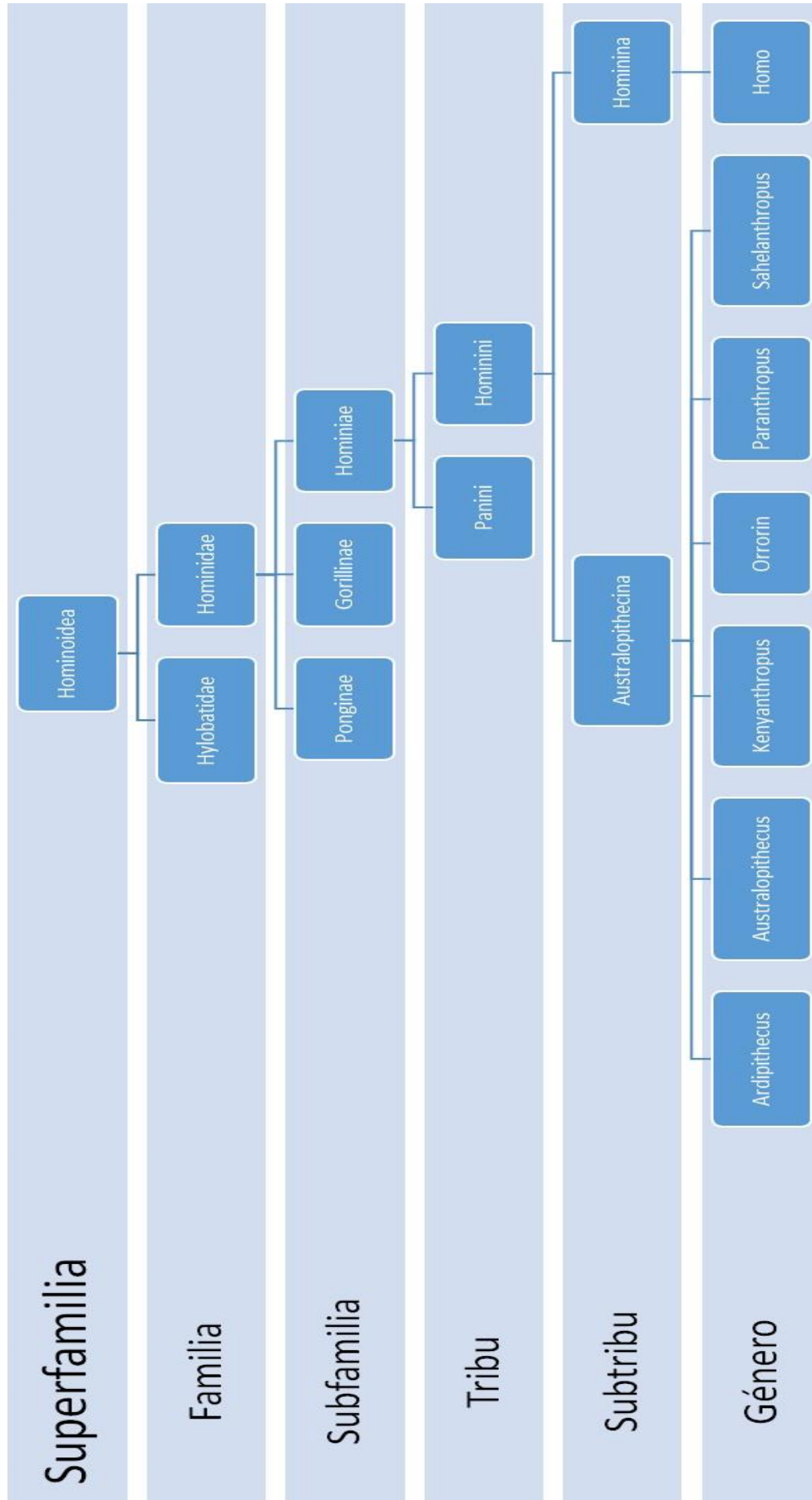


Ilustración 2. Árbol filogenético del ser humano. Adaptado de Wood y Constantino (2004).

Australopithecus y *Paranthropus*, respectivamente, y en otros géneros de australopitecinos recientemente encontrados (Wood y Richmond, 2000).

Los orígenes del género *Homo* son menos claros, aunque se discute si *Kenyanthropus platyops* podría ser un candidato a predecesor del género, ya que tenía características intermedias entre australopitecos y *Homo* (Leakey et al, 2001). Respecto a nuestra especie, *Homo sapiens*, Wood y Richmond (2000) muestran a *Homo antecessor* como antepasado en común con la línea de los neandertales, mientras que de estos sí se conocería su antepasado directo, el *Homo heidelbergensis*. El resto de especies del género *Homo* muestra una diversidad notable y además varias de ellas coexistieron, lo que nos indica que no “surgieron unas de otras” sino que hubo una ramificación de todas ellas a partir de un antecesor común aún en discusión (Wood, 2014).

1.2. Fundamentación didáctica

En este trabajo se presentan una serie de actividades que utilizan la tecnología de impresión 3D y las TICs. Además, se incorporan diversas metodologías recomendadas desde la Didáctica de las Ciencias Experimentales y las propuestas de Alfabetización Científica, orientadas a aumentar la motivación por estas disciplinas. Como ya se ha

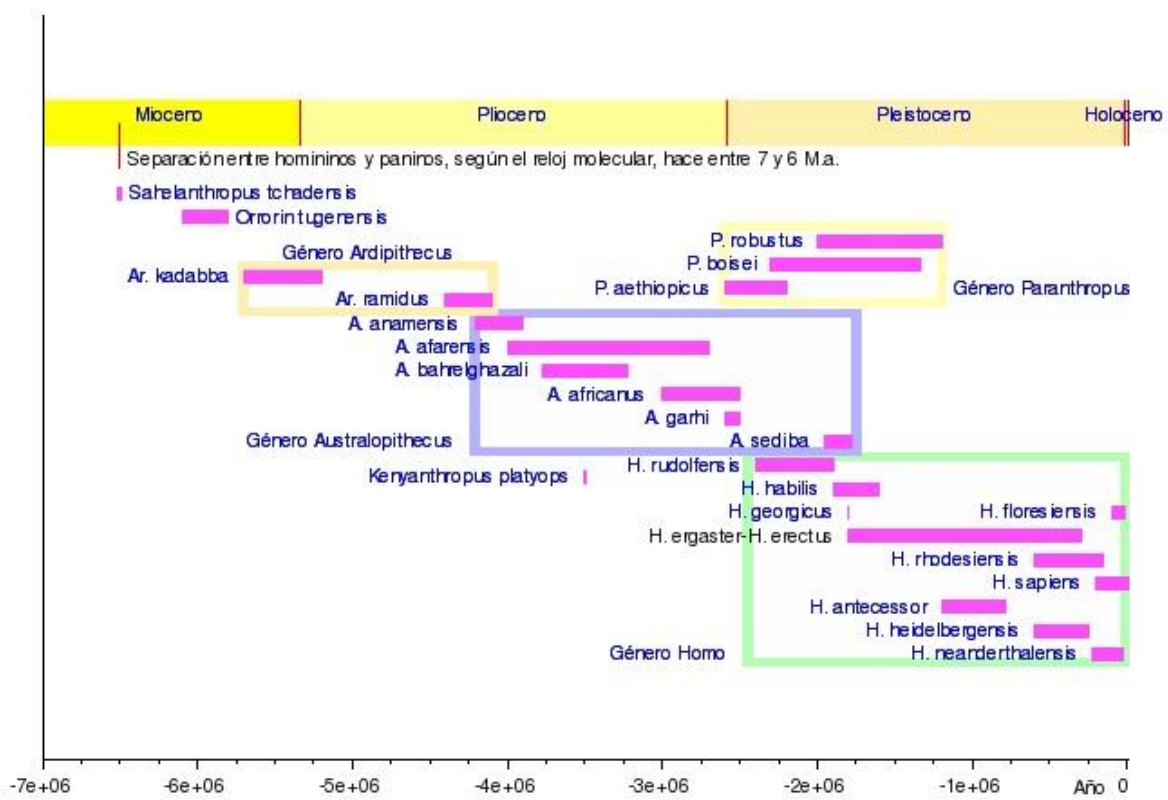


Ilustración 3. Fuente: Wikipedia: evolución humana. Periodos de existencia de las especies más importantes de homínidos.

explicado, la evolución biológica es un proceso de gran complejidad cuya comprensión puede ser favorecida por medio de una visión integral de todos sus mecanismos. Si el alumnado aplica a los diferentes casos de evolución que vaya a conocer una perspectiva globalizadora del conocimiento, entenderá mejor la interacción entre los distintos mecanismos evolutivos y las diferentes especies involucradas, y la relación de parentesco entre ellas.

1.2.1. Dificultades en la enseñanza de la evolución

El conocimiento y reconstrucción de la historia de la vida en la Tierra ha sido un proceso complejo, largo y de difícil comprensión para el ser humano, no exento de discusión y polémica en muchos de sus ámbitos. Las ideas previas que se tienen sobre los conceptos evolutivos deben de partir como base para la identificación de dificultades que el alumnado pueda tener a la hora de aprender conceptos científicos. Ignorar las concepciones previas que ya posea el alumnado puede hacer caer al profesorado en un gran error, puesto que *“no sirve de mucho exponer correctamente a los alumnos el saber sobre el tema si éste choca frontalmente con sus propias ideas y no se le hace ver este choque. El alumno preferirá quedarse con sus ideas previas y, a lo sumo, se aprenderá lo que necesite del marco teórico sobre selección natural y evolución para aprobar el examen. Por contra, si se fuerza al alumno a contraponer ambos esquemas de pensamiento, llegará a la conclusión de que su propio esquema es erróneo, y se verá obligado a cambiarlo”* (Jiménez Tejada, González García, y Hódar Correa, 2002). Estas ideas suelen tener una serie de características comunes que hacen que sean más fáciles de reconocer (Romero, 2011):

- No son ideas que concuerden con los conceptos aceptados por la comunidad científica e impartidos por el docente.
- No son fáciles de cambiar, lo cual hace que con frecuencia perduren en la edad adulta.
- Son conceptos que, aunque incorrectos, muestran alta recurrencia en distintos individuos, países o rangos de edad, siendo expuestos en diferentes ocasiones.

Las hipótesis y teorías de los orígenes de la vida y de las diferentes especies y su interrelación y parentesco están apoyadas por numerosas y muy diversas evidencias. A pesar de esto, dentro de los círculos científicos se debate sobre las diferentes hipótesis; es decir, si bien la teoría de la evolución es un hecho ampliamente aceptado en este ámbito, se discute cómo se produjo en sus diferentes casos particulares. Sin embargo, la complejidad de dicho tema es un hecho al que los docentes tienen que enfrentarse a la hora de enseñar las diferentes teorías que intentan explicar el desarrollo de la vida en

nuestro planeta, puesto que los alumnos pueden malinterpretarlas por diferentes razones. Algunos conceptos que pueden entenderse de forma errónea, o que constituyen ideas previas del alumnado en el estudio de la evolución, son los siguientes (Ayuso y Banet, 2002; Díaz de la Fuente, 2013; González-García, 2015):

- El concepto de evolución ha causado polémica a lo largo del desarrollo de su estudio científico, al entrar en conflicto con algunas ideas religiosas. Exceptuando posturas religiosas extremas, la mayoría de las personas han dejado de lado las ideas fijistas para reconocer que existe un cambio de las especies a lo largo del tiempo, si bien se encuentran numerosos errores conceptuales en los mecanismos por los que se da este proceso. Algunos autores (Hameed, 2008; Ross, 2005) aclaran las bases erróneas sobre las que se fundamentan las nuevas teorías creacionistas analizando las evidencias existentes y denunciando las falacias lógicas que se producen en algunos casos.
- Las ideas previas que tiene el alumnado sobre evolución se suelen relacionar frecuentemente con las ideas lamarckistas. Un ejemplo bastante usado para es el de las jirafas de Lamarck, según el cual, estos animales desarrollaron su largo cuello para alcanzar las hojas más altas de los árboles, convirtiéndose este carácter en heredable y pasando a la siguiente generación. La concepción de que el uso de un órgano propicia su desarrollo y heredabilidad, o de que los animales buscan conscientemente la evolución mediante mecanismos como la mutación, malinterpretándose así también el concepto de adaptación, está muy extendida entre el alumnado. La visión de este proceso como una necesidad que surge del propio ser vivo, que sigue un camino gradual y lineal para acabar siendo mejor de lo que era antes, también es muy común entre el alumnado, siendo ambas concepciones erróneas (Gregory, 2009; Kutschera y Niklas, 2004).
- El origen de las especies es un tema complejo, puesto que los mecanismos por los que surgen nuevas especies no son fáciles de entender. Sobre estos mecanismos de la evolución y la especiación existen numerosas ideas previas, influidas por medios como el cine o la prensa y que hacen que los estudiantes posean un planteamiento que puede estar muy alejado de lo que el concepto es en realidad, desde el punto de vista científico. Un ejemplo lo constituye el papel de las mutaciones en la evolución, puesto que los estudiantes tienden a relacionar a un mutante con algún ser monstruoso, deforme o con algún tipo de superhéroe, lejos de lo que el concepto científico representa. Incluso fuera de una preconcepción fantasiosa o ficticia, encontramos errores como la creencia

de que las mutaciones siempre se heredan o la confusión entre la mutación y otros procesos, como la metamorfosis. Por otra parte, existe la idea, muy extendida entre los estudiantes, de que la formación de una nueva especie puede surgir a partir del cruce de otras dos diferentes. Esto, unido a la preconcepción lamarckista que impera en el alumnado, hace que sea complicado aprender estos mecanismos si no se ponen en conflicto las ideas previas erróneas que se tienen sobre ellos con los hechos experimentales.

- Otro concepto que dificulta la comprensión de los procesos evolutivos es el del tiempo. La evolución no es un proceso observable a escala de tiempo humana, sino geológica, que es muchísimo más larga. Esto implica una mayor dificultad para entender los periodos en los que la evolución trabaja y cómo se relacionan con la edad de la Tierra.
- Una idea que se encuentra frecuentemente entre el alumnado es el entender la evolución como un desarrollo a mejor, un proceso que siempre tenderá a crear formas más complejas o perfectas. Esto está relacionado con una mala comprensión de los conceptos anteriormente mencionados, como la mutación, o con la ignorancia del verdadero significado de biodiversidad y las causas que la producen. Esta línea de pensamiento viene acompañada por la idea de que el ser humano representa el cénit de la evolución, desde una visión antropocentrista. El alumnado debe cambiar el concepto de evolución como progreso para entender que lo que era mejor hace un millón de años podría no serlo hoy, ya que los procesos evolutivos van ligados al ambiente y este cambia constantemente con la aparición de diversos factores, como la competencia, depredadores, barreras geográficas, etc.
- En muchas ocasiones, incluso fuera de los círculos de la enseñanza, se suele confundir el significado de “teoría” en el ámbito científico. En su uso coloquial, esta palabra se refiere a conocimientos especulativos o a una posible hipótesis cuyas pruebas están por comprobar. Bajo este uso, podría considerarse que la “teoría de la evolución” no está contrastada científicamente, sino que se trata de hipótesis que aún está en el aire. Esto es algo que está muy alejado de la realidad si usamos el vocablo “teoría” como corresponde en el ámbito científico, cuyo significado es el de una serie de explicaciones basadas en líneas de pruebas contrastadas y aprobadas por la comunidad científica. Para una mejor comprensión de este hecho, los estudiantes deben tener conocimientos sobre el método científico, que establece la distinción entre teoría e hipótesis.

Por otra parte, Gregory (2009) establece una serie de conceptos principales relacionados con la selección natural y los relaciona con las concepciones previas que se encuentran más comúnmente (ver tabla 1).

Las propuestas usadas para tratar estas ideas previas pueden ir encaminadas hacia el cambio de la experiencia de aprendizaje del alumno, usando los recursos de los que el docente dispone, como el uso de material audiovisual, junto con el diseño de actividades

Concepto	Interpretación correcta	Concepción previa
Variación entre individuos	Requisito fundamental para el cambio evolutivo, una característica importante y común.	Rara y sin importancia, característica que aleja a la especie de su "esencia" original. No es importante en el cambio evolutivo.
Origen de nuevos caracteres	Surgen de forma aleatoria por mutación, algunas beneficiosas, otras neutras y otras perjudiciales, y clasificadas según sus efectos en la reproducción del organismo tras su aparición.	Surgen en respuesta a la necesidad. Siempre son beneficiosos. La descendencia podría tener caracteres beneficiosos incluso si los padres no los poseen. La clasificación de estos nuevos rasgos viene dada por el medio ambiente.
Heredabilidad	Si un carácter es heredado, lo hace sin importar si es beneficioso o perjudicial. Los cambios físicos ¹ de los padres no son heredables. Las diferencias heredables entre los padres y la descendencia se deben a la mutación y la recombinación.	Sólo los caracteres beneficiosos se suceden. Así mismo, los cambios físicos en los padres son recibidos por la descendencia. Las diferencias heredables entre padres y descendencia se deben a mejoras en función de la necesidad del individuo.
Adaptación	Debida a diferencias no aleatorias en la supervivencia y la reproducción entre individuos variables a lo largo de varias generaciones. El individuo no cambia por sí mismo. La proporción de caracteres cambia de una generación a otra, ya que algunos de estos caracteres se transmiten en una proporción mayor que otros	Debida a la respuesta a una necesidad o al esfuerzo para producir un cambio por un individuo. Los organismos cambian a lo largo de sus vidas para volverse mejores supervivientes y suceder estos cambios a su descendencia. Cualquier diferencia entre padres y descendencia está dirigida a una mayor mejora. Todas las especies se transforman en respuesta a sus necesidades.

Tabla 1. Interpretaciones correctas y concepciones previas de diferentes conceptos de evolución.

¹ Entiéndase como cambios físicos aquellas cualidades adquiridas a lo largo de la vida de un individuo como consecuencia de su interacción con el medio ambiente, como puede ser llevar una buena alimentación o hacer ejercicio, entre otros.

guiadas u otras herramientas, como textos científicos, laboratorio, artículos de prensa o juegos interactivos. Estos recursos pueden complementarse con tareas como hacer debates en clase, creación de mapas conceptuales, comentarios de texto o actividades fuera de clase, ya sea en parques o en las zonas abiertas del centro (Romero, 2011). Este tipo de propuestas deben estar dirigidas hacia la comprensión, mediante los problemas o casos que el tema a estudiar nos pueda proveer, de los conceptos clave. En el caso de la evolución, éstos serían especialmente las fuentes de variación biológica, la selección y el tiempo en el que estos procesos funcionan (Malone, 2012).

Así pues, el papel del docente será clave para la correcta comprensión de los contenidos y para modificar aquellas ideas erróneas que pudiese tener el alumnado, mediante el conflicto cognitivo al que se enfrentarán, al contrastar sus concepciones previas con los hechos científicos. Dado que este cambio conceptual debe de venir favorecido por el profesorado, los recursos, la metodología y el modelo didáctico que este utilice serán muy importantes para lograr alcanzar estos objetivos. Se puede encontrar abundante información sobre otras ideas previas referentes a la evolución, y algunas propuestas de cómo tratarlas, en Kalinowski et al. (2013) y Thagard y Findlay (2010).

1.2.2. Alfabetización científica

La educación científica, y la educación en general, está caracterizada en los últimos años por una serie de retos que buscan formar ciudadanos responsables y competentes en una sociedad impregnada, cada vez más, por el rápido avance de las tecnologías de la información. Se hace por ello necesario disponer de una educación que tenga como base esencial la alfabetización científica y tecnológica de todas las personas. De esta manera, la enseñanza de las ciencias no debe limitarse al conocimiento científico y tecnológico, sino que debe incluir capacidades generalistas y de relevancia social que incorporen los valores relacionados con la ética a la hora de tratar con la ciencia y la tecnología (Acevedo, Vázquez, y Manassero, 2003).

Es relativamente frecuente encontrar personas que no pueden usar eficientemente ciertas tecnologías, o que no pueden establecer reflexiones básicas vinculadas con algún campo científico. Por ello, la alfabetización científica debe aportar, a una mayoría de la población, unos conocimientos básicos sobre ciencia y tecnología para valerse por sí mismos en la resolución de problemas cotidianos y en la satisfacción de ciertas necesidades elementales relacionadas con la salud y la subsistencia. Esto debe venir complementado con la percepción sobre los estrechos vínculos que caracterizan sociedad y ciencia para elaborar la cultura que tenemos actualmente. Así pues, la

alfabetización científica debe entenderse como un “proceso de investigación orientada” (Sabariego y Manzanares, 2006) que introduzca al alumnado en problemas de relevancia que le obligue a reconstruir su conocimiento científico, abogando por un aprendizaje significativo. Shen (1975) propone, en su definición de alfabetización científica, tres tipos:

- Práctica: dominio de ciertas capacidades científicas y tecnológicas que pueden ser usadas para resolver problemas básicos cotidianos.
- Cívica: posesión de un gran nivel de conciencia sobre los valores morales y éticos vinculados al desarrollo que ciencia y sociedad producen y los problemas que puedan acarrear.
- Cultural: conocimiento de las principales teorías e ideas científicas y su contexto, haciendo de la ciencia un interés cultural.

Otros autores consideran que la alfabetización científica se compone de distintos elementos o dimensiones. Hodson (1993) considera que se debe aprender ciencia respecto al concepto y al conocimiento teórico, aprender acerca de la ciencia a través de la comprensión de las metodologías que se usan y de su desarrollo en la sociedad, y aprender a hacer ciencia desarrollando la capacidad de resolución de problemas mediante la adquisición de experiencia en investigación. De tal manera, hace la división en tres elementos como adquisición de teoría, adquisición de conciencia y comprensión y adquisición de experiencia. Por otro lado, Kemp (2002) estructura la alfabetización científica en tres dimensiones:

- Conceptual: Adquisición de conocimiento científico y comprensión de la relación entre ciencia y sociedad.
- Procedimental: Habilidad para aplicar los procedimientos científicos a los problemas diarios y obtener fuentes de información.
- Afectiva: Concienciación, adquisición de actitudes y valores ante problemas relacionados con el desarrollo, interés por la ciencia.

Por otra parte, también es importante entender cómo influye la Tierra en nosotros y cómo influimos sobre ella, lo que implica un desarrollo de algunos de los principios de la alfabetización en Ciencias de la Tierra. Estos vienen definidos por científicos que desarrollan investigaciones activas en áreas diversas, y explican cómo funcionan varios aspectos complejos de nuestro planeta. Se trata de un campo que está en continuo progreso, lo que implica reformulaciones y revisiones a partir de los nuevos descubrimientos, tanto de las Ciencias de la Tierra como de la teoría del aprendizaje. Así, alguien con una alfabetización científica adecuada, podrá, entre otras cosas:

- Entender los conceptos fundamentales de los diferentes sistemas de la Tierra.
- Conocer cómo encontrar y valorar información creíble y científica.
- Comunicar y expresar la ciencia de manera significativa.

Los principales principios (o “Grandes Ideas”) mostrados en el reciente documento “Principios de Alfabetización en Ciencias de la Tierra” (“Earth Science Literacy Initiative - ESLI,” s.f.) tratan sobre diferentes aspectos. El primero de ellos es usar observaciones e ideas comprobables para entender y explicar el planeta. Otro es entender la dimensión temporal geológica y la edad de la Tierra (4.600 millones de años), junto con la comprensión de los sistemas complejos de la Tierra y cómo interactúan entre sí, su continuo cambio, la importancia del agua en el planeta, los recursos y riesgos naturales que influyen en los humanos, y cómo alteran estos el medio ambiente.

Sin embargo, el principio de más importancia para este trabajo la denominada “Gran Idea 6”: la vida evoluciona en un planeta dinámico, y la modifica continuamente. Esta incluye varios conceptos, principalmente:

- Los fósiles representan una evidencia de las formas de vida pasadas y de la historia del planeta.
- La evolución, incluyendo el origen y la extinción de las especies, es un proceso natural.
- La diversidad biológica, pasada o presente, ha sido y es inmensa y profundamente desconocida.
- Los microorganismos dominaron la biosfera primitiva de la Tierra y aún hoy son el grupo de organismos más diverso, abundante y extenso en el planeta.
- Las extinciones en masa ocurren cuando las condiciones globales cambian más abruptamente que la aparición de adaptaciones en las especies más numerosas.
- Las formas de vida existentes actualmente son resultado de la historia de los sistemas de la Tierra.
- La vida cambia las propiedades físicas y químicas de la geosfera, la biosfera y la atmósfera.
- La vida ocupa un amplio rango de medios en la Tierra, incluyendo los más extremos.

Siguiendo, pues, los principios expuestos en el documento “Earth Science Literacy Initiative”, se han diseñado las actividades de forma que se ayude a mejorar la comprensión de todos estos conceptos, particularmente relacionados con la evolución.

1.2.3. Aproximación a la indagación

A lo largo de las actividades se utilizará la enseñanza por indagación (ECBI), una metodología que acerca el conocimiento científico a los estudiantes a través de la reconstrucción activa del mismo a partir de sus ideas previas, fomentando la participación. Mediante esta metodología, el estudiante desarrolla las ideas científicas usando destrezas que los científicos usan con frecuencia (podríamos decir que se trata de una especie de transposición didáctica de la actividad de estos), lo que De Zubiría (2006), citado en Ayala (2013), describe como :

- Formulación de cuestiones.
- Búsqueda de datos.
- Análisis de las evidencias y comparación con el conocimiento previo.
- Extracción de conclusiones
- Discusión de resultados.

Así pues, en E.E.UU. ya se diseñó una definición que establecería los estándares estadounidenses de la educación científica, en el *National Research Council* de 1996, que describía la indagación de la siguiente manera (Garritz, 2006):

La indagación es una actividad multifacética que involucra hacer observaciones, hacer preguntas, examinar libros y otras fuentes de información para saber qué es lo que ya se sabe, planear investigaciones, revisar lo que se sabe en función de la evidencia experimental, utilizar herramientas para reunir, analizar e interpretar datos, proponer respuestas, explicaciones y predicciones, y comunicar los resultados. La indagación requiere la identificación de suposiciones, el empleo del razonamiento crítico y lógico y la consideración de explicaciones alternativas.

Esto implica que el alumnado se inicie en una búsqueda de pruebas para formular explicaciones ante diferentes fenómenos, involucrándolos directamente en prácticas indagatorias, entre las que se encuentra el diseño de razonamientos y explicaciones a los fenómenos naturales. Dichas prácticas le han de guiar hacia una mejor comprensión de la ciencia y su naturaleza y hacia un desarrollo del pensamiento crítico (Martínez Chico, López-Gay Lucio-Villegas, y Jiménez Liso, 2014). Además, según Nudelman (2015), esta metodología va más allá de la adquisición de conocimientos básicos en ciencia y tecnología, y fomenta el desarrollo de habilidades como la creatividad, la imaginación, la expresión oral y escrita y la cooperación y el trabajo en equipo.

Fue de nuevo en el *National Research Council*, en el año 2000, donde se establecieron una serie de componentes que toda metodología por indagación debería tener en común. En concreto, según Cortés y de la Gángara (2007), el alumnado tendría que :

- Involucrarse en una cuestión científica, evento o fenómeno, que conecte con lo que ellos ya conocen, cree conflicto con sus propias ideas y/o los motive a aprender más.
- Explorar ideas a través de experiencias manipulativas, formular y comprobar hipótesis, resolver problemas y generar explicaciones para lo que observen.
- Analizar e interpretar datos, sintetizar sus ideas, construir modelos y aclarar conceptos y explicaciones con profesores y otras fuentes de conocimiento científico.
- Ampliar sus nuevos conocimientos y habilidades y aplicar a nuevas situaciones lo que han aprendido.
- Revisar y evaluar, junto con los profesores, lo que han aprendido y cómo lo han aprendido.

Además, en el mismo consejo y año, Joseph Schwab, que ya había influido en esta perspectiva de la educación científica desde la década de los 60, propuso que los docentes consideraran tres aproximaciones para sus clases con respecto a los libros de texto (Garritz, 2006):

- Los estudiantes pueden usar los libros de texto o manuales de laboratorio para proponer cuestiones y especificar los métodos para investigarlas, lo cual les permite descubrir relaciones que no conocían.
- Los materiales de instrucción pueden usarse para plantear problemas, pero los métodos y respuestas para abordarlos deben ser abiertos para que los estudiantes los determinen por sí mismos.
- El alumnado, en la aproximación más abierta, puede enfrentarse a problemas sin el uso del libro de texto, mediante preguntas basadas en el trabajo experimental; pueden realizar preguntas, reunir pruebas y proponer explicaciones científicas basándose en sus propias investigaciones.

Según (López-Gay, Jiménez-Liso, y Martínez-Chico, 2015), el docente puede aplicar distintos grados de guía y estructuración, dependiendo de sus objetivos y la experiencia de los estudiantes. Generalmente, cuando el aprendizaje conceptual tiene gran relevancia, se aconseja una indagación estructurada y guiada por el docente, mientras que en otras ocasiones se puede optar por una más abierta, que desarrolle la autonomía y las habilidades indagatorias del alumnado.

El mismo autor sostiene que la indagación, para ser científica, debe ayudar a “*construir grandes ideas que se apliquen a un amplio rango de fenómenos*”, y debe alejarse de buscar una respuesta particular a una cuestión particular. Este segundo enfoque implica

reducirla a *actividades manipulativas y explicaciones locales*, que no implican una relación y conexión de ideas científicas, y promueve una visión de la ciencia simplista y centrada en un nivel superficial de observación.

El proceso de indagación se puede resumir, según Martínez-Chico (2013), en una serie de fases:

1. Afrontar problemas o cuestiones de carácter científico, es decir, relacionados con fenómenos del mundo natural o tecnológico cuyas respuestas pueden ser confirmadas o rechazadas mediante pruebas; formular explicaciones justificadas, basadas en su experiencia previa.
2. Buscar evidencias que permitan confirmar o refutar las hipótesis planteadas, o bien mediante diseños experimentales en los que pueden participar los estudiantes, o simplemente mediante búsqueda de información.
3. Analizar e interpretar la información y los datos recogidos. Es entonces cuando quizás haya que adecuar las explicaciones iniciales o el modelo propuesto.
4. Expresar e interpretar ideas, considerando explicaciones diferentes a las personales.

Cortés y de la Gángara (2007) proponen una serie de normas de comportamiento que se pueden relacionar en clase con las que siguen los científicos, siendo las más importantes las siguientes: todas las ideas son respetables, criticables y evaluables, todos los componentes del equipo deberán cooperar en todo el proceso, cualquier estudiante podrá plantear problemas sobre conceptos o procedimientos a sus compañeros de grupo, al profesor o a otro equipo y las decisiones y resultados deben ser compartidos con el resto de la clase. También propone que cada equipo realice un diario de trabajo donde se reúnan los puntos sobre los que se ha discutido, la información obtenida y los acuerdos a los que han llegado.

1.2.4. Aprendizaje cooperativo

El uso didáctico de grupos reducidos y heterogéneos, normalmente de 4 o 5 individuos, en los que los estudiantes trabajan juntos para su aprendizaje y el de los demás, se conoce como aprendizaje cooperativo. En este, se busca llevar a cabo una tarea o actividad que no puede ser completada sin usar el trabajo en equipo y la colaboración, por lo que los miembros del grupo son interdependientes positivamente (el éxito de uno depende del de los demás). Al contrario que en los aprendizajes de tipo competitivo o en el individualista, en los que el alumnado trabaja para lograr unas metas de aprendizaje independientes del resto de sus compañeros, el aprendizaje cooperativo se

caracteriza porque los integrantes de los grupos buscan obtener unos resultados beneficiosos para ellos mismos y para los que les rodean (Johnson, Johnson, y Holubec, 1999; Trujillo Sáez, 2002).

Según Prieto Navarro (2007), si bien es cierto que tenemos la perspectiva de una sociedad en la que generalmente se valora el trabajo competitivo e individualista, la cooperación es una actitud esencial. Esto es debido a que, en primer lugar, existen gran cantidad de aspectos en el mundo real que usan la cooperación, y en segundo, porque hay grandes problemas que necesitan de la cooperación y la colaboración, especialmente en proyectos científicos. Así, pues, el aprendizaje cooperativo crea una interdependencia positiva que implica una responsabilidad individual para que el equipo salga adelante con éxito y que fomenta una serie de actitudes en el grupo:

- Se busca el beneficio común, en vez del personal, exclusivamente.
- Sumar esfuerzos para conseguir una meta común.
- Favorecer e impulsar el éxito de los demás.
- Sumar la contribución de los demás al éxito de uno mismo.
- Admitir el valor de los demás y cada uno de los iguales; todos en el equipo tienen cualidades.
- No restar valor a ninguno de los componentes del grupo ni a uno mismo, aunque haya fracasos.
- El objetivo, más que ganar, es aprender.
- Apreciar que la diversidad representa una gran fuente de recursos para aprender mejor entre todos.

Esto no quiere decir que competir sea algo negativo. Para justificar metodologías competitivas, se suele razonar con el hecho de que aprender en rivalidad con otros individuos podría suponer una motivación. Aunque en ciertos contextos esto puede ser cierto, Prieto Navarro (2007) asegura que, en el contexto escolar y educativo, de la competición pocas veces resulta una experiencia motivante cuando el objetivo es crear un aprendizaje y que el alumnado disfrute de la propia experiencia, de la participación en la actividad y de los logros personales que cada uno consigue por implicarse activamente en la misma, colaborando.

En el aprendizaje cooperativo, un buen grupo debe de tener unas características que lo hagan funcionar correctamente y el docente ha de aplicar ciertas directrices. La más importante sería, como se ha repetido anteriormente, la interdependencia positiva y percibida entre los miembros del grupo, lo cual implica una interacción facilitadora del aprendizaje. En el equipo debe verse un uso frecuente de destrezas interpersonales y

grupales. Con objeto de estimular la responsabilidad personal para conseguir las metas del grupo, se debe llevar a cabo una evaluación individualizada, aunque para mejorar la efectividad y regular su funcionamiento se recomienda también utilizar frecuentemente una evaluación grupal (Trujillo, 2002). Otros autores, como Murillo, Gandul y Pérez (1996; citados en Ballesteros, 2012), analizan otros aspectos que caracterizan al grupo y su dinámica interna, como los objetivos y metas que sigan, un liderazgo distribuido entre los componentes, la cohesión de los miembros, el grado o sistema de comunicación entre ellos (preferiblemente libre y espontáneo), la resolución de conflictos que puedan surgir y las normas que acuerden.

Es necesario dejar claras las diferencias entre trabajar por grupos y el aprendizaje cooperativo como tal. Ballesteros (2012) muestra una serie de características que establecen una distinción entre ambas, listadas en la siguiente tabla:

	Trabajo grupal	Aprendizaje cooperativo
Interdependencia	No hay	Positiva
Evaluación/Responsabilidad	Grupal	Individual
Miembros	Grupo homogéneo	Grupo heterogéneo
Liderazgo	Unipersonal	Compartido, con un coordinador
Responsabilidad del aprendizaje	Individual	Compartida
Objetivo final	Completar la tarea	El aprendizaje y la relación
Habilidades interpersonales	Se presuponen	Se aprenden
Rol del docente	Escasa intervención	Observación y retroalimentación durante el trabajo
Desarrollo de la tarea	Procedimiento carece de importancia.	Docente proporciona medios de optimización. Tanto el proceso como el producto son de importancia

Tabla 2. Diferencias entre trabajo por grupos y aprendizaje cooperativo.

1.2.1. Uso de las impresoras 3D en docencia

Crear una experiencia en la que el estudiante toque, manipule y contacte físicamente con el concepto que está aprendiendo en una actividad educativa puede resultar de una gran ayuda en el proceso de aprendizaje de la ciencia. El mejor enfoque para entender un concepto abstracto es intentar trasladarlo al mundo real, como por ejemplo, construir un objeto tridimensional que pueda manipularse físicamente sin dificultad (Rossi, Benaglia, Brenna, Porta, y Orlandi, 2015).

Un ejemplo muy famoso de esta técnica fue utilizada en 1865, cuando Hofmann introdujo los modelos moleculares de barras y esferas que representaban los enlaces y la disposición tridimensional de los átomos en las moléculas. Desde entonces, estos modelos han jugado un papel muy importante en el aprendizaje y la investigación en el campo de la química (Rossi et al., 2015).

Si bien los modelos tridimensionales han sido aplicados a diferentes ramas de distintos campos de la ciencia y la educación, siempre han estado limitados por lo que las casas comerciales estaban dispuestas a comercializar, ya que desde los años 80 era la industria la que proporcionaba estos modelos mediante el *rapid prototyping*. En la actualidad, el panorama está cambiando gracias al auge de la tecnología de impresión 3D, que ha conseguido llevar a un nivel doméstico la fabricación de objetos tridimensionales de muy diverso tipo. Con ello también se ha conseguido trasladar ideas científicas a modelos físicos palpables, que carecen de las limitaciones que la industria imponía por sus altos precios o por la ausencia del objeto preciso que se requería para un determinado propósito científico o educacional (Travieso-Rodríguez, Jerez-Mesa, y Gómez-Gras, 2014).

El primer enfoque educacional de la impresión 3D se remonta a 2006, en el que se imprimieron modelos de proteínas, aunque todavía a un coste muy alto. El avance y el uso de otros tipos de modelado ha hecho que el precio se abarate lo suficiente como para que estas impresoras sean económicamente accesibles para un centro educativo (menos de 1000 euros) o incluso de fabricación propia, como se puede ver en la ilustración 4, promovida por la filosofía “Do it yourself” (DIY) (Díaz et al., 2014; Sarasa Funes, 2014). La tecnología más usada actualmente en impresión 3D es la conocida como FFF (*Fused Filament Fabrication* -Fabricación mediante Filamento Fundido-), que se basa en un filamento de un termoplástico (aunque también es muy común utilizar PLA, un polímero de origen vegetal) que se va desenrollando de una bobina y se calienta hasta su punto de fusión, pasando a través de un inyector que puede moverse vertical y horizontalmente (Junk y Matt, 2015; Rossi et al., 2015). Para ello, en primer lugar se

diseña el objeto a imprimir mediante software de diseño asistido por ordenador (CAD) u otros (existen multitud de aplicaciones gratuitas de las que se puede disponer fácilmente, y que abarcan ámbitos como la Geografía y la Geología, la Medicina, la Biología, la Ingeniería, y un largo etcétera). A continuación, un programa llamado *laminador* descompone este modelo en capas, y guarda la información en un formato accesible para la impresora (generalmente en un fichero de tipo *.gcode*). Actualmente, existen aplicaciones gratuitas para cada una de las etapas del proceso, promovidas por la filosofía del *Open Source* o *código abierto*, muy arraigada en toda esta tecnología, que ha contribuido enormemente a su desarrollo y expansión.

El paso de la impresión 3D al ámbito doméstico ha propiciado también que en Internet se creen comunidades donde se comparten modelos 3D como [Thingiverse](#) (Makerbot Thingiverse, s.f.), donde el visitante puede descargar los modelos virtuales ya hechos por otros usuarios que los comparten libremente, para ser impresos directamente (The New Media Consortium, 2013).

Aunque en la mayoría ocasiones se presentan conceptos científicos abstractos a los estudiantes en forma de imágenes, este tipo de recursos sólo se basan en la percepción visual. Esto puede ser un verdadero problema para esa parte del alumnado con dificultades para reconocer el carácter tridimensional del concepto estudiado (por ejemplo, una hélice de ADN), y puede representar una limitación muy seria para aquellos estudiantes visualmente discapacitados. La impresión 3D constituye una ayuda para afrontar estas dificultades, proveyendo de un recurso educativo al estudiante que lo acerca a la comprensión dimensional del concepto estudiado (Blauch y Carrol, 2014).



Ilustración 4. Fuente: Verner y Verksamer (2015). Impresora 3D de fabricación doméstica.

Esto les permite apreciar las diferencias entre la representación bidimensional de lo estudiado (en una foto o dibujo, por ejemplo) y un modelo físico tangible (Roque y Valverde, 2012), y además acerca los conceptos abstractos a lo material y cotidiano (Meyer, 2015).

Según algunos estudios, la asociación de algunas herramientas computacionales (software analítico o visual, manipulación de imágenes por ordenador, etc.) con el uso de recursos de impresión 3D mejora la comprensión de los conceptos estudiados y las habilidades espaciales de los estudiantes, además de desarrollar tanto capacidades cognitivas de orden superior como la motivación, si bien no mejora los resultados cuando el alumnado se enfrenta a preguntas memorísticas (Harris et al., 2009; Meyer, 2015; Verner y Merksamer, 2015). Esto se debe, según Harrar y Harris (2005), a que la utilización de modelos tridimensionales activa la estimulación de varios sentidos. El del tacto establece conexión con el cerebro de forma paralela a la visión o la audición, de manera que se propicia una integración para la percepción *multimodal* de un objeto. La utilización de este sentido, junto con los anteriormente mencionados, disminuye la cantidad de errores en el reconocimiento de las formas y desarrolla la capacidad de discriminación de estas, según algunos estudios (Gaißert, Waterkamp, Fleming, y Bühlhoff, 2012). De esta manera se genera una “consciencia táctil” a partir de las sensaciones percibidas a través del tacto (Horowitz y Schultz, 2014), que se integra en la inteligencia espacial (Gallace y Spence, 2008)

Por otra parte, la exploración del proceso desde la búsqueda del modelo o su elaboración hasta su propia impresión, con una participación activa por parte del alumnado, ofrecen nuevas posibilidades para desarrollar el aprendizaje (The New Media Consortium, 2013). Algunos estudios (Eisenberg, 2007; Gershenfeld, 2008; Hatch, 2013) concluyen que la motivación del alumnado es mucho mayor cuando estos pueden fabricar un objeto tangible y real a partir de lo estudiado.

Además, uno de los puntos clave del uso de esta tecnología es el desarrollo de la competencia STEM (la actual competencia “Competencia matemática y competencias básicas en Ciencia y Tecnología” del RD 1105/2014). De hecho, (Bell et al., 2010) argumentan que su aplicación a las clases de ingeniería (y podríamos extender estas conclusiones a todas las Ciencias Experimentales y a la Matemática) desarrolla las capacidades cognitivas de los estudiantes a varios niveles, ya que implica el uso de conceptos abstractos y la visualización espacial, así como resolución de problemas del mundo físico. Dado que en numerosas ocasiones el principal obstáculo para desarrollar contenidos desde el punto de vista competencial está en la dificultad de modificar los

currícula existentes (suficientemente densos como para añadir nuevos temas), es muy importante el hecho de que la impresión tridimensional integre de forma natural las competencias matemática, en ciencia, tecnología e ingeniería. (Berry et al., 2010), analizando las dificultades existentes a la hora de integrar las matemáticas con otras áreas en Primaria, apuntan cómo el diseño digital (para crear réplicas de objetos del mundo físico) está íntimamente relacionado con manipulaciones numéricas, mediciones y análisis propios de la ingeniería. Uttal y Cohen (2012) argumentan que las habilidades espaciales son importantes en la competencia STEM simplemente porque suponen una barrera a superar por los estudiantes antes de introducirse en temas más complejos. Estos autores proponen invertir en el entrenamiento espacial, basándose en que podría producir bonificaciones significativas a los estudiantes en el futuro.

2. Contextualización curricular

Este Trabajo Fin de Máster se basa en el Real Decreto 1105/2014 por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato (2015).

En este documento se decreta la regulación de los elementos que determinan los procesos de enseñanza y aprendizaje para cada una de las enseñanzas. Así, en él se exponen contenidos, criterios de evaluación y estándares de aprendizaje evaluables, además de las competencias, que aplican de forma integrada los contenidos pertenecientes a cada enseñanza y etapa educativa.

De esta manera, en el presente trabajo se desarrolla un repositorio de actividades relacionadas con los bloques de la evolución de la vida y proyecto de investigación, números 1 y 4 respectivamente, de la asignatura de Biología y Geología para 4º de la E.S.O., presentando parte del contenido de dichos bloques.

En el Real Decreto se describen los objetivos generales para la etapa de Educación Secundaria obligatoria, donde se estipulan las capacidades que debe desarrollar el alumnado. Este trabajo hace especial énfasis en las siguientes:

- e) Desarrollar destrezas básicas en la utilización de las fuentes de información para, con sentido crítico, adquirir nuevos conocimientos. Adquirir una preparación básica en el campo de las tecnologías, especialmente las de la información y la comunicación.
- f) Concebir el conocimiento científico como un saber integrado, que se estructura en distintas disciplinas, así como conocer y aplicar los métodos para identificar los problemas en los diversos campos del conocimiento y de la experiencia.
- g) Desarrollar el espíritu emprendedor y la confianza en sí mismo, la participación, el sentido crítico, la iniciativa personal y la capacidad para aprender a aprender, planificar, tomar decisiones y asumir responsabilidades.

Así, el propio Decreto establece que el alumnado ha de adquirir unos conocimientos y destrezas básicas que le permitan adquirir una cultura científica, de manera que se identifiquen como agentes activos y sepan que de sus conocimientos puede depender el desarrollo del entorno. Además, en esta etapa se busca que el alumnado asiente conocimientos y destrezas que les permitan convertirse en ciudadanos respetuosos para consigo mismos, los demás y el medio ambiente, responsables, con espíritu crítico

y sin perder el interés por aprender. En el curso al que van dirigidas las actividades, 4º de E.S.O., el Real Decreto especifica en la página 205, textualmente, que "se inicia al alumnado en las grandes teorías que han permitido el desarrollo más actual de esta ciencia: [...] la teoría de la evolución." y que "al finalizar la etapa, el alumnado deberá haber adquirido los conocimientos esenciales que se incluyen en el currículo básico y las estrategias del método científico."

Además del citado documento, también se ha empleado el Decreto 111/2016, de 14 de junio, por el cual se establece la ordenación y el currículo de la Educación Secundaria obligatoria en la Comunidad Autónoma de Andalucía (2016). En dicho documento se desarrolla el currículo de la E.S.O., organizado en materias vinculadas con objetivos de etapa y la adquisición de competencias clave. También se especifica el carácter obligatorio de esta etapa, y con ello, la exigencia de una atención a la diversidad de la población escolarizada que suponga el respeto a las diferencias y la compensación de las posibles desigualdades sociales, económicas, culturales y personales, un factor que se ha tenido en cuenta en este trabajo. Para este punto también se ha consultado la Orden de 14 de julio de 2016, por la que se desarrolla el currículo correspondiente a la Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Autónoma de Andalucía, se regulan determinados aspectos de la atención a la diversidad y se establece la ordenación de la evaluación del proceso de aprendizaje del alumnado y se regulan determinados aspectos de la atención a la diversidad (2016). La impresión 3D constituye un recurso muy valioso en la atención a la diversidad, al aportar material que implica la estimulación de varios sentidos, algo que puede resultar útil al alumnado con necesidades especiales. En dicha orden se especifican los elementos transversales, algunos de los cuales presentan una relación especial con este trabajo, como:

- g) El desarrollo de las habilidades básicas para la comunicación interpersonal, la capacidad de escucha activa, la empatía, la racionalidad y el acuerdo a través del diálogo.
- h) La utilización crítica y el autocontrol en el uso de las tecnologías de la información y la comunicación y los medios audiovisuales, la prevención de las situaciones de riesgo derivadas de su utilización inadecuada, su aportación a la enseñanza, al aprendizaje y al trabajo del alumnado, y los procesos de transformación de la información en conocimiento.

3. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es el siguiente:

- Diseñar actividades y elaborar materiales didácticos con ayuda de la impresión 3D y otras herramientas de las TIC, centrándose en la enseñanza de la evolución biológica y sus mecanismos (especialmente la selección natural), las pruebas más importantes que apoyan la evolución, y el proceso de la evolución humana.

De este objetivo general emanan los siguientes objetivos específicos:

- Exponer el significado de evolución y su repercusión en la vida, mostrando los diferentes mecanismos que la causan.
- Desarrollar la comprensión de la selección natural a partir de las ideas previas que se puedan detectar en el alumnado.
- Mostrar a los estudiantes cómo, en las pruebas evolutivas, ciertas evidencias en determinados contextos, necesitan otro tipo de demostraciones para comprobar su veracidad.
- Introducir al alumnado al trabajo científico, que se realiza tanto en campo como en laboratorio, corrigiendo las visiones deformadas de la ciencia que puedan tener.
- Promover la colaboración, la responsabilidad y el trabajo en equipo para obtener juntos un producto o unas conclusiones.
- Capacitar a los alumnos para el trabajo en grupo, mostrando respeto con los compañeros y a su vez desarrollar el espíritu emprendedor.
- Utilizar la impresión 3D como herramienta didáctica, mediante la creación de modelos que sirvan de apoyo a las actividades.

4. Actividades

4.1. Estructura de las actividades

El presente trabajo desarrolla una serie de actividades que comparten una estructura común.

En primer lugar se describe el nombre de la actividad, relacionado en todas ellas con los conceptos que trata o el tema a trabajar. Tras esto, le sigue el curso a la que va dirigida, que es 4º de la E.S.O., y la temporalización de la misma. A continuación se describen los materiales necesarios para la consecución de la actividad.

Tras esto se exponen por medio de una tabla los elementos curriculares correspondientes al Real Decreto 1105/2014 por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato (2015), divididos en contenidos, criterios de evaluación y estándares de evaluación.

A continuación, le sigue el apartado de fundamentación de la actividad, donde se explica el tema a desarrollar y los principios teóricos en los que se basa. La primera actividad, por estar relacionada con la identificación de ideas previas, carece de este apartado.

Después se pasa al desarrollo de la actividad, que puede ser bastante diverso, según el tipo de tareas involucradas. Finalmente, se lleva a cabo un breve análisis de las competencias que se desarrollan en cada actividad, basado en la orden ECD/65/2015, de 21 de enero, por la que se describen las relaciones entre las competencias, los contenidos y los criterios de evaluación de la educación primaria, la educación secundaria obligatoria y el bachillerato (2015).

4.2. Resumen de las actividades

A continuación se presenta un breve resumen de las actividades planteadas.

Estas actividades se han pensado para ser utilizadas, tanto independientemente unas de otras como siguiendo una secuencia. De esta forma, se presenta un recurso que cada docente puede adaptar según sus propias necesidades.

Actividad 1. “¿Cómo entendemos la evolución?”

Para identificar las ideas previas de los estudiantes se les presenta una serie de preguntas que harán que un buen número de las concepciones erróneas que tienen sobre evolución salgan a la luz. También se les pondrá en tres diferentes situaciones en

las que tendrán que aplicar las ideas que tienen sobre este campo, y en particular, sobre el funcionamiento de la evolución, lo que facilitará al docente conocer los conocimientos del alumnado y sus posibles errores conceptuales.

Actividad 2. “Los cinco dedos de la evolución”.

Durante esta actividad los alumnos serán introducidos al concepto de evolución y a los diferentes mecanismos que dan lugar a la misma. Tras la observación de un vídeo explicativo, se enfrentarán a diferentes casos que ejemplifican los mecanismos que se enseñan en el mismo. Tendrán que buscar información utilizando distintas herramientas TIC y crear diversos productos como presentaciones de clase, infografías, artículos, informes o vídeos de animación que deberán entregar al docente.

Actividad 3. “El teatro del melanismo industrial”.

En esta actividad se representará en clase una teatralización del conocido caso del melanismo industrial de la polilla *Biston betularia*. El alumnado podrá observar así un caso de selección natural a “cámara rápida” y podrá comprender la importancia de la diversidad intraspecífica y la heredabilidad en este mecanismo evolutivo. Posteriormente, se enfrentarán a una serie de preguntas para comprobar cómo conectan lo aprendido con sus ideas previas y el grado de comprensión de los principales factores que intervienen en la selección natural.

Actividad 4. “La evolución en nuestros brazos”.

En esta actividad se mostrará al alumnado una de las pruebas de la evolución, la anatomía comparada. Se introducirá el concepto de homología a partir de la comparación de las estructuras óseas de las extremidades de varios grupos diferentes de vertebrados mediante material impreso en 3D. Los alumnos tendrán que verificar el esquema óseo mencionado en cada uno de estos grupos, y sacar conclusiones a partir de este hecho mediante una serie de preguntas, para después conocer los primeros organismos que tuvieron este esquema primitivo en sus extremidades.

Actividad 5. “Las pruebas paleontológicas I: El camino del caballo”.

En el desarrollo de esta actividad se demostrará al alumno cómo el registro fósil puede ser una evidencia que apoye la evolución, y para ello se centrará en la de los équidos. Se le presentarán una serie de modelos 3D correspondientes a las patas y los dientes de especies extintas emparentadas con el caballo actual, y por grupos, los estudiantes tendrán que indagar e hipotetizar sobre el orden que pudieron tener a lo largo del tiempo,

y cómo pudieron tener lugar diferentes adaptaciones hasta llegar al caballo que conocen. Podrán analizar la filogenia de esta especie, y relacionarla con los modelos de los fósiles con los que han trabajado para comprender mejor la diversidad de los antepasados de los équidos.

Actividad 6. “Las pruebas paleontológicas II: Buscando al primo lejano del Trilobites”.

En esta actividad se volverá a trabajar con el registro fósil, pero esta vez con un grupo mucho más extenso y diverso, el de los artrópodos. Para demostrar al estudiante que, en ciencia, las hipótesis y teorías están sujetas a cambios y mejoras constantes, para lo cual es importante el uso de distintos tipos de pruebas, ellos mismos explorarán la filogenia de uno de los grupos extintos de los artrópodos, los trilobites. Compararán los fósiles de estos organismos con otros artrópodos actuales, comprendiendo en el camino cómo la amplia diversidad de ciertos grupos puede dar lugar a morfologías muy parecidas entre especies no tan emparentadas como en un principio parecería. Buscarán información sobre los distintos artrópodos que se propondrán, y la plasmarán en mapas conceptuales y presentaciones de clase. También buscarán modelos, que se puedan imprimir en 3D, de dichos artrópodos para poder hacer comparaciones en clase y así explorar la filogenia de este grupo tan amplio, para finalmente encontrar cuál sería el primo lejano actual del trilobites.

Actividad 7. “Las pruebas bioquímicas: investigando el ADN”.

En esta actividad el alumnado explorará una de las pruebas que representa un apoyo más importante a la evolución, las bioquímicas. Para ello se introducirá en el alineamiento de secuencias y en el trabajo científico, formando grupos y colaborando entre todos para obtener las relaciones filogenéticas entre diferentes grupos de homínidos y el ser humano. Esto lo harán construyendo secuencias con piezas de impresión 3D y alineándolas con las de otras especies para obtener una determinada homología mediante un sistema de puntuación que se les enseñará previamente, parecido al que usan los sistemas informáticos con este mismo fin. Los grupos de estudiantes se sumergirán de esta manera en el trabajo científico al tener que desarrollar metodologías, colaborar entre sí y obtener resultados que finalmente publicarán en un “artículo científico” común en el blog de la clase. Además, colaborarán con científicos reales en sus investigaciones a través del juego Phylo, que les enseñará cómo la homología de secuencias genéticas puede ir más allá de la evolución y ayudar en

investigaciones de enfermedades, por ejemplo, comprendiendo en el camino algunos conceptos sobre genética.

Como ampliación, se propondrá que utilicen una herramienta (BLAST) que se usa de manera común en investigación, de manera que se les introducirá al manejo de bases de datos y a la comparación de secuencias genéticas mediante esta herramienta.

Actividad 8. “Convirtiéndose en paleontólogos”.

Con esta actividad los estudiantes explorarán el proceso de hominización y conocerán la diversidad de los homínidos y la filogenia del ser humano. Para ello realizarán, por grupos, una excavación simulada donde los fósiles serán modelos 3D de cráneos de diferentes homínidos, con lo cual también se sumergirán en el trabajo científico, tanto de campo como de laboratorio. Al recogerlos, deberán establecer sus características y una clasificación entre los especímenes encontrados con caracteres que podrían ser considerados más primitivos o más modernos, según los diferentes casos. Con esto deberán indagar y colaborar para descubrir qué especie han descubierto, para presentársela a sus compañeros. Cuando todos conozcan todas las especies encontradas, construirán con éstas un mural que represente la filogenia del ser humano, incluyendo otras especies de homínidos sobre las que tendrán que buscar información, y que completarán los huecos de la filogenia del ser humano, tal y como se conoce hoy en día.

4.3. Actividades

Actividad 1

NOMBRE DE LA ACTIVIDAD: “¿Cómo entendemos la evolución?”

CURSO: 4º de la ESO

TEMPORALIZACIÓN: 1 sesión de 1 hora.

RECURSOS Y MATERIALES:

- Bolígrafos, lápices y papel.
- Ordenadores con conexión a internet.
- Pizarra digital.

CONTENIDOS, CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE:

Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
Bloque 1. La evolución de la vida		
Teorías de la evolución. El hecho y los mecanismos de la evolución.		
Bloque 4. Proyecto de investigación		
Proyecto de investigación.	<p>3. Discriminar y decidir sobre las fuentes de información y los métodos empleados para su obtención.</p> <p>4. Participar, valorar y respetar el trabajo individual y en grupo.</p>	<p>3.1. Utiliza diferentes fuentes de información, apoyándose en las TIC, para la elaboración y presentación de sus investigaciones.</p> <p>4.1. Participa, valora y respeta el trabajo individual y grupal.</p>

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD:

El objetivo que persigue esta actividad es el de extraer las ideas previas del alumnado acerca de los conceptos relacionados con la evolución. Se les pedirá que arranquen una hoja de su libreta y escriban en ella el nombre de la actividad, seguido de un “nickname” o alias de su invención, de manera que se les garantice el anonimato. A continuación se les enseña una serie de preguntas que irán respondiendo en la hoja:

- ¿Cómo se originaron las alas en las aves?
- ¿Cómo han acabado las jirafas teniendo el cuello tan largo?
- ¿Por qué crees que una llama y un camello son tan parecidos entre sí?
- ¿Por qué los dinosaurios no extinguieron a los humanos?
- Cogemos a una pequeña población de moscas y les cortamos las alas. Hacemos lo mismo con sus descendientes y con los descendientes de éstos, y así durante 10 generaciones. ¿Tendrán alas las moscas que nazcan en la 11ª generación?
- Muchos insecticidas que se han usado en casos de plagas han sido eficaces al principio, pero con el tiempo pueden dejar de ser letales para los insectos. ¿Cómo explicas esto?
- Si venimos de los monos, ¿Por qué sigue habiendo monos?
- Tanto un murciélago como una paloma tienen alas. ¿Es esto consecuencia directa de que estén emparentados?
- ¿Sería correcto decir que un humano “está más evolucionado” que un chimpancé?

La hoja será entregada con las respuestas de los alumnos, que servirán al docente como guía para conocer algunas de las ideas previas de la clase sobre procesos evolutivos y adaptaciones.

Con el propósito de conocer en profundidad las ideas de los estudiantes se les propondrá formular una respuesta a tres preguntas relacionadas con sendos casos en los que la selección natural juega un papel muy importante. Estos son los siguientes:

- Introducción a la selección: Para introducir la selección natural, Darwin ya usaba en su libro *El Origen de las Especies* una analogía a la “selección artificial”. Así pues, partiremos del hecho de que todas las razas de perros actuales descienden del lobo, algo que se hará saber a los alumnos. Dicho esto, la cuestión planteada será: **“si tenéis una manada de lobos y queréis obtener a partir de ellos un chihuahua, ¿cómo lo haríais?”**. Una respuesta “correcta” es que los chihuahuas pueden ser obtenidos a partir de los lobos escogiendo

- selectivamente aquellos con hocico corto, cuerpo y cabeza pequeños y pelo duro y corto. Estos lobos se cruzarían entre sí durante muchas generaciones, siempre escogiendo a los que tienen estas características, hasta que obtuviéramos un perro parecido a un chihuahua (Kalinowski et al., 2013).
- Selección sexual: Una idea previa muy común es resumir la selección natural como “la supervivencia de los más aptos”. Sin embargo, hay caracteres en la naturaleza que difícilmente son una ventaja a la hora de sobrevivir. Un ejemplo es la cola del macho del pavo real. Un carácter tan grande y ornamentado resulta muy llamativo a los depredadores, y supone un hándicap a la hora de escapar de los mismos. Así pues, el caso es: **“¿Cómo han acabado los pavos reales con una cola tan ornamentada, siendo esta un hándicap a la supervivencia?”**. La selección natural no funciona exclusivamente a través del éxito en la supervivencia, sino que también es indispensable el éxito en la reproducción para dejar los caracteres heredables a la siguiente generación. Así pues, una respuesta posible estaría relacionada con el hecho de que las colas más ornamentadas atraen más a las hembras, ya que posiblemente el nivel de ornamento esté vinculado a tener unos “buenos genes” (Kalinowski et al., 2013; Møller y Alatalo, 1999). La realidad es que los machos con colas más ornamentadas y coloridas parecen tener un mejor sistema inmune y salud, si bien también hay cierto componente ambiental (Pennisi, 2003).
 - Evolución del comportamiento: Otra idea previa muy típica es pensar que la selección natural favorece siempre caracteres que son “buenos para la especie”. Para comprobar esto usaremos el mito de los suicidios en masa del *lemming* (lemino), un roedor típico de las zonas de tundra y taiga. Para introducir el caso se enseñará un fragmento del documental *White Wilderness* de Walt Disney (1958). Mientras ven el vídeo, el docente explicará que el comentarista no especifica que los *lemmings* se suicidan, pero sí que lo sugiere acompañado de las imágenes que se muestran, en respuesta a una posible sobrepoblación. Así, la pregunta propuesta sería **“¿Podría ser el suicidio una adaptación en los lemmings para evitar la sobrepoblación?”**. Si bien podemos obtener varias teorías sobre cómo los *lemmings* han llegado a tener el suicidio como adaptación, la respuesta ideal es que esto no es posible. La selección natural no escogería un carácter autodestructivo como el suicidio, ya que este no permite que los genes se hereden en la siguiente generación. Y es que la verdadera explicación de que los *lemmings* se “suiciden” está en que el vídeo mostrado a los alumnos fue trucado y manipulado. Las imágenes que se muestran en el vídeo en las que estos roedores se tiran por acantilados fueron manipuladas,

obligando a los animales a saltar, con el objetivo de rodarlo y así ganar el óscar que la academia les concedió en 1958 al mejor documental (Kalinowski et al., 2013).

Tras introducir los casos y las preguntas, los estudiantes se dispondrán en parejas. Para responder, lo harán mediante la creación de un cómic en la herramienta [Stripgenerator](https://stripgenerator.com) (Stripgenerator.com, s.f.) en el que explicarán su respuesta. Podrán elegir entre diferentes personajes, animales u objetos y cambiar la disposición de las viñetas para crear una historieta que narre la respuesta según ellos la han ideado.

Posteriormente, el docente recogerá todas las respuestas y las analizará para extraer las ideas previas existentes en la clase, con objeto de tenerlas en cuenta e incidir sobre ellas a lo largo del resto de las actividades.

COMPETENCIAS:

Comunicación digital: Los estudiantes tienen que utilizar la herramienta Stripgenerator para crear un cómic en el que respondan a las preguntas que se han planteado.

Conciencia y expresiones culturales: El alumnado ha de hacer uso de su creatividad en la realización del cómic.

Actividad 2

NOMBRE DE LA ACTIVIDAD: “Los cinco dedos de la evolución.”

CURSO: 4º de la ESO

TEMPORALIZACIÓN: 3 sesiones de 1 hora.

RECURSOS Y MATERIALES:

- Ordenadores con conexión a internet.
- Pizarra digital

CONTENIDOS, CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE:

Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
Bloque 1. La evolución de la vida		
Teorías de la evolución. El hecho y los mecanismos de la evolución.	17. Comprender los mecanismos de la evolución destacando la importancia de la mutación y la selección.	17.1. Establece la relación entre variabilidad genética, adaptación y selección natural.
Bloque 4. Proyecto de Investigación		
Proyecto de investigación.	<p>3. Discriminar y decidir sobre las fuentes de información y los métodos empleados para su obtención.</p> <p>4. Participar, valorar y respetar el trabajo individual y en grupo.</p> <p>5. Presentar y defender en público el proyecto de investigación realizado.</p>	<p>3.1. Utiliza diferentes fuentes de información, apoyándose en las TIC, para la elaboración y presentación de sus investigaciones.</p> <p>4.1. Participa, valora y respeta el trabajo individual y grupal.</p> <p>5.1. Diseña pequeños trabajos de investigación sobre animales y/o plantas, los ecosistemas de su entorno o la alimentación y nutrición humana para su presentación y defensa en el aula.²</p> <p>5.2. Expresa con precisión y coherencia tanto verbalmente como por escrito las conclusiones de sus investigaciones.</p>

² El alumnado en realidad llevará a cabo algo menos ambicioso que un proyecto de investigación, tratándose más bien de un pequeño trabajo de indagación.

FUNDAMENTACIÓN:

Para introducir al alumnado a los mecanismos más importantes que causan evolución en las poblaciones, utilizaremos el vídeo "[The Five Fingers of Evolution](https://www.youtube.com/watch?v=KWXQ8ouXgxY)" ("Los cinco dedos de la evolución", s.f.). Así, se les presentará la evolución como un proceso que ocurre cuando cambian las frecuencias del acervo genético, es decir, cuando la proporción del conjunto de alelos³ para un determinado gen de una población se modifica.

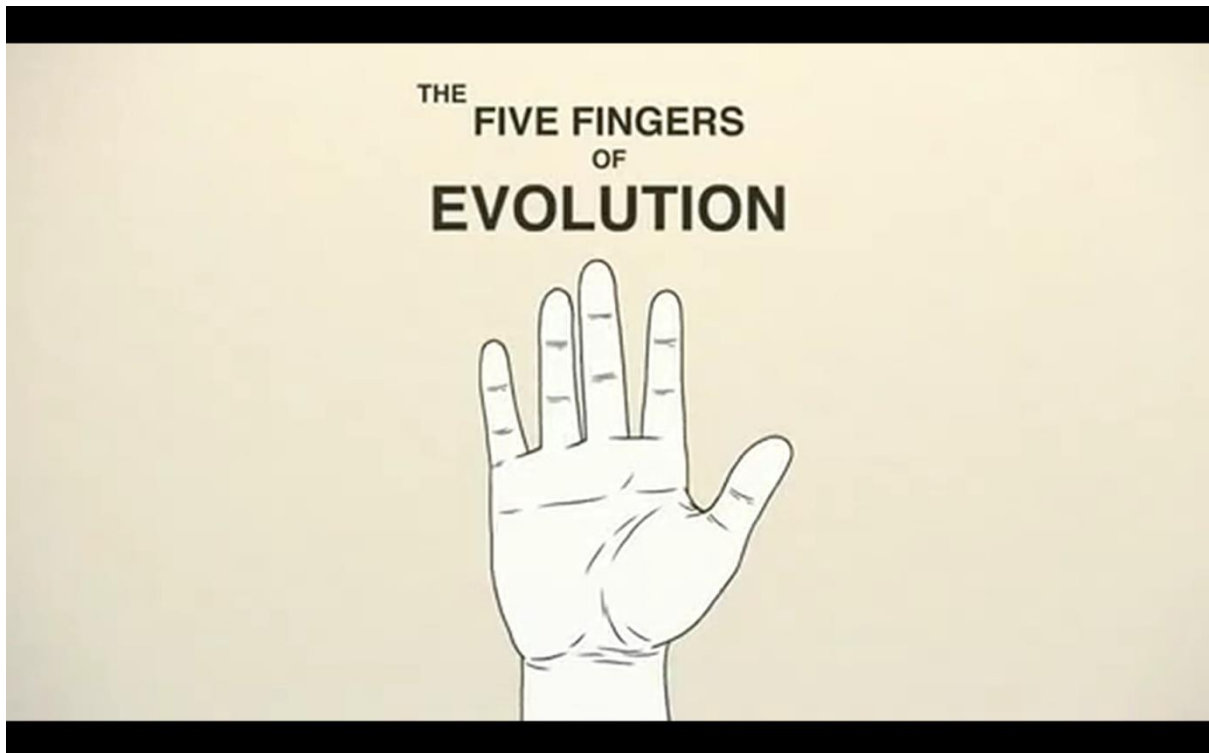


Ilustración 5. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=KWXQ8ouXgxY>. Portada del vídeo.

Los mecanismos presentados en el vídeo son: la deriva genética, el apareamiento no aleatorio, la migración (flujo génico), la mutación y la selección natural. Estos procesos se relacionarán con cada uno de los dedos de la mano de manera mnemotécnica, a fin de facilitar su aprendizaje. Los mecanismos a estudiar serán los siguientes:

- La **deriva genética**, relacionada en el vídeo con el dedo meñique debido a su reducido tamaño, es precisamente la **reducción o separación estocástica** de individuos de una población y, por lo tanto, la eliminación de alelos del acervo genético de una generación a otra, lo que trastoca las frecuencias alélicas y es

³ Cada una de las posibles formas alternativas de un determinado gen. Por ejemplo, el color oscuro o blanco de las mariposas son producto de la representación observable de diferentes variantes de un mismo gen.

causa de evolución. En otras palabras, se basa en el muestreo aleatorio de una población. Podemos clasificar la deriva en diferentes tipos: el *efecto fundador*, caracterizado por el establecimiento de una pequeña población cuyos alelos, elegidos al azar, serán los representantes de la misma cuando esta crezca (siempre y cuando no se den otros mecanismos evolutivos); y el *cuello de botella*, dado por una reducción drástica y al azar de la población debido a algún tipo de catástrofe (Der, Epstein y Plotkin, 2011; Masel, 2012; Otto y Whitlock, 1997).

- El dedo anular, que es el dedo del anillo en el matrimonio y debe recordarnos el emparejamiento, se relaciona bajo esta regla con el **apareamiento no aleatorio**. La elección no azarosa de pareja implica la perpetuación selectiva de alelos, dando lugar a cambios en la proporción de los mismos en la siguiente generación. Esta perpetuación selectiva puede implicar la fijación de alelos que, en muchos casos, pueden estar ligados a una enfermedad, aunque también podrían ser neutros o beneficiosos (Crow, 2010).
- El dedo corazón nos recuerda a la **mutación** al empezar esta palabra por “m” y estar el dedo en el “medio” de la mano, que también empieza por “m” (middle finger en el vídeo). La mutación es un proceso que, siempre y cuando se relacione con la heredabilidad, causará una modificación en las frecuencias alélicas de una población al introducir variaciones espontáneas en los alelos mediante un cambio azaroso en la secuencia o estructura de la información genética (Orr, 2003).
- El dedo índice, uno de los que tiene más movilidad en la mano, recuerda por ello al movimiento, y por lo tanto, a la **migración (flujo génico)**. Mediante este proceso se introducen nuevos individuos desde una población donadora a otra receptora, lo que significa una variación en la frecuencia alélica de ambas poblaciones, ya que una pierde alelos y la otra los añade, modificándose así las proporciones y propiciando la evolución (Morjan y Rieseberg, 2004).
- Por último, el pulgar se relacionará con la **selección natural**⁴, ya que este proceso muestra el “pulgar hacia arriba” en gesto de aprobación cuando una adaptación representa una ventaja sobre la supervivencia o la reproducción y la heredabilidad (Haldane, 1957), o “pulgar hacia abajo”, en gesto de desaprobación si no es así, seleccionando de esta forma aquellos alelos que, mediante la herencia, pasarán a la siguiente generación.

⁴ Como se ha mencionado anteriormente, la evolución biológica se da cuando la proporción del acervo genético es modificada. La selección natural es uno de los mecanismos más importantes que causan evolución, pero no es el proceso de evolución íntegramente, sino uno de los posibles mecanismos que la causan.

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD:

Tras visualizar el vídeo y las aclaraciones que el docente considere oportunas, los alumnos se pondrán por parejas para realizar un pequeño juego. Uno de los componentes de la pareja mostrará uno de los dedos al azar, y el otro tendrá que explicar con qué mecanismo promotor de evolución se relaciona y por qué, de manera que el alumnado asiente los conocimientos que acaba de adquirir. Esto se realizará por turnos mientras el profesor observa si han comprendido los conceptos o no al explicárselos a su compañero.

El alumnado se iniciará en el conocimiento de los diferentes mecanismos mediante la realización de las siguientes tareas, vinculadas a cada uno de ellos.

- Tras las aclaraciones del profesor, si fuesen necesarias, los estudiantes buscarán en grupos información sobre casos conocidos en los que se considera que una determinada población sufrió deriva genética. Esta búsqueda puede realizarse, además, centrándose en animales, por un lado, y en ejemplos que hayan sucedido en poblaciones humanas, por otro. Se pueden encontrar distintos casos clasificados como deriva genética, como por ejemplo la peste negra para los humanos o la excesiva caza que sufrieron ciertas poblaciones del elefante marino en el siglo XIX, que redujeron drásticamente los ejemplares y con ello, la diversidad genética. Cada grupo buscará diferentes casos y se los enseñará al docente, para que no se solapen entre los distintos grupos. Éste asignará un caso a cada grupo para que hagan una presentación en *Prezi*, y expliquen al resto de la clase qué tipo de deriva genética es, por qué sería un caso de deriva genética, el contexto inicial del mismo, y sus consecuencias. Una posible lista de casos puede ser la siguiente, si bien el docente puede añadir cuantos ejemplos le parezcan interesantes:
 - La población Afrikaner de habitantes alemanes en África del Sur y la enfermedad de Huntington.
 - El caso del guepardo (*Acinonyx jubatus*) durante las glaciaciones del Pleistoceno.
 - El enanismo y la polidactilia en los amish.
 - La caza excesiva de los elefantes marinos del norte.
- El apareamiento selectivo o la consanguinidad son ejemplos que el alumnado podrá encontrar en la búsqueda que realizará sobre casos relativos al apareamiento no aleatorio. El caso que se trabajará será la consanguinidad en

la dinastía real de los Habsburgo en su rama española, la casa de Austria, que gobernó en España desde mediados del siglo XVI hasta el siglo XVIII. Esta casa acabó con Carlos II “El hechizado”, así apodado debido a su estado enfermizo y su grotesca apariencia. Su coeficiente de consanguinidad (0.25) implicaba que el 25% de las copias de sus genes eran iguales, ya que había recibido la misma copia por parte de madre y padre, debido a un largo historial familiar (Ceballos y Álvarez, 2013). El alumnado buscará información sobre las enfermedades hereditarias que pudo haber sufrido Carlos II, el árbol genealógico de su familia remarcando las relaciones de incesto, el concepto de coeficiente de consanguinidad y cómo se aplica a este caso. Con todos los datos reunidos, se hará una infografía mediante la aplicación online [Thinglink](#) (s.f.), una herramienta en la que se puede anclar información a una imagen mediante textos, vídeos u otros recursos, de forma muy sencilla. Cada estudiante realizará y entregará su infografía, y las tres mejores votadas entre el alumnado se añadirán al blog de clase.

- Para indagar sobre la importancia de las mutaciones en la evolución, el trabajo de los estudiantes se centrará en el origen del color azul del ojo humano. Para ello se analizará la noticia “Las personas con ojos azules descienden de un solo antepasado que vivió hace 6.000 años” (2008). El análisis crítico consistirá en que los estudiantes lean la noticia y la comparen con una transposición del artículo original (Eiberg et al., 2008) que se incluye en este TFM (anexo II). Esta comparación quedará reflejada en un informe que reúna las ideas principales, como la metodología que se sigue, qué se sabe de la genética del color de los ojos según la versión periodística o la adaptación de la versión científica y en el que reflejarán el significado de una serie de tecnicismos (marcados en azul). Si bien el artículo tiene un nivel bastante exigente, no es necesario que se entienda todo, si no que se extraigan los puntos citados anteriormente.
- Para trabajar el flujo génico, los estudiantes no buscarán un caso conocido, sino que harán uno ellos mismos mediante la herramienta de animación [Scratch](#) (s.f.). En grupos, deberán realizar un pequeño vídeo de animación de medio minuto de duración aproximada en el que ejemplifiquen y expliquen un caso de migración que diseñen ellos mismos mediante texto insertado en el vídeo. Así pues, los estudiantes deben buscar y comprender qué es el flujo génico para que puedan plasmarlo en el vídeo de animación. El docente otorgará a cada grupo un animal, que puede ser elegido de entre las imágenes predefinidas o puede ser dibujado por los alumnos a través de la herramienta de dibujo de la aplicación. Ese animal deberá ser dividido en dos grupos con unas

características diferentes (color, forma, una enfermedad representada mediante alelos explicada por texto insertado en el vídeo...) y se mostrará cómo se produce el flujo génico entre un grupo y otro, presentando mediante la animación y el texto el contexto en el que tiene lugar, y las consecuencias que supone para una población y otra. Para explicarlo mejor, tomaremos como ejemplo la migración de escarabajos explicada en [Understanding Evolution](#) (University of California Museum of Paleontology & National Center for Science Education, s.f.) Una vez los estudiantes hubiesen comprendido el proceso, dibujarían y diseñarían el contexto de la animación y añadirían explicaciones; por ejemplo, un grupo de escarabajos más pequeño y de un determinado color está en una isla y a algunos se les ve volar hasta otra isla con otro tipo de escarabajos diferente. En las siguientes escenas se vería cómo surgen escarabajos que comparten colores debido a que ciertos alelos se han introducido en la población más grande, ha habido cruces, etc. Al final quedaría un vídeo en el que cada grupo ha explicado, a su manera, un ejemplo de migración con distintos animales.

- Los estudiantes buscarán información sobre los pinzones de Darwin para comprender mejor la importancia del flujo génico y la selección natural. Por una parte, el alumnado buscará información sobre la historia exacta del descubrimiento de la importancia evolutiva de los pinzones, ya que con frecuencia esta se presenta como si hubiese sido únicamente Darwin el que analizó la taxonomía de los mismos, omitiéndose en muchas ocasiones el trabajo de John Gould, taxónomo que identificó diversas especies de estas aves, lo que jugó un papel importante en el desarrollo del trabajo de Charles Darwin. Por otra parte, los estudiantes investigarán sobre la evolución de las distintas especies de pinzones, ya que en esta no sólo fue importante la selección natural sino también la hibridación (flujo génico) entre especies, hechos que tendrán que descubrir por sí mismos a partir de la búsqueda de información. La historia detrás del descubrimiento del caso y la explicación de cómo evolucionaron los pinzones quedará reflejada en un blog de clase, enfocado como si fuese un artículo de una revista científica.

COMPETENCIAS :

Comunicación lingüística: Los estudiantes han de redactar textos y elaborar diálogos donde tienen que expresar la información de forma precisa y por medios diferentes, como presentaciones de clase, artículos en blogs, o vídeos de animación.

Competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología: El alumnado investiga sobre el contexto científico de ciertos casos relacionados con la biología y debe comunicar dichos hallazgos con un lenguaje científico, utilizando herramientas informáticas. También ha de aprender cómo se transmite en ciencia esta información, mediante la realización de un informe a partir de un artículo científico y un artículo periodístico que tratan sobre el mismo tema.

Competencia digital: Los estudiantes usan aplicaciones informáticas con el fin de transmitir conocimientos y crear contenido de manera creativa, por ejemplo, mediante la elaboración un vídeo de animación.

Conciencia y expresiones culturales: Se potencia la creatividad e imaginación del alumnado al realizar un vídeo de animación sobre un caso de flujo génico que ellos mismos deben inventar.

Actividad 3

NOMBRE DE LA ACTIVIDAD: "El teatro del melanismo industrial"

CURSO: 4º de la ESO

TEMPORALIZACIÓN: 1 sesión de 1 hora.

RECURSOS Y MATERIALES:

- Cartulinas tamaño A3, negras y blancas.
- Tijeras para realizar los recortes de las mariposas.
- Pizarra Digital.

CONTENIDOS, CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE:

Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
Bloque 1. La evolución de la vida		
Teorías de la evolución. El hecho y los mecanismos de la evolución.	16. Conocer las pruebas de la evolución. 17. Comprender los mecanismos de la evolución destacando la importancia de la mutación y la selección.	16.1. Distingue las características diferenciadoras entre lamarckismo, darwinismo y neodarwinismo 17.1. Establece la relación entre variabilidad genética, adaptación y selección natural.

FUNDAMENTACIÓN:

En la presente tarea se introducirá al alumnado al concepto de selección natural mediante el caso de *Biston betularia*, la mariposa del abedul, también llamado del “melanismo industrial”, uno de los más utilizados para ejemplificar el proceso de selección natural a corto plazo. Para ello se realizará una representación en el aula, con la participación de los alumnos y utilizando un material muy simple: cuatro cartulinas (dos de color blanco y dos negras) con la que se harán las mariposas y que también representarán el abedul donde se posaban, y algún objeto que dificulte la visión de los colores.

Recordemos que la mariposa del abedul, un lepidóptero⁵ nocturno cuyo color grisáceo-blanquecino le daba la capacidad de confundirse en el entorno con los abedules cubiertos de líquenes, sufrió un cambio de frecuencias en sus poblaciones que afectó a sus diferentes variedades. Las dos principales, producto de la propia diversidad de la especie, y que jugaron un papel protagonista en esta historia, son: la variedad *typica* del color anteriormente mencionado, y la variedad melánica *carbonaria*, mucho más oscura y que fue descrita por primera vez en 1848 (Majerus, 1999). El aspecto de ambas se puede observar en la ilustración 6.

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD:

El contexto de este caso se sitúa en Manchester a mediados del siglo XIX, y será explicado por el docente, sirviéndose de una teatralización de la historia. En primer lugar, se recordará a los estudiantes que la mencionada zona tuvo gran repercusión en la revolución industrial, lo que afectó a los bosques de abedules cercanos. Estos árboles, cubiertos de líquenes, lo que les daba un aspecto blanquecino, serán representados por una cartulina blanca tamaño A3 que el profesor pondrá encima de la mesa. Después pasará a presentar las dos principales variedades de mariposas de abedul ya mencionadas, haciendo especial ahínco en la idea de que esta variedad se sustenta en la diversidad de la especie. La variedad *typica* se representará mediante recortes en cartulina blanca que traerá el docente ya hechos, y la variedad *carbonaria* quedará representada por recortes de cartulina negra (ver ilustración 7). Se depositarán cinco de estos recortes por cada variedad (en un principio partiremos de unas frecuencias del 50%) en la cartulina blanca, representando cómo se posaban estas

⁵ Perteneciente al orden *Lepidoptera*, artrópodos dentro de la clase *Insecta*, en su mayoría voladores.



Ilustración 6. Fuente: <http://omodeo.anisn.it/omodeo/A%20B/biston.htm>. Variedad *carbonaria* (abajo) y variedad *typica* (arriba).

mariposas en los abedules. Hecho esto, el profesor o profesora escogerá a alguien entre el alumnado que representará el papel de depredador. Dado que las “mariposas” son en realidad de cartulina y por lo tanto no pueden reaccionar ante un estímulo de amenaza y que el “alumno depredador” probablemente tenga una buena vista, es necesario añadir un hándicap visual que hará que el “camuflaje” de las mariposas sea más efectivo: el objetivo es hacer que las *B. betularia* blancas apenas sean visibles en el fondo del mismo color. Para esto, se puede usar un pañuelo que no sea totalmente opaco o unas gafas cubiertas con algún tipo de material que dificulte la visión de los colores, de forma que en el fondo blanco las mariposas negras quedarán resaltadas mientras que las más claras apenas serán visibles.

A continuación, es importante que el alumnado comprenda el efecto de la depredación sobre las frecuencias poblacionales que serían las iniciales para mediados del siglo XIX, es decir, por qué en un principio la frecuencia de la variedad *typica* era mayor que la de *carbonaria*. Para ello, el alumno o alumna escogido para ser el depredador, con el mencionado hándicap visual, escogerá tres mariposas al azar, con un gesto rápido y sin dudas. Estas habrán sido depredadas y se retirarán de la cartulina. Si la dificultad visual

ha cumplido su cometido, resaltando sobre el fondo blanco las mariposas negras y “camuflando” a las blancas, gran parte o la totalidad de las mariposas elegidas serán oscuras. Con esto, obtenemos en la cartulina un ejemplo de lo que podría ser la frecuencia inicial de variedades en los bosques de abedules de Manchester alrededor de 1850, con un mayor número de ejemplares blancos, por lo que tenemos el punto de partida para nuestra historia. A partir de aquí podemos añadir otra generación, añadiendo unas cuantas mariposas más, y pedirle a nuestro alumno depredador que actúe de nuevo retirando un determinado número de polillas, para mostrar cómo al cabo de varias generaciones la selección natural sigue interviniendo en las frecuencias de la población. Al añadir una nueva generación, el docente debe tener en cuenta que en esta época había una dominancia incompleta⁶ de la variedad *carbonaria* sobre la *typica*, si bien en la actualidad la dominancia es completa. La proporción de mariposas blancas y negras que se añadan de una generación a otra dependerá mucho de la frecuencia de ambas variedades en la generación parental, pero conociendo cuál es esta relación de dominancia, el docente puede pensar en una proporción aproximada para ambas. Tomemos, por ejemplo, el punto de partida del que hablamos, donde hay más blancas que oscuras, y que tenemos siete mariposas, donde sólo dos son negras y el resto blancas. Si el profesor quisiese añadir cinco mariposas más, por mucho que la dominancia de *carbonaria* esté presente, tres de esas mariposas podrían ser blancas, debido a la frecuencia de alelos de *typica* en la población, y a que no sabemos si las diferentes mariposas oscuras son heterocigotas u homocigotas⁷.

Tras esto, llegamos a un punto de inflexión en el relato. Sirviéndonos de la teatralización que debe caracterizar a esta tarea, el docente recuerda y traslada a los alumnos a mediados del siglo XIX, una época en la que la revolución industrial hizo que la contaminación en zonas urbanas y sus alrededores aumentara exponencialmente. Así, los bosques de abedules cercanos a la zona industrial de Manchester quedaron, con el tiempo, ennegrecidos por el hollín que expulsaban las fábricas. Es entonces cuando el profesor o profesora debe cambiar la cartulina blanca que estaba de fondo, representando a la corteza del abedul al natural, por la negra, que representa la corteza

⁶ Algunos autores defienden que los especímenes victorianos de *carbonaria* tenían escamas blancas en el centro de sus alas. Esto significa que el fenotipo (la forma observable del carácter) esperado no se manifiesta de manera íntegra en el individuo, sino mostrando también características de *typica*, a lo que llamamos dominancia incompleta.

⁷ Es decir, no sabemos si tienen ambos alelos diferentes o si son idénticos. En la actualidad se sabe que este carácter está controlado por cinco alelos, existiendo diferentes fenotipos correspondientes a *carbonaria*, varias formas de *insularia*, y por último, *typica*.



Ilustración 7. Fuente: Elaboración propia. El fondo hace que el alumno, provisto de un hándicap visual, no pueda ver las mariposas oscuras.

ennegrecida por la contaminación, como se puede ver en la ilustración 7. Dejaremos las polillas que teníamos antes (con la posibilidad de añadir algunas más debido a una siguiente generación) y nuestro depredador volverá a actuar.

Esta vez, al tener fondo oscuro, serán las mariposas negras las favorecidas y las blancas las eliminadas principalmente por depredación. Esta actuará cuantas veces sean necesarias, siempre teniendo cuidado de ir añadiendo nuevos individuos cada vez que se cambie de generación, hasta que veamos que las frecuencias son favorables para las mariposas negras, de variedad *carbonaria*. Mediante el aumento de individuos oscuros, han de comprender por qué, a finales del siglo XIX, la frecuencia de la variedad *carbonaria* era del 95%. El alumnado habrá visto un ejemplo de cambio por selección natural. El docente puede entonces hacer que sus alumnos deduzcan la relación existente entre el proceso de la selección natural con el éxito en la supervivencia y en la reproducción, tras conocer el caso de *Biston betularia*, haciendo diferentes preguntas.

- ¿Cómo han cambiado las frecuencias a lo largo del tiempo?
- ¿Qué factores clave han hecho cambiar estas frecuencias?
- ¿Tiene que ser heredable esta característica para que haya selección natural?

- ¿Cómo habría explicado este caso Lamarck?
- ¿Cómo pudo haber surgido la primera mariposa de variedad *typica*?

El docente puede añadir cuantas preguntas quiera, especialmente dirigidas a comparar puntos de vista desde el lamarckismo, con lo que conectará con las ideas previas del alumnado, y desde el darwinismo cuando hayan visto este caso de selección natural. A su vez, puede también incidir en la importancia de la variedad genética o de una posible mutación que pudo dar lugar a la diversidad de estas mariposas, conectando así con el neodarwinismo.

COMPETENCIAS:

Competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología: Se desarrolla al poder analizar un caso conocido en ciencia, el melanismo industrial de *Biston betularia*, que les introduce a la comprensión de la selección natural y adaptación mediante diferentes preguntas.

Aprender a aprender: Los estudiantes han de reflexionar sobre sus propias concepciones, normalmente relacionadas con el Lamarckismo.

Actividad 4

NOMBRE DE LA ACTIVIDAD: “La evolución en nuestros brazos”.

CURSO: 4º de la ESO

TEMPORALIZACIÓN: 1 sesión de 1 hora.

RECURSOS Y MATERIALES:

- Rotuladores de colores.
- Piezas de impresión 3D.
- Pizarra Digital.

CONTENIDOS, CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE:

Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
Bloque 1. La evolución de la vida		
Teorías de la evolución. El hecho y los mecanismos de la evolución.	16. Conocer las pruebas de la evolución.	16.1. Distingue las características diferenciadoras entre lamarckismo, darwinismo y neodarwinismo. ⁸
Bloque 4. Proyecto de investigación		
Proyecto de investigación.	<p>1. Planear, aplicar, e integrar las destrezas y habilidades propias de trabajo científico.</p> <p>2. Elaborar hipótesis, y contrastarlas a través de la experimentación o la observación y argumentación.</p> <p>4. Participar, valorar y respetar el trabajo individual y en grupo.</p>	<p>1.1. Integra y aplica las destrezas propias de los métodos de la ciencia.</p> <p>2.1. Utiliza argumentos justificando las hipótesis que propone.</p> <p>4.1. Participa, valora y respeta el trabajo individual y grupal.</p>

⁸ Si bien se ha incluido el criterio 16, el estándar correspondiente puede no estar directamente relacionado con la actividad. En este aspecto, el Real Decreto muestra cierta inconsistencia al no abarcar todos los aspectos del criterio añadiendo más estándares, por lo que se ha puesto el único que había.

FUNDAMENTACIÓN:

En esta tarea, los alumnos trabajarán con una de las herramientas más utilizadas a la hora de aportar pruebas de la teoría de la evolución: el estudio de los órganos homólogos.

Esta teoría, en contraposición al fijismo, postula que todos los organismos comparten relaciones de parentesco cuyo origen se puede rastrear hasta un antecesor común. Por esta razón las semejanzas anatómicas entre diferentes individuos supusieron un factor de estudio de gran importancia, ya que la comparación anatómica de estas similitudes sólo encontraban explicación si las diferentes especies estaban relacionadas mediante un antecesor común. Ante este hecho, encontrar semejanzas anatómicas u homologías estructurales aporta pruebas que apoyan esta teoría.

Una de las homologías estructurales más estudiadas es la del llamado miembro quiridio, que define la organización estructural básica de las extremidades de los vertebrados tetrápodos, relacionando grupos como los reptiles, las aves, los mamíferos y los anfibios. Los animales pertenecientes a estos grupos tan diferentes tienen un plan óseo estructural de las extremidades similar, ya sean acuáticos, terrestres o voladores, lo que, con independencia de su hábitat, nos proporciona una pista para deducir que todos ellos comparten una ascendencia común (Shubin, Daeschler y Coates, 2004; Zamora, 2002).

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD:

Antes de introducir el concepto de miembro quiridio, se invitará a los alumnos a pensar si es posible que exista alguna relación entre las extremidades superiores de siete animales pertenecientes a tres grupos diferentes: mamíferos (humano, murciélago, ballena, león y caballo), aves (pájaro) y anfibio (rana). Se les mostrarán fotografías de las siete extremidades (ver ilustración 8), y se les dejará un tiempo para discutir las distintas respuestas. Mediante las proposiciones de los alumnos y la guía del profesor, se deberá llegar a la conclusión de que estos animales, a pesar de pertenecer a clases bastante dispares y vivir en hábitats y condiciones muy diferentes (unos son voladores, otros terrestres, y otros acuáticos), tienen una característica fundamental en común: la presencia de extremidades (al menos las anteriores). Además, deberían concluir que es muy posible que tengan alguna similitud más, algún parecido “oculto” a la vista, pero que se podría deducir si pudiéramos ver el interior de esos miembros.



Ilustración 8. Fuentes (de izquierda a derecha y de arriba a abajo): [Brazo humano](#), [ala pájaro](#), [pata anfibio](#), [pata león](#), [aleta ballena](#), [pata caballo](#), [ala murciélago](#). A simple vista pueden parecer diferentes, pero todas las especies comparten el mismo esquema óseo.

A continuación se les explicará qué es el miembro quiridio, dándoles a conocer las partes en que se divide, usando para ello el ejemplo concreto de un animal, como el mostrado en la ilustración 9:

- Estilopodio: Corresponde al húmero en caso de extremidades delanteras, unidas a la cintura escapular, o al fémur en el caso de las extremidades traseras, unidas a la cintura pélvica.
- Zeugopodio: Formado por dos huesos dispuestos de forma paralela, el cúbito y el radio (o la tibia y el peroné).
- Autopodio: Formado por los huesos de la muñeca y tarsos.

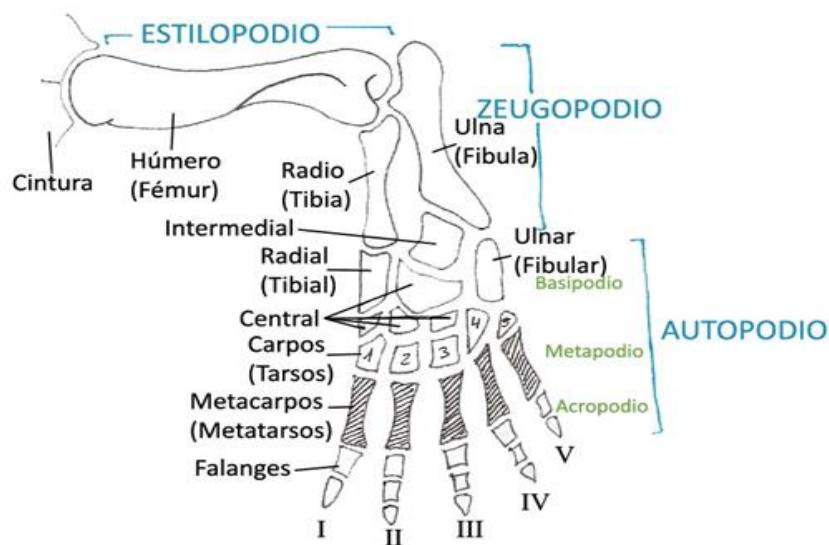


Ilustración 9. Fuente: <https://inakiresa.wordpress.com/tag/quiridio/>. Esquema óseo del miembro quiridio.

Una vez presentada esta estructura básica es cuando se repartirán los modelos de impresión 3D. Los modelos corresponden a extremidades de los 7 animales ya mencionados, por lo que hay 7 de ellos para cada uno de los grupos en los que se dividirán los alumnos de la clase. Cada equipo buscará el plan básico del miembro quiriridio en cada uno de los modelos, identificando cada parte con un color específico (uno para el estilopodio, otro para el zeugopodio, y otro para el autopodio, como puede verse en la ilustración 10). Los alumnos deben comprobar que las tres estructuras óseas se hallan presentes en todos los miembros, y que su disposición relativa es la misma en todos los casos.

A continuación, y a fin de que obtengan algunas conclusiones adicionales, se les plantearán las siguientes preguntas:

- ¿Habéis encontrado el estilopodio, zeugopodio y autopodio en todos los animales, a pesar de ser tan diferentes entre ellos?
- ¿Es casualidad esta homología ósea a niveles tan específicos? ¿Cómo podríamos explicar estas semejanzas?

Deben concluir que tales semejanzas anatómicas sólo se explican si todos estos animales provienen de un antecesor común. Es entonces cuando el profesor podrá introducirles algunos animales extintos, tan extraños como el *Tiktaalik* o el *Acanthostega* (ver ilustración 11), los primeros en tener un “rudimento” de lo que sería, tras un largo tiempo de evolución, el miembro quiriridio.



Ilustración 10. Fuente: Elaboración propia. Alumnos del I.E.S. Severo Ochoa realizando la actividad.



Ilustración 11. *Arriba*. Fuente: http://36.media.tumblr.com/tumblr_m467vffaOR1r4zy85o1_1280.jpg. Tiktaalik, uno de los primeros animales en tener un miembro quiridido primitivo. *Abajo*. Fuente: elaboración propia. Modelo impreso por el autor del cráneo de un Acanthostega.

COMPETENCIAS:

Competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología: El alumnado reflexiona sobre la anatomía comparada de diferentes especies, comprobando físicamente la estructura ósea compartida en diferentes vertebrados. A partir de ahí, ha de extraer sus propias conclusiones respecto a la evolución.

Competencias sociales y cívicas: Los estudiantes colaboran para encontrar las estructuras óseas de todos los modelos y marcar cada una de ellas de un determinado color, discutiendo entre ellos y consensuando una respuesta común.

Actividad 5

NOMBRE DE LA ACTIVIDAD: “Las pruebas paleontológicas: El camino del caballo”.

CURSO: 4º de la ESO

TEMPORALIZACIÓN: 1 sesión de 1 hora.

RECURSOS Y MATERIALES:

- Piezas de impresión 3D.
- Pizarra digital.

CONTENIDOS, CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE:

Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
Bloque 1. La evolución de la vida		
Teorías de la evolución. El hecho y los mecanismos de la evolución.	<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.</p> <p>18. Interpretar árboles filogenéticos.</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>18.1. Interpreta árboles filogenéticos.</p>
Bloque 4. Proyecto de investigación		
Proyecto de investigación.	<p>1. Planear, aplicar, e integrar las destrezas y habilidades propias de trabajo científico.</p> <p>2. Elaborar hipótesis, y contrastarlas a través de la experimentación o la observación y argumentación.</p> <p>4. Participar, valorar y respetar el trabajo individual y en grupo.</p>	<p>1.1. Integra y aplica las destrezas propias de los métodos de la ciencia.</p> <p>2.1. Utiliza argumentos justificando las hipótesis que propone.</p> <p>4.1. Participa, valora y respeta el trabajo individual y grupal.</p>

FUNDAMENTACIÓN:

Las especies extintas que hemos visto anteriormente, también conocidas como **formas de transición**, servirán al docente como puente de conexión con otra de las pruebas de la evolución: las pruebas fósiles o paleontológicas.

Para aprender sobre estas, se estudiará en clase el ejemplo de la evolución del caballo. La transición entre los diferentes géneros de la familia *Equidae* es amplia a lo largo del tiempo y diversa en especies. El estudio y observación del registro fósil nos permitirá reconstruir, en parte, su historia evolutiva, proponiendo, por un lado hipótesis sobre el tipo de alimentación que tuvieron, a partir de la observación de su dentición, y por otro, determinando su capacidad de desplazamiento a partir de la morfología de sus patas.

Lejos de ir en una sola dirección, la evolución en esta familia ha dado lugar a diversas ramas, algunas ya extintas, emparentadas con el género del caballo actual, el género *Equus*. Las principales características que estudiaremos serán la forma del diente y su corona, y el número y disposición de los dedos en las patas, así como su longitud. Para ello analizaremos una serie de especímenes de diferentes géneros cuyo origen se remonta a hace 50 millones de años, en la época del Eoceno.

En el contexto evolutivo, unos de los primeros representantes conocidos de los équidos fueron *Hyracotherium* o *Sifrhippus*, en el Eoceno inferior. Los dientes de estos tenían una estructura propia de los ramoneadores⁹, y caminaban apoyando todos sus dedos, que eran cuatro en las patas anteriores y tres en las posteriores. El tamaño de estos animales también era considerablemente menor, similar al de un perro actual. De estos géneros surgieron linajes que, a través del tiempo fueron evolucionando, tendiendo progresivamente hacia el aumento del tamaño corporal, la reducción de los dedos de las patas y, más tarde, en el Mioceno (hace aproximadamente 20 m.a.), hacia cambios graduales en el tipo de alimentación que denotaban el paso de ramonear a pastar. La explicación que se usa para argumentar estas modificaciones es la de un cambio en el hábitat que alcanzó su cénit en el Mioceno, consistente en una desecación del clima y un cambio del paisaje, que pasó a ser pradera, fundamentalmente. Estas transformaciones del hábitat hicieron que factores como la capacidad de correr más rápido y el alimentarse de hierba fueran ventajosos, lo que propició, por medio de la selección natural, unas morfologías diferentes en las patas y en los dientes. El caminar

⁹ Aquellos animales que se alimentan de las puntas de las ramas, hojas y brotes tiernos de poca altura de los árboles.

sobre la punta del dedo central debió ser un factor determinante para el aumento de la velocidad en la carrera, al igual que el tener una dentición hipsodonta, con la corona del diente más elevada (Zamora, 2002).

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD:

Presentando a géneros extintos como *Sifhippus*, *Mesohippus*, *Parahippus*, *Calippus* o *Dinohippus*, el alumnado tendrá que averiguar, según las características de sus patas y dientes, qué orden siguieron en la evolución, argumentando el porqué.

Para ello, la clase se dividirá en grupos, y a cada uno se le entregará una tanda de modelos 3D consistente en la pata anterior y un diente de algunas de las especies ya mencionadas, que se darán a conocer brevemente (ver ilustraciones 12 y 13). Además, se añadirá una quinta, la del caballo actual, el género *Equus*. El alumnado, conocedor de la morfología de un este último, sabrá distinguir al instante qué pata corresponde a este animal y podrá observar la forma de su diente, que se encontrará al lado de esta.

El docente actuará como guía, indicando a los estudiantes que para encontrar un orden deben empezar por sus conocimientos básicos, como base de partida, ya que saben cómo se desplaza un caballo actual y cómo se alimenta. Así, cada grupo tendrá que ordenar los cinco géneros según la morfología que ven representada en el registro fósil impreso en 3D, discutiendo entre los integrantes de cada equipo las razones del orden que han elegido, tanto para las patas como para los dientes, que irán emparejados en



Ilustración 12. Fuente: Elaboración propia. De izquierda a derecha, se muestran las patas de *Orohippus*, *Mesohippus* y *Miohippus*. Los modelos respetan el tamaño relativo de los tres especímenes.

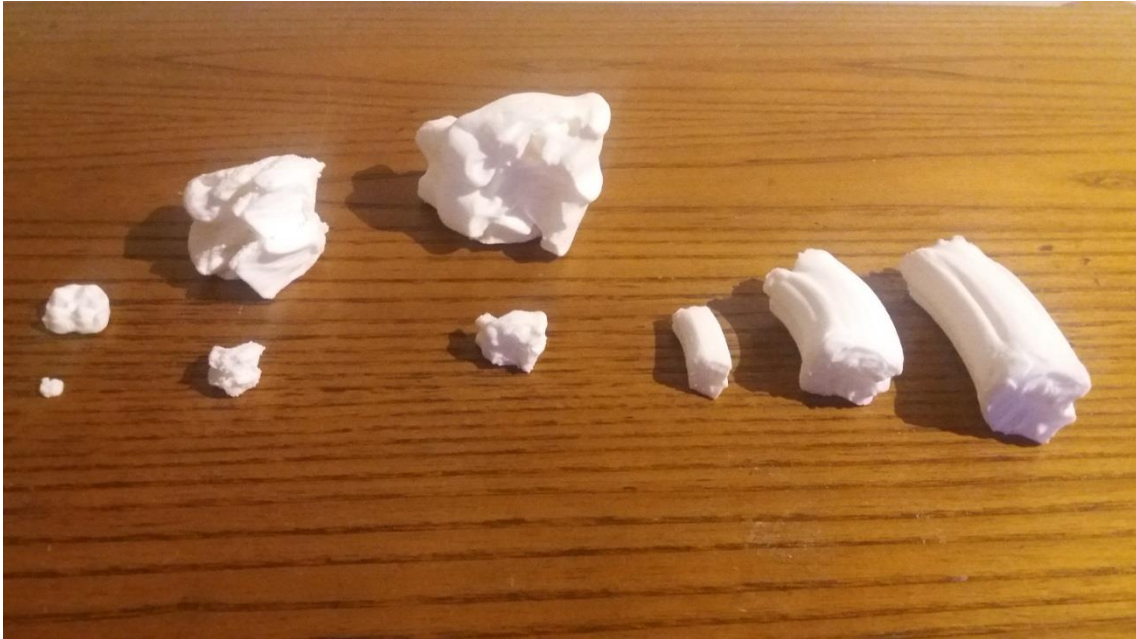


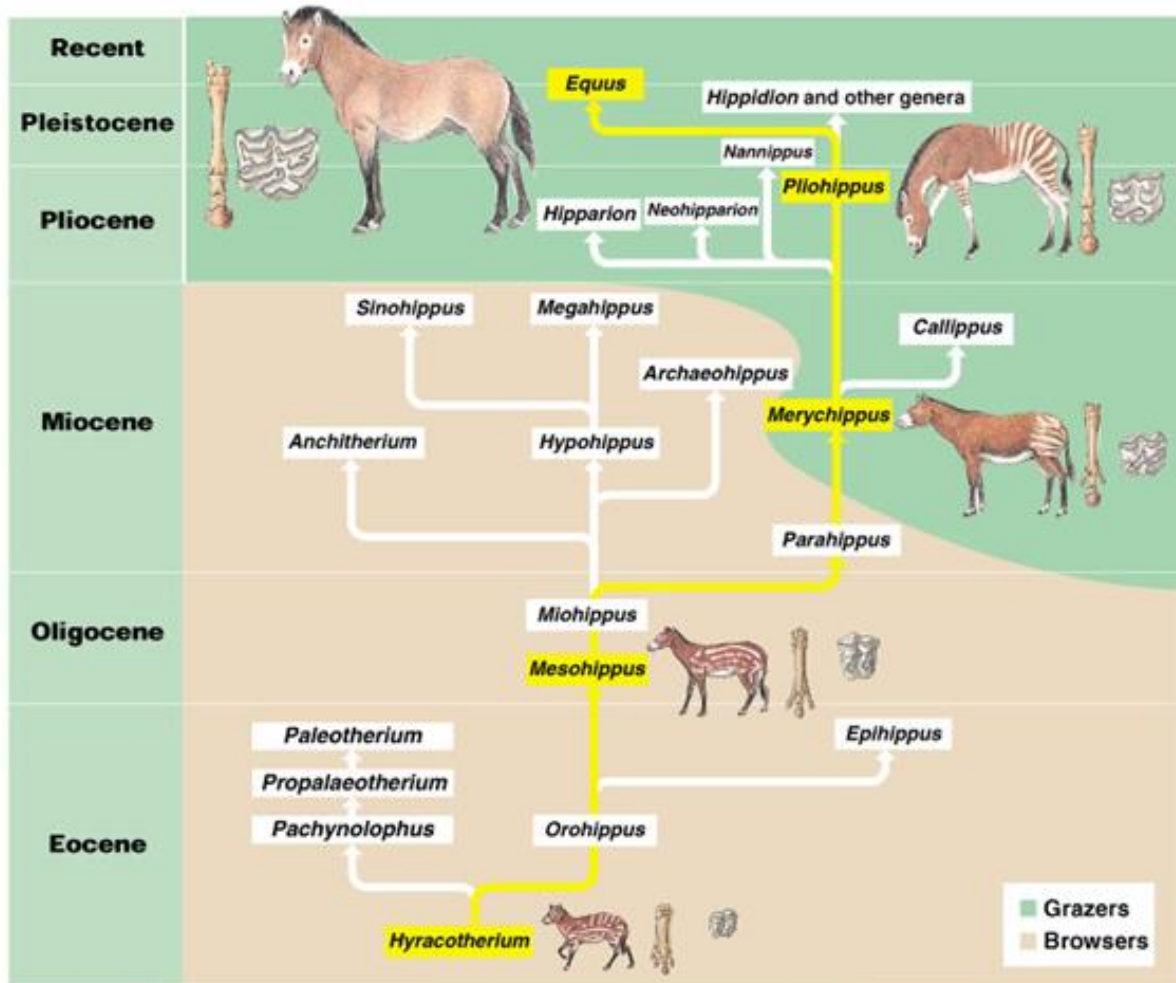
Ilustración 13. Fuente: elaboración propia. El docente puede elegir qué especies dar a conocer a sus alumnos. En la imagen, de izquierda a derecha, se muestran los dientes de *Dinohippus*, *Calihippus*, *Sifrhippus*, *Parahippus*, *Mesohippus* y *Equus ferus*. Los tres primeros están a diferentes escalas, para su mejor observación.

todo momento. Se hará hincapié en que desarrollen estas razones en la discusión, para que todo el grupo comprenda el orden consensuado de los fósiles. Esto pueden hacerlo ayudados de una imagen que represente un dibujo de cada espécimen, pero sin mostrar sus estructuras óseas. De esta manera, cada equipo diseñará una hipótesis que explique el orden que han escogido, tanto para los dientes como para las patas, y siempre partiendo de la base de lo que ya saben sobre las teorías más aceptadas de la evolución, de manera que puedan desarrollar un pensamiento basado en procesos que causen evolución (selección natural, mutación, etc.). Así, el docente podrá intuir hasta dónde ha comprendido el alumnado estas teorías, ya que tendrá que aplicar lo que sabe de Neodarwinismo, Darwinismo y Lamarckismo para diseñar su hipótesis.

La hipótesis que diseñe cada equipo se someterá a discusión en clase, de manera que cada vez que se presente una, los otros grupos deberán tratar de falsarla esgrimiendo argumentos razonables, en un debate en el que el docente actuará como mediador. Lo ideal en este punto es que la clase llegue a la conclusión correcta por sí misma a través de la discusión. Si bien en un principio el docente no apoyará a ningún grupo, hacia el final del debate anunciará cuáles se han acercado más a las hipótesis actuales sobre la evolución de los équidos, aunque habrá sido el alumnado el que haya ido reconstruyendo la historia evolutiva de este grupo mediante los modelos fósiles. De aquí podrá deducir también la importancia del registro fósil como prueba de la evolución, ya que los diferentes géneros de équidos parten de un antecesor común. Para ello el

docente puede recordarles cómo los primeros tetrápodos tenían varias falanges, si bien es preferible que el alumnado llegue a esta evidencia por sí mismo y que sea de ahí de donde partan sus hipótesis. Como ayuda, se proponen las siguientes preguntas, enfocadas a ir guiando al alumnado:

- Partiendo del tipo de alimentación que tienen ahora los caballos y fijándonos en su dentición, ¿Qué tipo de alimentación pudieron tener las otras especies?
- Si conocemos cómo es la pata del caballo actual, ¿Cómo pudieron ser las de sus predecesores? (¿Con más o con menos dedos?)
- Recordad lo que aprendimos acerca del miembro quiridio. ¿Tenían los autopodios de los primeros tetrápodos varios dedos? ¿Sería posible que el tener varios dedos fuese una característica más primitiva?
- Por último el docente les dará a conocer la filogenia completa del caballo (ver ilustración 14).



Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

Ilustración 14. Fuente: <http://tuereslaciencia.blogspot.com.es/2012/04/evolucion-del-caballo.html>. Árbol filogenético del caballo.

COMPETENCIAS:

Competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología: El alumnado diseña hipótesis, junto con sus compañeros, basadas en la observación y el razonamiento de los diferentes conceptos que maneja al explorar la filogenia de los équidos.

Aprender a aprender: El estudiante es partícipe de su propio aprendizaje al proponer hipótesis y razonarlas ante los compañeros, a partir de la observación de los modelos. Además, a lo largo de la actividad han de analizar cómo sus respuestas cambian, contrastando sus hipótesis, justificando sus argumentos y autoevaluando su comprensión de los diferentes mecanismos evolutivos que han visto.

Competencias sociales y cívicas: Los estudiantes colaboran para encontrar las estructuras óseas en cada modelo, compartiendo el trabajo y discutiendo en grupo las conclusiones a las que han llegado.

Actividad 6

NOMBRE DE LA ACTIVIDAD: “Las pruebas paleontológicas II: Buscando al primo lejano del Trilobites”.

CURSO: 4º de la ESO

TEMPORALIZACIÓN: 4 sesiones de 1 hora

RECURSOS Y MATERIALES:

- Piezas de impresión 3D.
- Ordenadores con conexión a internet.
- Pizarra digital.

CONTENIDOS, CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE:

Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
Bloque 1. La evolución de la vida		
Teorías de la evolución. El hecho y los mecanismos de la evolución.	16. Conocer las pruebas de la evolución. 18. Interpretar árboles filogenéticos.	16.1. Distingue las características diferenciadoras entre lamarckismo, darwinismo y neodarwinismo. ¹⁰ 18.1. Interpreta árboles filogenéticos.
Bloque 4. Proyecto de investigación		
Proyecto de investigación.	1. Planear, aplicar, e integrar las destrezas y habilidades propias de trabajo científico. 2. Elaborar hipótesis, y contrastarlas a través de la experimentación o la observación y argumentación. 3. Discriminar y decidir sobre las fuentes de información y los métodos empleados para su obtención.	1.1. Integra y aplica las destrezas propias de los métodos de la ciencia. 2.1. Utiliza argumentos justificando las hipótesis que propone. 3.1. Utiliza diferentes fuentes de información, apoyándose en las TIC, para la elaboración y presentación de sus investigaciones.

¹⁰ Si bien se ha incluido el criterio 16, el estándar correspondiente puede no estar directamente relacionado con la actividad. En este aspecto, el Real Decreto muestra cierta inconsistencia al no abarcar todos los aspectos del criterio con más estándares, por lo que se ha puesto el único que había.

	<p>4. Participar, valorar y respetar el trabajo individual y en grupo.</p> <p>5. Presentar y defender en público el proyecto de investigación realizado.</p>	<p>4.1. Participa, valora y respeta el trabajo individual y grupal.</p> <p>5.1. Diseña pequeños trabajos de investigación sobre animales y/o plantas, los ecosistemas de su entorno o la alimentación y nutrición humana para su presentación y defensa en el aula.¹¹</p> <p>5.2. Expresa con precisión y coherencia tanto verbalmente como por escrito las conclusiones de sus investigaciones.</p>
--	--	---

¹¹ El alumnado en realidad llevará a cabo algo menos ambicioso que un proyecto de investigación, tratándose más bien de un pequeño trabajo de indagación.

FUNDAMENTACIÓN:

Si bien el docente puede enfocar las pruebas paleontológicas desde el punto de vista de las formas de transición, como el *Tiktaalik*, el caso de la evolución de los caballos ya visto anteriormente, u otras especies más conocidas como *Archaeopteryx lithographica*, un ave primitiva con caracteres intermedios de algunos grupos de dinosaurios y las aves modernas (ver ilustración 15), también puede utilizarlas desde el punto de vista de la diversidad, parentesco evolutivo y similitud morfológica entre especies extintas y actuales que puedan estar emparentadas, haciendo saber al alumnado que, en ocasiones, una morfología similar no tiene por qué ser determinante al establecer parentesco entre especies.



Ilustración 15.Fuente: <http://scienceviews.com/dinosaurs/archaeopteryx.html>. *Archaeopteryx lithographica* compartía características comunes con los dinosaurios y las aves.

Los trilobites constituyen una de las clases extintas de artrópodos que más diversidad y expansión alcanzó desde los principios de su existencia, en el Paleozoico¹² (Rábano, 1999). Gran cantidad de especies de trilobites denotan un parecido morfológico tanto con numerosas formas juveniles de otros artrópodos, como con muchos de sus estadios adultos. Si bien la taxonomía actual considera a los trilobites dentro de un subfilo¹³, están

¹² Era que abarca desde el Cámbrico Inferior (hace 540 m.a.) hasta el Pérmico Superior (hace 250 m.a.). Anexo III.

¹³ Categoría taxonómica que reúne a los integrantes de la categoría inmediatamente superior, el filo, por ciertas características comunes.

emparentados con otro de los subfilos de artrópodos de mayor expansión en la actualidad, el de los crustáceos. A pesar de tener relaciones tan lejanas de parentesco, conviene recordar que los artrópodos tienen una diversidad enorme y que podemos encontrar entre estos grupos morfologías muy similares. Actualmente se considera que el subfilo de los quelicerados¹⁴ está más emparentado con el de los trilobites, e incluso ciertos autores (Hughes, 2007) los engloban dentro de un grupo, de forma que el cangrejo de herradura (*Limulus polyhemus*, orden *Xiphosura*) es uno de los organismos existentes actualmente que más cerca está de tener un antecesor común con estos artrópodos extintos, si bien siguen estando lejanos en la filogenia, siendo trilobites y quelicerados grupos independientes. Respecto a la fauna conocida del Cámbrico¹⁵ en adelante, algunos investigadores consideran a los antecesores de los quelicerados el grupo más cercano al de los trilobites (Cotton y Brady, 2004; Rábano, 1999).

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD:

El alumnado buscará en bases de datos como [Thingiverse](#) modelos de impresión 3D de trilobites y de un crustáceo terrestre del orden isópodos con un elevado parecido morfológico, como las cochinillas de la humedad (suborden *Oniscidea*). Para esto, la clase se dividirá en dos grupos. Uno de ellos se dedicará a buscar los modelos de impresión del trilobites y la cochinilla de la humedad, para lo cual se podrán subdividir a su vez en dos subgrupos, uno para cada artrópodo. El grupo restante se dedicará a buscar cierta información específica del trilobites. Si bien, de forma general, un trilobites y una cochinilla de la humedad pueden tener una buena cantidad de parecidos físicos (forma general, división del cuerpo, etc.), el alumnado también podrá hallar diferencias cuando tengan los modelos impresos (ver tabla 3). Otras comparaciones no se encuentran a un nivel observable físicamente, por lo que el segundo grupo de estudiantes realizará una búsqueda de las semejanzas y diferencias que puedan encontrar en cuanto a locomoción, hábitat, forma de los apéndices, alimentación, respiración, reproducción e incubación de los huevos, composición del exoesqueleto y división en tagmas. Así, los estudiantes deberán hacer dos mapas conceptuales, uno para el trilobites y otro para la cochinilla, con la herramienta [Text2MindMap](#) ("Text2MindMap", s.f.), explicárselo al otro grupo de compañeros en clase y entregarlo

¹⁴ Subfilo de artrópodos caracterizado por no presentar antenas, tener el cuerpo dividido, generalmente, en dos regiones y tener por apéndices bucales los quelíceros, entre otras características.

¹⁵ Periodo incluido dentro de la Era Paleozoica que empezó hace 540 m.a. y finalizó alrededor de 485 m.a.

al profesor. Las similitudes que los alumnos encuentren se expondrán a los compañeros que se han dedicado a buscar los modelos de impresión 3D durante la clase, de manera que todos conozcan estas características sobre estos dos artrópodos.

Los mencionados modelos del trilobites y de la cochinilla encontrados por el alumnado serán impresos y entregados a los estudiantes y se les pedirá que los observen con atención (ver ilustración 16). A continuación se pasará a realizar una lista de las semejanzas o diferencias externas que encontramos entre ambos animales que, entre otras, pueden ser:

Semejanzas	Diferencias
<ul style="list-style-type: none"> -Morfología general. -Presencia de un exoesqueleto segmentado. -División en tres tagmas o fragmentos: Cefalón, tórax y pigidio en caso del trilobites; cefalotórax, pereon y pleon (aunque podemos encontrar otras denominaciones) en el de la cochinilla. El alumnado puede intentar encontrar estos términos en internet. -Parte dorsal mucho más dura que ventral, con función protectora. -Capacidad de enrollarse. 	<ul style="list-style-type: none"> -Zona cefálica muy diferente -Segmentos más homogéneos en cochinilla, segmentos torácicos más pequeños en trilobites. -Ojos más visibles en trilobites. -Tagmas mucho más marcados en trilobites, más fáciles de distinguir. -Puntas pleurales (extremos laterales del tórax) en trilobites, no en cochinilla -Zona posterior del trilobites más marcada y en ocasiones tiene una "punta caudal".

Tabla 3. Semejanzas y diferencias que se podrían encontrar entre el trilobites y la cochinilla de la humedad

Tras hablar sobre las características tanto internas como externas de ambos organismos, se abrirá un debate en clase para dilucidar si las semejanzas encontradas podrían implicar un vínculo real o las diferencias hacen que la cochinilla de la humedad y el trilobites estén lejos de ser parientes cercanos.

Tras la discusión, la conclusión a la que se debe llegar es que, incluso en un filo tan diverso como el de los artrópodos, podemos encontrar formas muy parecidas. El docente guiará al alumnado para ello y hará saber entonces que, a pesar del parecido morfológico, una cochinilla y un trilobites no están tan emparentados como se puede



Ilustración 16. Fuente: Elaboración propia. Modelo de cochinilla de la humedad (arriba) y trilobites (abajo).

llegar a creer. Puede apoyar esta explicación con imágenes de ejemplares juveniles (ninfas) de la cucaracha argentina gigante (*Blaptica dubia*), artrópodos de la clase *Insecta*¹⁶ que en este estadio de su vida tienen un parecido muy cercano a una forma intermedia entre trilobites y cochinilla de la humedad (ver ilustración 17).

De esta manera, el alumnado comparará la morfología presente en dos clases y un subfilo muy distintos dentro del filo de los artrópodos. Así, pueden concluir que las semejanzas a nivel morfológico les puede dar pistas acerca de lo emparentadas que están unas especies con otras, pero a su vez no son un factor ni mucho menos determinante, puesto que dentro de los artrópodos, especies como el trilobites o la cochinilla están bastante separados, considerando la gran diversidad que presentan.

¹⁶ Clase del filo artrópodos caracterizada principalmente por presentar un par de antenas y tres pares de patas.



Ilustración 17. Fuente: <http://geckosleopardos.blogspot.com.es/p/ventas.html>. Las ninfas de la cucaracha argentina gigante pueden guardar un parecido morfológico bastante grande con un trilobites, sin estar directamente emparentados.

Tras esto, el docente presentará un cladograma (ver ilustración 18), que los estudiantes deberán interpretar en clase. Si lo hacen correctamente, verán que *Crustaceomorpha*, taxón en el que se encuentra la cochinilla de la humedad, está demasiado lejos con respecto a los otros como para poder considerarlos parientes cercanos.

Así pues, los estudiantes deberán buscar dentro del subfilo *Chelicerata* qué artrópodo podría parecerse físicamente a un trilobites. Para ello deberán averiguar qué clases se incluyen dentro de este subfilo y sus morfologías más representativas, y a partir de aquí,

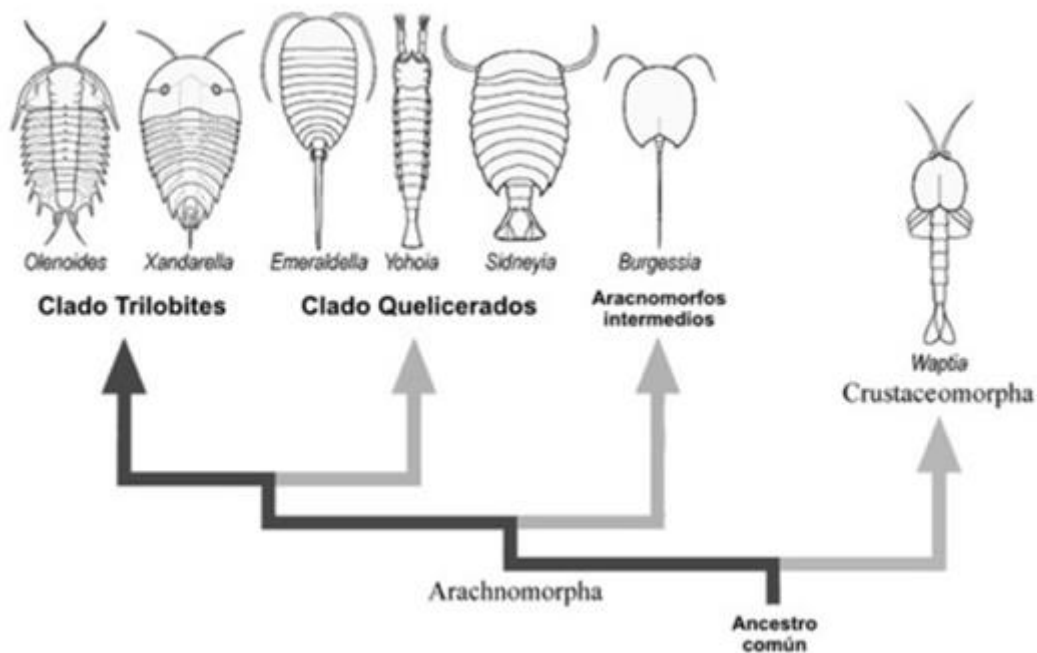


Ilustración 18. Fuente: <http://www.asturnatura.com/articulos/trilobites/evol.php>. La cochinilla de la humedad está más lejos que los quelicerados de estar emparentada con el trilobites.

encontrarán que en la clase *Merostomata* uno de los animales más característicos y parecido al trilobites es el cangrejo de herradura.

El alumnado buscará un modelo en 3D para poder imprimirlo y observarlo, de manera que el grupo que anteriormente se dedicó a buscar información, buscará ahora un modelo del cangrejo de herradura, y el que buscó el modelo del trilobites se dedicará esta vez a encontrar información sobre el *Limulus* y a presentarla a sus compañeros en un Prezi en clase. En concreto, es interesante que se centren en las mismas características analizadas anteriormente. Una vez impreso el modelo, puede compararse su morfología externa con el trilobites, al igual que se hizo anteriormente con la cochinilla (ver ilustración 19). Las semejanzas y diferencias pueden ser, entre otras:

Semejanzas	Diferencias
<ul style="list-style-type: none"> -Zona cefálica muy definida en ambos y con forma similar. -Divididos en tres partes: Las ya mencionadas para el trilobites; el prosoma, el opistosoma y el telson en el cangrejo. -Estructuras oculares principales bien visibles en ambos. -Ambos pueden tener punta caudal ("Telson" en el <i>Limulus</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> -Divisiones del <i>Limulus</i> más marcadas, con surco longitudinal entre prosoma y opistosoma. - Telson mucho más grande en <i>Limulus</i>. En algunos trilobites no aparece punta caudal. - La zona posterior del trilobites consiste en varios segmentos, mientras que la del cangrejo sólo en el telson. -El opistosoma del cangrejo está totalmente fusionado, mientras que el tórax del trilobites está muy dividido en segmentos.

Tabla 4. Semejanzas y diferencias que se podrían encontrar entre trilobites y el cangrejo de herradura

Tras conocer todas estas características, se abrirá de nuevo un debate. El *Limulus* y el trilobites también guardan bastantes parecidos entre sí. Según las comparaciones, ¿Qué opinan los estudiantes sobre qué artrópodo está más cerca de ser el primo lejano del trilobites? ¿Una cochinilla, la ninfa de cucaracha o el cangrejo de herradura? Sin embargo, ya se ha visto que el cladograma sitúa a los cangrejos de herradura como más cercanos: ¿significa esto que hay un límite hasta el que nos podemos fiar de los parecidos morfológicos, teniendo en cuenta la diversidad de los artrópodos? ¿Podremos utilizar otras pruebas en este tipo de casos?



Ilustración 19. Fuente: Elaboración propia. Ejemplar de *Limulus* (izquierda) y trilobites (derecha).

Así, el alumnado podrá comprobar hasta qué punto es importante fijarse en la morfología de una especie y de sus antecesores y la importancia de buscar otro tipo de pruebas que respalden las teorías si los parecidos morfológicos entre algunas especies no nos aportan conclusiones determinantes o pueden dejar lugar a duda.

COMPETENCIAS:

Competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología: Los estudiantes analizan semejanzas y diferencias entre los diferentes artrópodos y han de encontrar su grado de parentesco, interpretando árboles filogenéticos. Además deben organizar la información que obtengan de ciertas comparaciones en un mapa conceptual online. Durante el proceso deben ir dándose cuenta de que en ciencias es necesaria, en general, más de una evidencia para obtener una conclusión.

Competencia digital: Se desarrolla al explorar por repositorios web y al participar activamente en la búsqueda, elección y descarga de modelos de impresión 3D en repositorios, que elegirán ellos mismos para poder observarlos después. También mediante la creación del mapa conceptual utilizando la herramienta online.

Aprender a aprender: El alumnado ha de revisar sus hipótesis de partida, analizando y comprobando sus respuestas y las de sus compañeros. Han de evaluar el grado con el que sus propuestas iniciales explican los datos experimentales mediante los modelos 3D y los árboles filogenéticos.

Competencias sociales y cívicas: Los estudiantes han de colaborar cuando trabajan en grupo para buscar modelos o información sobre un determinado artrópodo. De esta manera se produce una interdependencia entre los estudiantes, pues el trabajo de unos es indispensable para los demás. .

Actividad 7

NOMBRE DE LA ACTIVIDAD: “Las pruebas bioquímicas: investigando el ADN”.

CURSO: 4º de la ESO

TEMPORALIZACIÓN: 3 sesiones de 1 hora.

RECURSOS Y MATERIALES:

- Ordenadores con conexión a internet.
- Piezas de impresión 3D
- Pizarra digital.

CONTENIDOS, CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE:

Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
Bloque 1. La evolución de la vida		
Teorías de la evolución. El hecho y los mecanismos de la evolución.	<p>16. Conocer las pruebas de la evolución.</p> <p>17. Comprender los mecanismos de la evolución destacando la importancia de la mutación y la selección.</p>	<p>16.1. Distingue las características diferenciadoras entre lamarckismo, darwinismo y neodarwinismo.¹⁷</p> <p>17.1. Establece la relación entre variabilidad genética, adaptación y selección natural.</p>
Bloque 4. Proyecto de investigación		
Proyecto de investigación.	<p>1. Planear, aplicar, e integrar las destrezas y habilidades propias de trabajo científico.</p> <p>2. Elaborar hipótesis, y contrastarlas a través de la experimentación o la observación y argumentación.</p> <p>3. Discriminar y decidir sobre las fuentes de información y los métodos empleados para su obtención.</p> <p>4. Participar, valorar y respetar</p>	<p>1.1. Integra y aplica las destrezas propias de los métodos de la ciencia.</p> <p>2.1. Utiliza argumentos justificando las hipótesis que propone.</p> <p>3.1. Utiliza diferentes fuentes de información, apoyándose en las TIC, para la elaboración y presentación de sus investigaciones.</p> <p>4.1. Participa, valora y respeta</p>

¹⁷ Si bien se ha incluido el criterio 16, el estándar correspondiente puede no estar directamente relacionado con la actividad. En este aspecto, el Real Decreto muestra cierta inconsistencia al no abarcar todos los aspectos del criterio con más estándares, por lo que se ha puesto el único que había.

	<p>el trabajo individual y en grupo.</p> <p>5. Presentar y defender en público el proyecto de investigación realizado</p>	<p>el trabajo individual y grupal.</p> <p>5.1. Diseña pequeños trabajos de investigación sobre animales y/o plantas, los ecosistemas de su entorno o la alimentación y nutrición humana para su presentación y defensa en el aula.¹⁸</p> <p>5.2. Expresa con precisión y coherencia tanto verbalmente como por escrito las conclusiones de sus investigaciones.</p>
--	---	--

¹⁸ El alumnado en realidad llevará a cabo algo menos ambicioso que un proyecto de investigación, tratándose más bien de un pequeño trabajo de indagación.

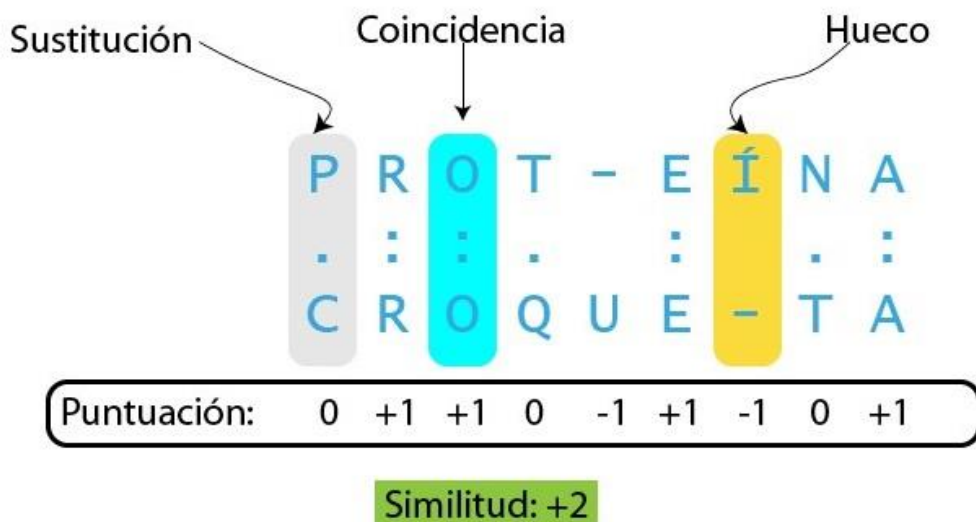
FUNDAMENTACIÓN:

En esta tarea se propone introducir al alumnado, no solamente al contenido disciplinar de la asignatura, sino también a la forma de trabajar de los científicos. Hay que tener en cuenta que incluso en la enseñanza se transmiten numerosas visiones deformadas de la ciencia (Fernández, Gil, Carrascosa, Cachapuz y Praia, 2002). Una de ellas, la concepción del trabajo del científico como genio solitario no tiene ninguna base real, por lo que esta actividad se ha planteado de forma que sea imprescindible la colaboración entre distintos grupos de “investigadores”, simulando un contexto más realista. Además, los elementos de indagación presentes servirán al alumnado para recordarles el Método Científico, y les acercará a las distintas fases existentes entre el planteamiento de un problema y su resolución (que en numerosas ocasiones es parcial, y genera nuevas preguntas).

Para explorar las pruebas bioquímicas los estudiantes analizarán la relación evolutiva existente entre diferentes primates. El orden de mamíferos al que pertenecemos nosotros, los humanos modernos, es el de los primates, que se diferenciaron de otros grupos de mamíferos hace 80 millones de años aproximadamente. Tras esta gran división, el grupo de los primates se ramificó de manera diversa en varias ocasiones a lo largo del tiempo. Actualmente nuestra especie, *Homo sapiens*, está clasificada dentro de lo que se llaman “homininos”, donde se incluyen a los humanos y a sus antepasados extintos que caminaban con bipedestación. A su vez nos incluimos dentro de la familia de los *homínidos* que alberga a los homininos y a los primates superiores (gorilas, chimpancés, bonobos y orangutanes) (Pérez, 2012). La secuenciación de los genomas del bonobo (*Pan paniscus*), el chimpancé (*Pan troglodytes*) y el gorila (*Gorilla gorilla*) ha demostrado que nuestra especie comparte lazos de parentesco más estrechos con los primates superiores, siendo chimpancés y bonobos nuestros parientes vivos más cercanos, con quienes compartimos el 99% y el 98% de nuestro ADN, respectivamente, seguidos por el gorila. Si bien es un porcentaje muy alto, las pequeñas diferencias hacen de nosotros distintas especies. (Wong, 2014). Para construir la filogenia que conocemos hoy día, la utilización de la genética molecular y la obtención de datos genómicos han sido claves, y su análisis, mediante la comparación de secuencias a través de complejos modelos matemáticos y estadísticos, nos ha proporcionado las pistas necesarias para conocer el grado de parentesco que tienen estas especies, ya que como hemos visto, una alta similitud de genomas nos indica una mayor proximidad, al tener un antecesor común (Pérez, 2012).

El funcionamiento de los algoritmos utilizados en bioinformática para realizar las comparaciones de secuencias es en ocasiones percibido como complejo, pero se puede aplicar conociendo una serie de conceptos. Al objeto de comparar dos secuencias de ADN, se utilizará la similitud entre ambas cadenas, de manera que se buscará alinear el mayor número de tripletes de nucleótidos posible. Para ello se asignarán puntuaciones positivas a las coincidencias, valores negativos a los huecos y un valor neutro a las sustituciones. Podemos ver un ejemplo de esto en la ilustración 20, en el que se comparan las palabras PROTEÍNA y CROQUETA, de manera que haciendo coincidir aquellas letras que son iguales, buscando el alineamiento de las palabras mediante los huecos, y finalmente incorporando un valor a cada letra según su estado (coincidencia, hueco o sustitución), se obtiene un valor de similitud. En la ilustración 20 podemos ver que existen coincidencias de las citadas palabras en las letras R, O, E y A, representadas mediante los dos puntos (:), por lo que se les añade una puntuación de +1 a cada una. Para que estas coincidencias se hayan dado han tenido que generarse dos huecos, representados con un guión (-), con una puntuación de -1 cada uno de ellos. El resto de letras no son coincidentes, sino sustituciones, identificadas con un punto (.), a los que se les asigna un 0. Si hacemos la suma entre obtenemos un valor de similitud de 2.

Este ejemplo se puede aplicar de igual manera a dos secuencias de ADN, donde cada letra es un triplete de nucleótidos. Dichos tripletes deben ser alineados con el mismo



Cálculo de la similitud entre las palabras PROTEÍNA y CROQUETA. En el alineamiento mostrado se resalta solamente un ejemplo de cada una de las operaciones posibles. Las operaciones se indican con los siguientes símbolos: sustitución (""), coincidencia (":") y hueco ("-"). A cada una estas operaciones se les ha asignado de manera arbitraria una puntuación de 0, +1 y -1, respectivamente.

Ilustración 20. Fuente: <https://medium.com/el-blog-de-melquiades/alineamientos-de-secuencias-de-adn-y-proteinas-57fcdfbfc25#2bw9le639>

sistema que en el ejemplo anterior para obtener una puntuación de similitud. Comparando los valores obtenidos por distintas especies, puede inferirse qué secuencias son más similares a la secuencia problema, y por lo tanto, cuáles están más cerca de tener un antecesor común. Sin embargo, para profundizar en el conocimiento de los alineamientos de secuencias y cómo constituye una prueba bioquímica real a la hora de hacer este tipo de comparaciones, también se incluirán los conceptos de homología (aquellas secuencias que tienen alto parecido). Con ello, las ideas asociadas de ortólogo, es decir, aquellas secuencias homólogas que indican que diferentes especies tienen un ancestro común cercano, y parálogo, aquellas secuencias homólogas que no se han generado por un evento de evolución, si no de duplicación de la misma secuencia de un organismo en una parte diferente del genoma, en distintos genes (Koonin, 2005).

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD:

Con objeto de introducir al alumnado en las pruebas basadas en la biología molecular, se trabajará con una serie de secuencias de diferentes especies de primates (Pedrinaci, Gil y Gómez de Salazar 2008):

Humano	TCCGATTACGTTAACCTAACAAAAAACTCATACCCCATTATGTAAAATCCATTGTCGCATCC ACCTTTATT
Chimpancé	ACCATTAACCCTAACAAAAAACTCATATCCCATTATGTGAAATCCATTATCGCGTCCACCTTT ATCCCTAAC
Gorila	GGCAGGATCAATCCTAACAAAAAAGCTCATACCCCATTACGTAAAATCTATCGTCGCATCCAC CTTTATC
Orangután	ATTAACCCCAACAAAAAAACCCATACCCCCTATGTAAAACGGCCATCGCATCCGCCCTTTAC TATTATCGCG
Gibón	CCCATTAACCCCAATAAAAAGAACTTATACCCGGGATTACACTACGTAAAATGACCATTGCCTC TACCTTTATA

Tabla 5. Secuencias que se utilizarán en clase.

Al alumnado se le presentarán distintas secuencias, de manera que ellos mismos tendrán que compararlas por similitud.

Se dividirá la clase en cinco grupos y se les pondrá en un contexto temático. Cada grupo será representante de un equipo de científicos de las cinco universidades más

prestigiosas del mundo. Cada equipo puede ponerse su propio nombre, o puede tener el nombre del animal que estudia (Equipo Humano, equipo Chimp, equipo Gorila...). Uno de los miembros será el jefe de equipo y uno de los equipos a su vez será el coordinador del resto de grupos y del estudio, que consiste en averiguar la relación filogenética de esas especies con el ser humano. Para ello deben aportar pruebas y publicarlas en una revista científica, que será una entrada en el blog de clase.

Cada equipo tendrá una secuencia de cada una de las especies de la tabla y deberá reconstruirla utilizando piezas de impresión 3D que representan a las cuatro bases nitrogenadas (Adenina, Timina, Guanina y Citosina), como se muestra en la ilustración 21. Habrá una diferencia entre ellos: los equipos diferentes al “Equipo humano”, además de reconstruir la secuencia de su animal, generarán una estructura de desoxirribosa y fosfato adicional, paralela a la anterior, como se puede ver en dicha imagen. Esto se hará así debido a que los equipos que están trabajando con los otros primates tendrán que pedirle los datos correspondientes a la secuencia del humano a la “universidad” que trabaja con este, a fin de completar ambas, y poder compararlas.

Los miembros del equipo humano, tras construir su secuencia, tomarán una foto con su dispositivo móvil para tenerla a mano y “viajarán” a las otras cuatro universidades para compartir sus datos con el resto de los grupos. A partir del armazón que habían creado los equipos que trabajaban con chimpancé, gorila, orangután y gibón, y utilizando estos datos, construirán también la secuencia de humano, paralela a su respectivo primate. A continuación las cuatro universidades podrán empezar a alinear sus secuencias para obtener el grado de similitud, y también tomarán fotos de los modelos 3D alineados, como la de la ilustración 22. El resultado final será anotado en una hoja de cálculo (ver ilustración 23), junto a la puntuación obtenida.

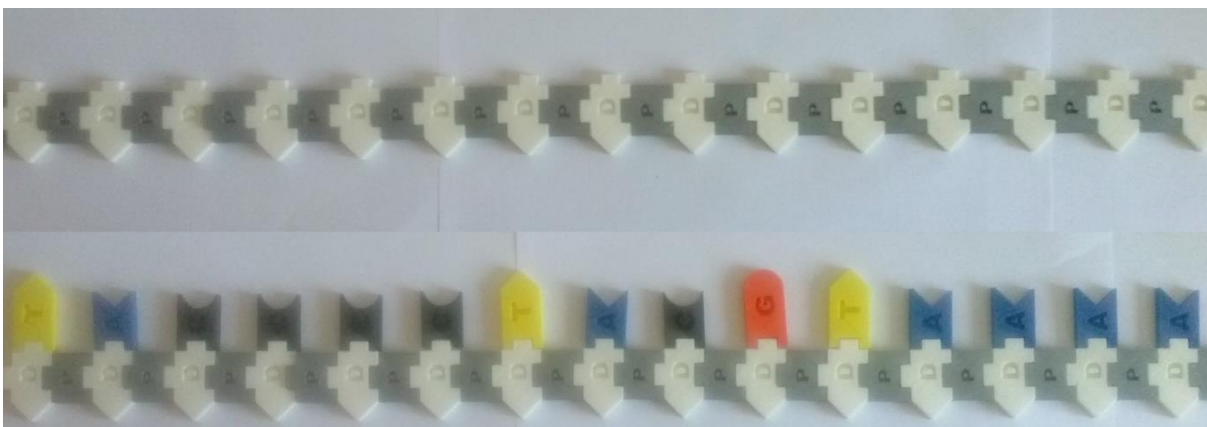


Ilustración 21. Fuente: Elaboración propia. Imagen correspondiente a un fragmento de la secuencia de gorila, desde los tripletes 11 al 15 (abajo). El “equipo gorila” construiría además el esqueleto de una secuencia extra (arriba) que más tarde completará, cuando conozca la secuencia del humano.

- Metodología: Explicar cómo se ha hecho la construcción de las secuencias con modelo 3D (acompañado de imágenes de la secuencia de humano) y el alineamiento de secuencias por similitud.

Mientras el equipo Humano se encarga de hacer estas partes del artículo, el resto de equipos presentarán sus resultados, elaborando cada uno de ellos una sección y añadiendo capturas de pantalla de la hoja de cálculo y fotos de las secuencias alineadas construidas mediante las piezas. Es importante que expliquen cómo han obtenido ese valor para la puntuación de similitud y dónde han generado los huecos y las coincidencias.

Para finalizar, los 5 equipos deben escribir en conjunto un apartado de discusión de los resultados y conclusiones, en el que evalúen las pruebas que han obtenido (los valores de similitud) y establezcan el orden de las especies en relación al parentesco con el ser humano, dejando claro cuáles son aquellas con las que tenemos un ancestro en común más próximo. En el apartado de conclusiones, además, deberán buscar información en internet sobre dicho parentesco y compararlo con los resultados de su investigación, haciendo una valoración final de todo el proceso y de su hipótesis, para ver si estaban en lo cierto o no. Cuando terminen el artículo, lo entregarán al profesor dejando clara la autoría de cada apartado y se publicará en el blog de la clase.

Para profundizar en el alineamiento múltiple de secuencias que se lleva a cabo en investigación para esclarecer las relaciones filogenéticas, los estudiantes jugarán a [Phylo](#) (“PHYLO | DNA Puzzles”, s.f.), un juego tipo puzzle en el que se consiguen puntos alineando correctamente secuencias. Ya que los estudiantes han hecho sus propios alineamientos para establecer pruebas bioquímicas analizando las relaciones evolutivas de otros primates con el ser humano, ahora se les mostrará mediante este juego que los alineamientos múltiples y la comparación de secuencias, ya sea de ADN, ARN o proteínas, no sólo pueden constituir una prueba bioquímica de la evolución, sino que pueden tener otras aplicaciones como la investigación de enfermedades genéticas. De hecho, ellos mismos pueden contribuir a esto o a avanzar en estudios evolutivos, simplemente jugando.

Como ya se ha dicho, el juego consiste en alinear diferentes secuencias como si fuera un puzzle (ver ilustración 24), ya que lo que se emplean en realidad son cuadros de colores de forma vertical con un sistema de puntuación similar al que el alumnado utilizó en el ejercicio anterior. Se obtienen puntos positivos si los cuadros en sentido vertical son del mismo color, y puntos negativos si no lo son o se dejan huecos. La penalización por dejar huecos es mucho mayor que por cuadros no coincidentes, así que el objetivo



#640

|

ESCENARIO 3/10

Pareja **36** **30** **30** Mejores puntajes

parejas 45 - discordancias 11 - espacios 1 - extender espacios 0

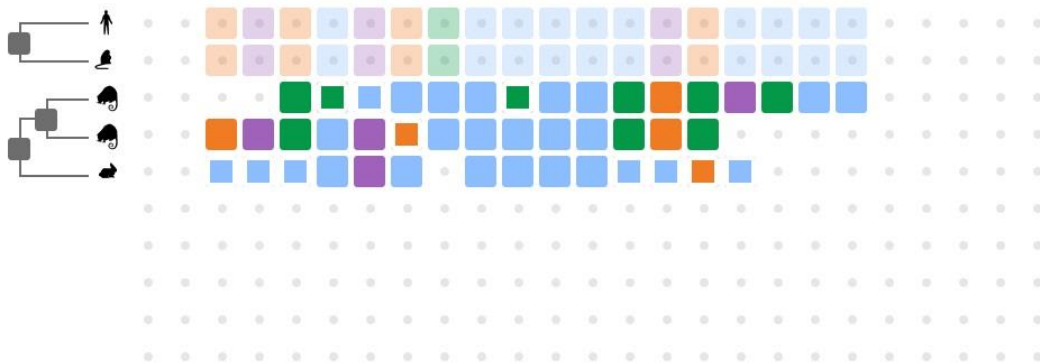


Ilustración 24. Fuente: elaboración propia. En Phylo, la alineación viene dada por cuadros de colores.

es procurar el mayor equilibrio entre los puntos de bonus por coincidencia y las penalizaciones. Por otra parte, a la izquierda de la página web se muestra un cladograma que nos indica, en orden descendente, qué secuencias de cuadros tienen prioridad para la coincidencia, dando más puntuación a aquellas especies que estén más emparentadas. Para pasar de nivel, se deben de formar más parejas que las que el ordenador (el número de la izquierda en el cuadro de puntuación indica la puntuación de este, mientras que el número del medio indica la puntuación del jugador). Los estudiantes utilizarán de esta manera el programa Phylo, en una pequeña competición por ver quién obtiene la mayor puntuación.

Posteriormente realizarán un pequeño informe en el que tendrán que buscar una serie de conceptos, seguir unos puntos y entregarlo al docente. Los apartados serán los siguientes:

- Utilidad del alineamiento de secuencias en el estudio de la evolución. Otros usos en investigación.
- Concepto de homología de secuencias.

- Concepto de ortólogo. Significado, en términos evolutivos, de encontrar una secuencia ortóloga.
- Concepto de parólogo. Significado, en términos evolutivos, de encontrar una secuencia paróloga.

Apartado de ampliación.

En colaboración con otros centros educativos, Phylo puede resultar una herramienta interesante. Se pueden organizar competiciones entre diferentes centros y se hará saber al alumnado que mientras juegan están ayudando a científicos en investigaciones reales que ellos mismos pueden elegir desde el menú, como cáncer, enfermedades metabólicas, del sistema sanguíneo, infecciosas, etc. El docente también puede optar por hacer pequeñas competiciones en su clase con una determinada frecuencia, ofreciendo como premio algún modelo impreso en 3D.

Hasta ahora los estudiantes han trabajado con alineamiento y homología de secuencias mediante el juego Phylo y el uso de modelos de impresión 3D. Para presentar una herramienta con la que los científicos trabajan de manera mucho más cotidiana, se introducirá al alumnado a la búsqueda y comparación de secuencias de ADN a través de la base de datos norteamericana del NCBI (National Center for Biotechnology Information), como actividad de ampliación. Así pues, se usará una secuencia de genoma mitocondrial (ADNmt), la información genética incluida en las mitocondrias y usada con frecuencia para establecer relaciones filogenéticas entre organismos similares. Los estudiantes tendrán que seguir un guión en el que explorarán la página.

Se dará una determinada secuencia perteneciente al ADNmt humano, obtenida de (“Análisis, comparación y reconstrucción filogenética de secuencias de DNA mitocondrial”, s.f.), con la que los alumnos trabajarán:

```
GTTTTATAAGTAGGCCCTTATATAAACTATTCTCTGTTCTTTCATGGGGAAGCAGATTTGGG
TACACCCAAAGGTATTGACTCACCCATCAACAACCGCTATGTATTTTCGTACATTACTGCCA
GCCACCATGAATATTGTACGGTACCATAAATACTTGACCACCTGTAGTACATAAAAACCCAA
TCCACATCAAAAACCCCTCCCCATGCTTACAAGCAAGTACAGCAATCAACCCCAACTATC
ACACATCAACTGCAACTCCAAAGCCACCCCTCACCCACTAGATACCAAAAAACCTACCCAC
CCTTAACAGTACATAGCACATAAAGCCATTTACCGTACATAGCACATTACAGTCAAATCCCT
TCTCGTCCCATGGATGACCCCTCAGATAGGGTCCCTTGACCACCATCCCCA
```

Así pues, se les dará a conocer la aplicación BLAST (Basic Local Alignment Tool) del NCBI, una herramienta que compara una secuencia problema con todas las secuencias

de una determinada especie y las equipara según similaridad por nucleótidos¹⁹. Para empezar, los estudiantes se dirigirán a la página web del [NCBI](#) (“National Center for Biotechnology Information”, s.f.), donde podrán encontrar diversas opciones, entre ellas la herramienta [BLAST](#) (“BLAST: Basic Local Alignment Search Tool”, s.f.). Esta nos ofrece un buscador en el que pondremos el organismo con el que queremos comparar la secuencia problema. Los organismos con los que se comparará la secuencia serán el gorila, el bonobo y el chimpancé. Utilicemos como ejemplo el chimpancé, por lo que se escribirá *Pan troglodytes* en el buscador y se elegirá el primer organismo que ofrece (taxid:9598), iniciando la búsqueda. Esto llevará a un nuevo lugar donde podrá copiar la secuencia problema a comparar (Enter Query Sentence). Es importante comprobar que la pestaña elegida es la llamada “blastn”, ya que queremos hacer una comparación de nucleótidos. Tras poner la secuencia en el cuadro, el docente puede explicar a los estudiantes, para una mejor comprensión del funcionamiento de la búsqueda, que en la zona de “Choose Search Set” (que no se modificará) es donde se elige el organismo con el que se quiere comparar, y en “Program Selection” se elige el tipo de comparación. Ya que queremos encontrar secuencias con alta similaridad, elegiremos la opción “Highly similar sequences”. Si pulsamos el botón BLAST se iniciará la búsqueda, apareciendo una pantalla de análisis de la búsqueda antes de recibir el resultado. Al tratarse de una comparación entre genomas mitocondriales, el resultado de la búsqueda que nos interesa es aquel que incluya el título “mitochondrion complete genome”.

Lo que se nos muestra (ver ilustración 25), aparte de valores estadísticos y otros datos, es la alineación por similitud de nuestra secuencia problema (Query) con la secuencia con la que se compara (Sbjct), junto con unos números que corresponderán a la base nitrogenada en la que empieza y acaba esa línea de la secuencia. Cada alumno repetirá esto con el bonobo y con el gorila, de manera que se obtendrán tres alineamientos, a los que deberán hacer una captura de pantalla. Estos deberán ser introducidos en el programa de dibujo “Paint” y remarcarán bien dos datos de cada uno de ellos: “Identities” y “Gaps”, o lo que es lo mismo, las coincidencias y huecos generados al hacer la comparación con la especie a buscar, lo cual nos dará una pista acerca de su emparentamiento (cuantas más coincidencias, más cercanas están ambas especies). El alumnado tendrá que buscar el significado de estos dos términos, y además, el significado de “Strand: Plus/Plus”, y los pondrán en unos cuadros de texto al lado de las tres capturas de pantalla. Una vez saben el significado de los valores de “Identity” y

¹⁹ Molécula básica que compone el ADN, formada por una pentosa, un grupo fosfato y una base nitrogenada que puede ser timina, adenina, guanina y citosina. En la doble hélice de ADN, estas bases se unen mediante enlaces de puentes de hidrógeno con complementariedad T-A y C-G.

Download ▾ GenBank Graphics

Pan troglodytes mitochondrion, complete genome
Sequence ID: [ref|NC_001643.1|](#) Length: 16554 Number of Matches: 1

Range 1: 15422 to 15824 [GenBank](#) [Graphics](#) ▾ Next Match ▲ Previous Match

Score	Expect	Identities	Gaps	Strand
340 bits(184)	3e-91	334/407(82%)	7/407(1%)	Plus/Plus
Query 17	CTTATATAAACTATTCTCTGTTCTTTTCATGGGGAAGCAGATTGGGTACACCCAAAGGTA			76
Sbjct 15422	CTAATTTAAACTATTCTCTGTTCTTTTCATGGGGAAGCAAATTTAGGTACCACCTAA-GTA			15480
Query 77	TTGACTCACCCATCAACAACCGCTAIGTATTTTGTACATTACTGCCAGCCACCATGAATA			136
Sbjct 15481	CTGGCTCATTCAIT-ACAACCGCTAIGTATTTTGTACATTACTGCCAGCCACCATGAATA			15539
Query 137	TTGTACGGTACCATAAATACTTGACCACCTGTAGTACATAAAAACCCAAAT-CCACATCAA			195
Sbjct 15540	TCGTACAGTACCATATC-ACCCAACCTACCTATAGTACATAAAATCC-ACTCCCACATCAA			15597
Query 196	AACCCCTCCCATGCTTACAAGCAAGTACAGCAATCAACCCCAACTATCACACATCAA			255
Sbjct 15598	AACCTTCACTCCATGCTTACAAGCAGCACAACAATCAACTCCCAACTGTGGAACATAAA			15657
Query 256	CTGCAACTCCAAGCCACCCCTCACCCACTA-GATACCAAAAACCTACCCACCCTTAAC			314
Sbjct 15658	ACACAATTCCAACGACACCCCTCCCCACCCCGATACCAACAGACCTATCTCCCCTTGAC			15717
Query 315	AGTACATAGCACATAAAGCCATTTACCGTACATAGCACATTACAGTCAAATCCCTTCTCG			374
Sbjct 15718	AGAACATAGTACATAAACCATACACCGTACATAGCACATTACAGTCAAACCCCTCCTCG			15777
Query 375	TCCC-ATGGATGACCCCTCAGATAGGGGTCCTTGACCACCATCC			420
Sbjct 15778	CCCCACGGATGCTCCCCCTCAGATAGGAATCCCTTGGTCACCATCC			15824

Ilustración 25. Fuente: elaboración propia. Podemos observar la secuencia query alineada con la secuencia subject, y el porcentaje de coincidencias (82%) y huecos (1%)

“Gap”, deben deducir, a partir de los mismos, qué especie está más cerca y más lejos de tener un ancestro común con el humano. Se incluirá una explicación razonada de las conclusiones a las que se han llegado, y se guardará la imagen en formato JPEG, le pondrán nombre y la entregarán al docente.

COMPETENCIAS:

Comunicación lingüística: Se desarrolla al crear un artículo de investigación e informes sobre diferentes conceptos relacionados con la genética y las pruebas bioquímicas.

Competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología: Se desarrolla al hacer cálculos para obtener una puntuación en las alineaciones de secuencias y al utilizar bases de datos y aplicaciones lúdicas que ayudan en investigaciones científicas (Phylo). Además elaboran hipótesis que más tarde deben contrastar, y analizan los grados de parentesco entre las diferentes especies. Por otra parte, se introducen en la metodología de trabajo de los científicos. En la parte de

ampliación, han de utilizar herramientas que usan los científicos actualmente para comparar secuencias de diferentes especies.

Competencia digital: Se desarrolla al usar aplicaciones y programas informáticos como Excel o Phylo. En la actividad de ampliación exploran la base de datos del NCBI y usan la herramienta de alineamiento BLAST.

Aprender a aprender: El alumnado evalúa lo que ha aprendido al presentar ante otros sus resultados y crear entre todos un artículo científico con los datos obtenidos.

Competencias sociales y cívicas: Los estudiantes deben colaborar estrechamente para alcanzar sus objetivos, no sólo dentro de sus propios equipos sino compartiendo sus datos con otros grupos y creando una red de colaboración para al final construir su artículo.

Sentido de iniciativa y espíritu emprendedor: El alumnado debe tener iniciativa para que su grupo avance en su investigación, genere conclusiones y redacte la parte del artículo que les corresponde

Actividad 8

NOMBRE DE LA ACTIVIDAD: “Convirtiéndose en paleontólogos”

CURSO: 4º de la ESO

TEMPORALIZACIÓN: 3 sesiones de 1 hora.

RECURSOS Y MATERIALES:

- Ordenadores con conexión a internet.
- Piezas de impresión 3D.
- Material básico de excavación (Palas pequeñas, pinceles o para limpiar, recipiente donde poner los fósiles, hilo y varillas para cuadrangular la zona).
- Pizarra digital.

CONTENIDOS, CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE:

Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje evaluables
Bloque 1. La evolución de la vida		
Teorías de la evolución. El hecho y los mecanismos de la evolución. La evolución humana: proceso de hominización.	16. Conocer las pruebas de la evolución. Comparar lamarckismo, darwinismo y neodarwinismo. 18. Interpretar árboles filogenéticos, incluyendo el humano. 19. Describir la hominización.	16.1. Distingue las características diferenciadoras entre lamarckismo, darwinismo y neodarwinismo. ²⁰ 18.1. Interpreta árboles filogenéticos. 19.1. Reconoce y describe las fases de la hominización.
Bloque 4. Proyecto de investigación		
Proyecto de investigación.	1. Planear, aplicar, e integrar las destrezas y habilidades propias de trabajo científico. 2. Elaborar hipótesis, y contrastarlas a través de la experimentación o la observación y argumentación.	1.1. Integra y aplica las destrezas propias de los métodos de la ciencia. 2.1. Utiliza argumentos justificando las hipótesis que propone. 3.1. Utiliza diferentes fuentes de

²⁰ Si bien se ha incluido el criterio 16, el estándar correspondiente puede no estar directamente relacionado con la actividad. En este aspecto, el Real Decreto muestra cierta inconsistencia al no abarcar todos los aspectos del criterio con más estándares, por lo que se ha puesto el único que había.

	<p>3. Discriminar y decidir sobre las fuentes de información y los métodos empleados para su obtención.</p> <p>4. Participar, valorar y respetar el trabajo individual y en grupo.</p> <p>5. Presentar y defender en público el proyecto de investigación realizado</p>	<p>información, apoyándose en las TIC, para la elaboración y presentación de sus investigaciones.</p> <p>4.1. Participa, valora y respeta el trabajo individual y grupal.</p> <p>5.1. Diseña pequeños trabajos de investigación sobre animales y/o plantas, los ecosistemas de su entorno o la alimentación y nutrición humana para su presentación y defensa en el aula.²¹</p> <p>5.2. Expresa con precisión y coherencia tanto verbalmente como por escrito las conclusiones de sus investigaciones.</p>
--	---	---

²¹ El alumnado en realidad llevará a cabo algo menos ambicioso que un proyecto de investigación, tratándose más bien de un pequeño trabajo de indagación.

FUNDAMENTACIÓN:

El ser humano (*Homo sapiens*) es la única especie no extinta del grupo de los homínidos (*Hominini*), taxón clasificado como tribu dentro de la familia de los homínidos. Anteriormente, el alumnado ha podido comprobar cómo las pruebas moleculares y genéticas determinan que los primates superiores vivos actualmente más cercanos a nosotros son los del género *Pan*, con el género *Gorilla* algo más alejado. Tradicionalmente se ha referido a la “evolución de los homínidos” para hablar de la historia evolutiva del ser humano, aunque actualmente se considera más correcto hablar de la evolución de los homínidos, que incluyen a las subtribus de los Australopitecinos (*Australopithecus*, *Ardipithecus*, *Paranthropus*) y *Hominina* (Especies del género *Homo*) (Wood y Constantino, 2004; Wood y Richmond, 2000). Especies como *Sahelanthropus tchadensis* u *Orrorin tugenensis* conformaron el inicio del linaje de los homínidos hace entre 6 y 7 millones de años (ver ilustración 26), los antepasados más cercanos en el tiempo al antepasado común que compartiríamos con los chimpancés. Se cree que eran capaces de andar relativamente erguidos y a su vez eran antecesores de todos los homínidos que vendrían posteriormente. Los cambios anatómicos que implicarían la bipedestación vinieron de la mano de los primeros australopitecinos. Las diferentes especies de *Australopithecus* y *Paranthropus* datan de hace entre 1,3 y 4 millones de años (Perez, 2012). Estas dos especies también han sido conocidas popularmente como australopitecos “gráciles” y “robustos”, respectivamente, por su morfología ósea (Wood y Richmond, 2000). Hace bastante tiempo se pensaba que los australopitecos gráciles eran antepasados de *Homo erectus* y este a su vez de los neandertales, de los

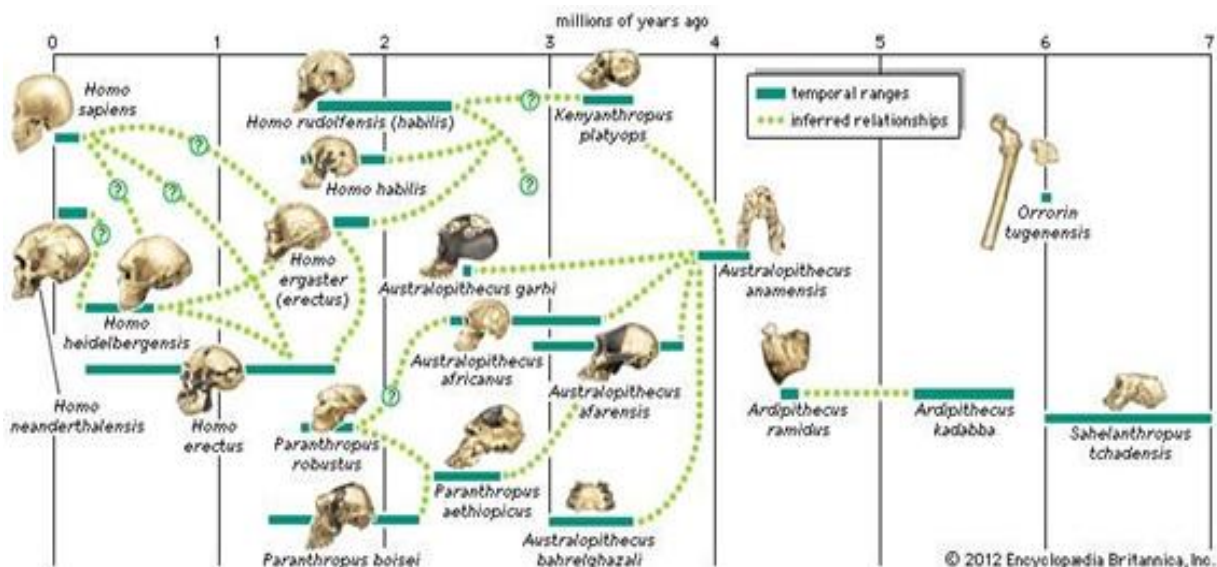


Ilustración 26. Fuente: <http://culturacientificabachillerato.blogspot.com.es/2015/11/arbol-genealogico-de-la-evolucion-de-6.html> . Árbol filogenético de algunas de las especies de homínidos más importantes, junto con algunos de los huesos que están por descubrir.

cuales vendría nuestra especie, mientras que los robustos ocupaban una rama lateral sin descendencia (Wood, 2014). Sin embargo, los fósiles encontrados en África a lo largo de las últimas cuatro décadas y su análisis posterior condujeron a una reformulación de todas las hipótesis sobre la evolución humana. Actualmente, la evidencia fósil y los estudios realizados sobre ellos demuestran que varias especies de homínidos coexistieron en distintas épocas. Así pues, ***Homo habilis***, una de las primeras especies del género en aparecer, convivió con ciertas especies de **australopitecinos** durante casi un millón de años (hace 1,4 - 2,3 m.a.). Esto apuntaba a que algunas especies con las que creíamos tener ascendencia directa no era más que antepasados indirectos de una línea extinta con la que en algún momento tuvimos un antepasado común, pero aclaró mucho el nivel de diversidad que pudieron alcanzar los homínidos en los tres últimos millones de años, si bien todavía faltan mucho huecos por cubrir para encontrar a nuestros antepasados directos. *Homo habilis* también tuvo periodos de coexistencia con ***Homo erectus***, que vivió entre 1,9 m.a. - 50.000 años (*erectus*, en su variante asiática; conocido como *ergaster* en la africana, siendo ambos de la misma especie) y con otros australopitecos tardíos, como ***sediba***, cuyos restos se dataron de hace 1,7 o 1,9 m.a. (Berger, 2012; Wood y Constantino, 2004; Wood, 2014). Otras especies del género *Homo* surgirían posteriormente, siendo especialmente importantes *Homo heidelbergensis* (hace 400.000 años) que se cree emparentado con ***Homo neanderthalensis*** (hace 300.000-30.000 años) y ***Homo sapiens*** (170.000 años aprox.) (Wood y Richmond, 2000).

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD:

El docente organizará una simulación de excavación paleontológica en la que usará como restos fósiles algunos modelos impresos en 3D de diferentes homínidos. Se organizarán tres expediciones paleontológicas con tres grupos de clase, en los que se buscarán seis especies diferentes de homínidos, dos por cada equipo. Las especies utilizadas se dispondrán en parejas según la posibilidad de que conviviesen en el mismo tiempo. Por ello, los homínidos utilizados serán, por parejas: *Homo sapiens* y *Homo neanderthalensis*; *Paranthropus aethiopicus* y *Homo habilis*; *Australopithecus sediba* y *Homo erectus*. Al tener un modelo de los cráneos en impresión 3D, nos centraremos en las características de estos para desarrollar la actividad. Sin embargo, si se dispusiese de otras partes del cuerpo importantes (por ejemplo, la cadera) también podrían añadirse a la actividad, ya que igual que los cráneos de cada especie eran particulares por una serie de características, había otras partes que también eran muy singulares,

como caderas más anchas o estrechas, rodillas en disposiciones diferentes, brazos más largos o más cortos, etc.

El docente deberá preparar previamente la simulación. Para ello deberá disponer de un mínimo de material de excavación y alguna zona en el centro o alrededores donde poder enterrar los restos, o bien areneros. También deberá elegir si enterrar los modelos (que se pueden observar en la ilustración 27) desnudos o con una cubierta para evitar que se manchen de tierra (en el primer caso, los alumnos deberían disponer de pinceles para limpiarlos). Una vez elegido el sitio, debe enterrar los restos en tres lugares diferentes y en las parejas establecidas: *Homo sapiens* y *Homo neanderthalensis* (a los que llamaremos **SN**, al estar enterrados en el mismo sitio), y *Australopithecus sediba* y *Homo erectus* (**SE**) se enterrarán en el mismo estrato. Esto se debe a que los restos que encontrarán los estudiantes de estos ejemplares coexistieron parte del tiempo en el que estaban vivos, lo cual ya puede conformar una pista. *Paranthropus aethiopicus* y *Homo habilis* (**AH**), al estar un poco más separados en el tiempo (*aethiopicus* hace entre 2,3-2,6 m.a. “versus” *habilis* entre 1,4-2,3 m.a.), serán enterrados en diferentes estratos, primero el australopiteco robusto y, tras una pequeña capa de tierra, el *habilis*. Una vez tapados los modelos, el profesor puede optar por cuadrricular las tres zonas de excavación, lo que se puede hacer fácilmente con hilo sujeto a cuatro varillas, o simplemente cuatro tubos de plástico que delimiten la zona donde han de excavar los alumnos.



Ilustración 27. Fuente: Elaboración propia. Desde izquierda a derecha: *Paranthropus*, *A. sediba*, *H. habilis*, dos ejemplares de *H. erectus*, *H. Neanderthalensis* y dos ejemplares de *H. sapiens*.

Una vez hecho esto, el docente pondrá en contexto a los estudiantes. Divididos en tres grupos, se convertirán en equipos de paleontólogos que se enfrentarán a una expedición para averiguar quiénes fueron nuestros antepasados. Tres estudiantes de cada grupo serán los jefes de expedición y dirigirán a sus equipos respectivos. Cada uno será asignado a SN, SE y AH y, según su lugar, recibirán una serie de datos relativos al estudio de su zona de excavación. En el caso de la expedición SN, estarán en una cueva en la que se han encontrado pinturas rupestres. En el estrato en el que están excavando se han encontrado fósiles de hace 150.000 años. Los de la expedición SE están excavando en una colina cerca de un lago. El estrato analizado en el que podrían encontrar una muestra data de hace 1,8 m.a. El grupo de AH está excavando cerca de la ribera de un río. Los primeros análisis muestran dos estratos potencialmente importantes: ambos se encuentran en una línea vertical datada de entre 1,4-2,6 m.a. La datación se encuentra dificultada por la presencia del río. Una vez encuentren los “restos fósiles”, se dirigirán al “laboratorio” (la clase) con ellos. Cada equipo podrá poner un nombre en clave a los especímenes que han encontrado. Ya que no hay ADN viable en estos fósiles, tendrán que averiguar qué características les podrán ayudar para saber qué ejemplares son y cómo se disponen en el tiempo. Para ello contarán con un guion que les podrá ayudar y a partir del cual tendrán que hacer una ficha para cada uno de los especímenes que tienen (Berger, 2012; Wood y Richmond, 2000):

SN	SE	AH
- Frente huidiza	- Bóveda craneal ancha	- Estructura en forma de cresta que atraviesa de un borde al otro del parietal (cresta sagital).
- Frente amplia y verticalizada	- Cara ancha, hueso nasal adelantado.	- Poca proyección nasal, gran anchura de la cara.
- Arcos supraorbitales (torus) ²² muy pronunciados	- Cara estrecha, hueso nasal posteriorizado.	- Base del cráneo muy definida y plana.
- Continuidad de la frente con los arcos supraorbitales, creando una estructura más plana.	- Cráneo grande y angular	- Torus muy pronunciado.
- Anteriorización de la mitad inferior de la cara.	- Cráneo pequeño y ligeramente alargado.	- Prognatismo pronunciado (Anteriorización de la boca)
- Estructura de la cara poco adelantada respecto a los ojos.	- Torus muy pronunciado, casi al mismo nivel que el hueso parietal.	- Cráneo redondo, con occipital sin aplanar.
- Mentón adelantado	- Mayor anteriorización de la boca	- Hueso nasal muy plano, casi inexistente.
- Nariz grande	- Torus algo menos pronunciado.	
- Cráneo globular		
- Cráneo alargado		

Tabla 6. Características que podrían asociar a cada ejemplar de los tres grupos.

²² Parte del cráneo correspondiente a las cejas, justo por encima de los ojos. Cuando esta estructura está muy pronunciada con un reborde óseo, se le conoce como “torus”.

Cada grupo tendrá que repartir las características que se les ha dado entre los dos ejemplares que tienen, actuando el docente como guía. También pueden añadir características para aumentar los datos que tienen, consultándolo con el docente. En la ficha, además, deben incluirse los detalles del lugar en los que se encontró el ejemplar (por ejemplo las condiciones que se les explicó sobre el terreno, la datación de los estratos, etc.), un periodo estimado de la época en la que existió esa especie, si ambos ejemplares pudieron compartir periodos o si vivieron en tiempos muy separados (datos que tendrán que deducir a partir del contexto de la expedición que se les dio al principio), etc.

Una vez realizada la ficha de cada especie, ahora cada grupo se dividirá en dos, uno por cada ejemplar que tienen, y se mezclarán con los otros grupos para comparar sus ejemplares. Esto se hará de una forma establecida por el docente, bajo el argumento de “mezcla azarosa” para compartir datos. En realidad, se emparejarán aquellos grupos con ejemplares parecidos entre sí, poniendo a los australopitecinos juntos, *erectus* con *neanderthalensis* y *habilis* con *sapiens*, de manera que la mezcla no es tan aleatoria como se hace creer, algo que para los estudiantes más avisados puede resultar una pista, puesto que los dos primeros grupos están realmente emparentados, si bien *habilis* sí está más lejos de *sapiens*. Los nuevos grupos compartirán impresiones sobre los ejemplares de los compañeros, comparándolos y anotando aquellas características que los hacen similares. Tras esto, volverán a sus grupos originales para contarle a los demás las similitudes que han observado y discutirán qué significado podría tener esto respecto a la relación de unas especies con otras. El docente observará y procurará que en las discusiones y comparaciones se use el correcto vocabulario científico que han aprendido al conocer esas características (“torus”, “sagital”, “parietal”, “prognatismo”, etc.). Esto servirá para que hagan una lista de qué características son más “modernas” y cuáles son las más “primitivas”:

Características más “primitivas”	Características más “modernas”
<ul style="list-style-type: none"> - Frontal huidizo - Torus muy pronunciado - Posteriorización del hueso nasal - Prognatismo - Cráneo alargado - Presencia de crestas - Base del cráneo aplanada 	<ul style="list-style-type: none"> - Frontal vertical - Arcos supraorbitales poco pronunciados Poco torus o ausencia del mismo. - Cara más plana - Nariz anteriorizada - Boca posteriorizada - Cráneo más ovalado

Tabla 7. Características que pueden considerarse más primitivas o más modernas.

Si bien esto puede resultar una pequeña guía, verán que hay especies que comparten rasgos de ambos tipos e incluso especies más “primitivas” que tienen algunos rasgos modernos, por lo que no será determinante a la hora de clasificar las especies, pero sí aportará algunas pistas.

Tras tener un conjunto de datos sobre cada especie en una ficha, haber reunido apuntes al comparar con otras especies, haber discutido sobre sus características y haber clasificado dichas morfologías, cada grupo debe buscar en internet, con los datos que ha reunido, qué especies corresponden a sus ejemplares. Para ello, pueden usar los datos morfológicos que han conseguido o los datos temporales; de una manera u otra, podrán ir verificando cada característica que han establecido sobre su ejemplar comparándola con las que encuentren en internet. Deben empezar la búsqueda por aquellos datos más importantes (por ejemplo: periodo de tiempo, presencia de torus o de cresta,...) e ir cribando los géneros más susceptibles de ser el que buscan, para al final fijarse en los detalles (forma de la nariz, mayor o menor prognatismo, forma del cráneo etc.) e intentar encontrar la especie. Al final, tendrán que relatar su búsqueda en un Prezi que presentarán a sus compañeros, proponiendo una o varias especies que podrían corresponder a su ejemplar. Utilizando todos los datos que han reunido y los modelos de los fósiles, han de argumentar por qué creen que su fósil pertenece a esa especie.

Dada la alta diversidad de *hominina* y de australopitecinos, puede ser que el alumnado acierte con el género pero proponga diferentes especies, no pudiendo decidirse por una en concreto. En este punto, el docente puede actuar como guía para dirigirlos a la especie correcta, aunque lo óptimo sería que los estudiantes la encontraran por sí mismos. A aquellos grupos que tienen modelos de australopitecinos se les dará por válido si clasifican a su ejemplar como australopiteco “robusto” y “grácil”.

Una vez que cada grupo conoce sus ejemplares, deben situarlos en un árbol filogenético que presentarán en forma de mural. Cada especie irá acompañada de una línea de tiempo en la que vivió, las particularidades que las caracterizaron, y pegarán el modelo 3D al lado (si el modelo pesase mucho, se puede optar por un mural en horizontal). Para completar el árbol, buscarán información sobre unas especies que les ayudarán a enlazar las que ya tienen: *Homo antecessor* (hace entre aprox. 750.000 años y propuesto el último ancestro en común entre neandertal y humano moderno), *Homo heidelbergensis* (hace 400.000 años, considerado antepasado directo del neandertal), *Australopithecus anamensis* (el australopitecino más antiguo, de hace 4,2 m.a.) y *Orrorin* y *Sahelanthropus*, los que se creen los primeros homíninos. Al igual que con las otras

especies, añadirán características que les identifiquen e imágenes ilustrativas, y podrán buscar modelos de impresión de restos fósiles de dichas especies para compararlos con los anteriormente vistos y añadirlos al mural. Para ello, [African Fossils](#) (“African Fossils”, s.f.) es una buena herramienta al albergar modelos de impresión 3D descargables de diferentes homínidos, entre muchas otras. El docente guiará a los estudiantes para establecer las relaciones entre unas especies y otras en el mural mientras van elaborando las distintas ramas con pintura y pegando los datos de cada ejemplar con recortes hechos por ellos.

COMPETENCIAS:

Comunicación lingüística: Se desarrolla cuando el alumnado elabora un texto en el que se relata la búsqueda que han realizado para averiguar qué especie de homínido tienen.

Competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología: Se manejan competencias matemáticas al tratar con diferentes épocas en millones de años y se usan aplicaciones tecnológicas para ver los resultados y sacar nuevos modelos de otros fósiles por impresión 3D. El alumnado se introduce en el trabajo de campo que hacen los paleontólogos y en las investigaciones que llevan a cabo, analizando las características de los fósiles para identificarlos. Además, han de indagar sobre su posible grado de parentesco mediante la construcción de un árbol filogenético que abarque a los especímenes descubiertos y a otros que tendrán que situar más tarde.

Competencia digital: Se desarrolla al usar aplicaciones informáticas como Prezi o repositorios como African Fossils.

Aprender a aprender: Los estudiantes analizan lo aprendido al crear la filogenia de las especies descubiertas, añadiendo las características principales que ellos mismos han elegido para sus especímenes, y reflexionando sobre sus conclusiones..

Competencias sociales y cívicas: El alumnado colabora en grupo para conseguir sus objetivos, formando equipos para excavar e investigar sobre sus fósiles. Además, los diferentes equipos han de compartir los datos que han encontrado para al final construir todos juntos la filogenia.

5. Reflexión final y trabajo futuro

A modo de conclusión, podemos decir que el uso de la impresión 3D representa un recurso de gran utilidad para la enseñanza en general, y particularmente, para Biología. Son muy numerosos los conceptos difíciles de asumir por parte de los estudiantes, o bien por ser demasiado abstractos, o por corresponder a objetos que caen fuera de la experiencia cotidiana, y de los que es muy difícil tener una percepción directa. Una prueba de la gran cantidad de temáticas a las que se puede aplicar esta herramienta la constituye este trabajo. Pensado inicialmente para abarcar todo el bloque 1 de la asignatura “Biología y Geología” de 4º de la ESO, posteriormente fue haciéndose cada vez más evidente que el número de aplicaciones que podía tener la creación de modelos tridimensionales, con sus correspondientes actividades, hacían inviable, para un trabajo de este tipo, incluir todos estos temas, por lo que finalmente se decidió que estuviera centrado únicamente en la evolución.

Otra razón que apoya la conclusión anterior es que algunas de las actividades propuestas en este TFM se han podido llevar a la práctica. Bajo mi propia observación, y apoyando lo ya expuesto por los diferentes autores anteriormente citados, el uso de estos materiales supuso un impulso en la motivación y la predisposición al trabajo del alumnado de mi clase de prácticas, obviando el hecho de que era una gran novedad el poder trabajar con recursos de impresión 3D. Sin embargo, hay que tener en cuenta que ningún recurso, por sí solo, garantiza obtener unos buenos resultados en el aula, por lo que su uso ha de ser moderado y combinado con otros, como por ejemplo las TICs, y que ha de ser aplicado siguiendo metodologías diversas para obtener el máximo beneficio.

Por otra parte, se ha prestado particular importancia a que los estudiantes intenten imitar, en la medida de lo posible, el trabajo de los científicos, invitándoles a trabajar con su metodología y con lo que debería ser, al menos en teoría, el sentido de la cooperación en ciencia. Esto debería ayudarles a cambiar algunas concepciones erróneas que podrían tener sobre los científicos y que, de hecho, podríamos decir que todos compartimos. En este sentido, el aprendizaje cooperativo y la indagación son herramientas con gran potencial, que combinados con el material utilizado en este trabajo pueden suponer una verdadera experiencia de aprendizaje.

Cabe decir que el exponer diferentes casos de evolución debe llevar a que los estudiantes visualicen mejor el concepto de forma sistémica, donde la interacción de varios factores da lugar a una conclusión. A su vez, si bien enseñar las pruebas que

apoyan la evolución tiene gran importancia en este campo, también es importante mostrar que una teoría o hipótesis científica siempre está sujeta a mejoras, puesto que la combinación de evidencias que la apoyan puede mejorar y extenderse con el tiempo. Esto es importante puesto que permite introducir al alumnado en el denominado método científico, y en diversos conceptos relacionados con la naturaleza de la ciencia.

Para terminar, las perspectivas de futuro para la combinación de recursos TIC-impresión 3D aplicados a la docencia son halagüeñas. Pero para ello, la formación del profesorado es vital en este aspecto, pues daría a conocer esta herramienta y podría incitar a los docentes a utilizarlas en sus aulas. Un ejemplo de esto es el proyecto Gutenberg3D, que mediante estas premisas busca mejorar la implantación de este recurso en los centros educativos. Así pues, es necesario llevar a cabo esfuerzos que utilicen este material, ya sea mediante este tipo de proyectos, o mediante el diseño de actividades usando modelos impresos en 3D, con el objetivo llevarlas a la práctica, como esperamos que suceda con este trabajo.

6. Bibliografía

- Acevedo, J. A., Vázquez, Á., y Manassero, M. A. (2003). Papel de la educación CTS en una alfabetización científica y tecnológica para todas las personas. *REEC: Revista Electrónica de Enseñanza de Las Ciencias*, 2(2), 1.
- African Fossils. (s.f.). Descargado de <http://africanfossils.org/>.
- Análisis, comparación y reconstrucción filogenética de secuencias de DNA mitocondrial. (s.f.). Descargado de <http://biologia.uab.es/biocomputacio/tutorial/sessio6/tutorialdnamit.htm>
- Ayala, C. (2013). *Estrategia metodológica basada en la indagación guiada con estudiantes de grado séptimo de la Institución Educativa Rafael J. Mejía del municipio de Sabaneta*. Universidad Nacional de Colombia. Descargado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/11754/1/43628345.2014.pdf>.
- Azzaroli, A. (1991). Ascent and decline of monodactyl equids: a case for prehistoric overkill. *Annales Zoologici Fennici*, 28(3/4), 151–163.
- Ballesteros, M. Á. (2012). El grupo como espacio de desarrollo del conocimiento humano . Una reconstrucción entre adultos desde una perspectiva social. *Cuestiones Pedagógicas*, 21, 249–275.
- Bell, L., Brown, A., Bull, G., Conly, K., Johnson, L., McAnear, A., Maddux, C., Marks, G., Thompson, A., Schmidt, D., Scrhum, L., Smaldino, S., Spector, M., y Sprague, D. (2010). A Special Editorial: Educational Implications of the Digital Fabrication Revolution. *TechTrends*, 54(5), 2–5. <http://doi.org/10.1007/s11528-010-0423-2>.
- Berger, L. (2012). Australopithecus sediba and the earliest origins of the genus Homo. *Journal of Anthropological Sciences = Rivista Di Antropologia : JASS / Istituto Italiano Di Antropologia*, 90, 117–131. <http://doi.org/10.4436/jass.90009>.
- Berry, R. Q., Bull, G., Browning, C., Thomas, C., Starkweather, K., y Aylor, J. H. (2010). Preliminary considerations regarding use of digital fabrication to incorporate engineering design principles in elementary mathematics education. *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education*, 10(2), 167–172.
- BLAST: Basic Local Alignment Search Tool. (s.f.). Descargado de <http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>.
- Blauch, D. N., y Carroll, F. A. (2014). 3D printers can provide an added dimension for teaching structure-energy relationships. *Journal of Chemical Education*, 91(8), 1254–1256. <http://doi.org/10.1021/ed4007259>.
- Ceballos, F. C., y Álvarez, G. (2013). Royal dynasties as human inbreeding laboratories: the Habsburgs. *Heredity*, 111(2), 114–121. <http://dx.doi.org/10.1038/hdy.2013.25>.
- Cortés, A. L., y de la Gárgara, M. (2007). La construcción de problemas en el laboratorio durante la formación del profesorado: una experiencia didáctica. *Enseñanza de Las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 25(3), 453–449.
- Cotton, T. J., y Braddy, S. J. (2004). The phylogeny of arachnomorph arthropods and the origin of the Chelicerata. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 94, 169–193. Descargado de [http://www.museunacional.ufrj.br/mndi/Aracnologia/pdfliteratura/Cotton %26 Brady 2004 Arachnomorpha.pdf](http://www.museunacional.ufrj.br/mndi/Aracnologia/pdfliteratura/Cotton%20Brady%202004%20Arachnomorpha.pdf).
- Crow, J. F. (2010). Wright and Fisher on Inbreeding and Random Drift. *Genetics*, 184(3), 609 LP-611.

- Darwin, C., y Mayr, E. (1964). *On the Origin of Species. A Facsimile of the First Edition*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Decreto 111/2016 por el cual se establece la ordenación y el currículo de la Educación Secundaria obligatoria en la Comunidad Autónoma de Andalucía (2016): *Decreto 111/2016, de 14 de junio, por el cual se establece la ordenación y el currículo de la Educación Secundaria obligatoria en la Comunidad Autónoma de Andalucía*. (Publicado en BOJA, nº 122, de 28 de junio de 2016). Descargado de <http://www.juntadeandalucia.es/boja/2016/122/BOJA16-122-00223.pdf>.
- de Queiroz, K. (2005). Ernst Mayr and the modern concept of species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(suppl 1), 6600–6607. <http://doi.org/10.1073/pnas.0502030102>.
- De Zubiría, J. (2006). Hacia una pedagogía dialogante. En *Los modelos pedagógicos*. Bogotá: Cooperativa editorial de Magisterio.
- Der, R., Epstein, C. L., & Plotkin, J. B. (2011). Generalized population models and the nature of genetic drift. *Theoretical Population Biology*, 80(2), 80–99. <http://doi.org/10.1016/j.tpb.2011.06.004>.
- Díaz, D., Oviedo, S., Otazu, A., Ibañez, F., Sierrol, D., y Alves, M. (2014). Software y Hardware de Código Abierto para Desarrollo de Habilidades de Innovación Tecnológica. En *IX Conferencia Latinoamericana de Objetos y Tecnologías de Aprendizaje* (pp. 418–422). Manizales, Colombia. Descargado de <http://www.laclo.org/papers/index.php/laclo/issue/view/10/showToc>.
- Díaz de la Fuente, M. T. (2013). *El reto de enseñar y aprender evolución: una propuesta didáctica*. UAL.
- Earth Science Literacy Initiative - ESLI. (s.f.). Descargado de <http://www.earthscienceliteracy.org/index.html>.
- Eiberg, H., Troelsen, J., Nielsen, M., Mikkelsen, A., Mengel-From, J., Kjaer, K. W., y Hansen, L. (2008). Blue eye color in humans may be caused by a perfectly associated founder mutation in a regulatory element located within the HERC2 gene inhibiting OCA2 expression. *Human Genetics*, 123(2), 177–187. <http://doi.org/10.1007/s00439-007-0460-x>.
- Eisenberg, M. (2007). Pervasive fabrication: Making construction ubiquitous in education. En *Pervasive Computing and Communications Workshops, 2007. PerCom Workshops' 07. Fifth Annual IEEE International Conference on* (pp. 193–198). CONF, IEEE.
- Fernández, I., Gil, D., Carrascosa, J., Cachapuz, A., y Praia, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(3), 477–488.
- Gaißert, N., Waterkamp, S., Fleming, R. W., y Bülthoff, I. (2012). Haptic categorical perception of shape. *PloS One*, 7(8), e43062. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0043062>.
- Gallace, A., y Spence, C. (2008). The cognitive and neural correlates of “tactile consciousness”: a multisensory perspective. *Consciousness and Cognition*, 17(1), 370–407. <http://doi.org/10.1016/j.concog.2007.01.005>.
- Garritz, A. (2006). Naturaleza de la Ciencia e Indagación: cuestiones fundamentales para la educación científica del ciudadano. *Revista Iberoamericana de Educación*, 42, 127–152.
- Genome Dictionary - Genetics Glossary - Definitions. (s.f.). Descargado de <http://www.theodora.com/genetics/index.html>.

- Gavrilets, S. (2003). Perspective: models of speciation: what have we learned in 40 years? *Evolution*, 57(10), 2197–2215.
- Gershenfeld, N. (2008). *Fab: the coming revolution on your desktop--from personal computers to personal fabrication*. BOOK, Basic Books.
- Gillespie, J. H. (1984). Molecular Evolution Over the Mutational Landscape. *Evolution*, 38(5), 1116–1129. <http://doi.org/10.2307/2408444>.
- Gillespie, J. H. (2001). Is the population size of a species relevant to its evolution? *Evolution*, 55(11), 2161–2169. <http://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2001.tb00732.x>.
- González-García, F. (2015). *Didáctica de las Ciencias para educación Primaria. II. Ciencias de la Vida*. Madrid: Anaya Ediciones Pirámide.
- Gregory, T. R. (2009). Understanding Natural Selection: Essential Concepts and Common Misconceptions. *Evolution: Education and Outreach*, 2(2), 156–175. <http://doi.org/10.1007/s12052-009-0128-1>.
- Haldane, J. B. S. (1957). The cost of natural selection. *Journal of Genetics*, 55(3), 511–524. <http://doi.org/10.1007/BF02984069>.
- Hameed, S. (2008). Science and religion. Bracing for Islamic creationism. *Science*, 322(5908), 1637–1638. <http://doi.org/10.1126/science.1163672>.
- Harrar, V., y Harris, L. R. (2005). Simultaneity constancy: detecting events with touch and vision. *Experimental Brain Research*, 166(3), 465–473. <http://doi.org/10.1007/s00221-005-2386-7>.
- Harris, M. A., Peck, R. F., Colton, S., Morris, J., Neto, E. C., y Kallio, J. (2009). A Combination of Hand-held Models and Computer Imaging Programs Helps Students Answer Oral Questions about Molecular Structure and Function: A Controlled Investigation of Student Learning. *CBE Life Sciences Education*, 8(1), 1–6. <http://doi.org/10.1187/cbe.08>.
- Hatch, M. (2013). *The maker movement manifesto: rules for innovation in the new world of crafters, hackers, and tinkerers*. BOOK, McGraw Hill Professional.
- Hickman, C. P., Roberts, R. G., & Larson, A. C. (1997). *Zoología. Principios Integrales*. Madrid: McGraw-Hill - Interamericana.
- Hodson, D. (1993). In search of a rationale for multicultural science education. *Science Education*, 77(6), 685–711. <http://doi.org/10.1002/sce.3730770611>.
- Horowitz, S. S., y Schultz, P. H. (2014). Printing Space: Using 3D Printing of Digital Terrain Models in Geosciences Education and Research. *Journal of Geoscience Education*, 62(1), 138–145. <http://doi.org/10.5408/13-031.1>.
- Hughes, N. C. (2007). The Evolution of Trilobite Body Patterning. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35(1), 401–434. <http://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140258>.
- Jimenez Tejada, M. P., González García, F., y Hódar Correa, J. A. (2002). Evolución y selección natural en textos LOGSE. En *ENCUENTROS DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES* (pp. 851–858). La Laguna, España.
- Johnson, D. W., Johnson, R. T., y Holubec, E. J. (1999). *El aprendizaje cooperativo en el aula - Cooperative Learning in the classroom*. Buenos Aires: Editorial Paidós SAICF.
- Junk, S., y Matt, R. (2015). New Approach to Introduction of 3D Digital Technologies in Design Education. *Procedia CIRP*, 36, 35–40. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.045>.

- Kalinowski, S. T., Leonard, M. J., Andrews, T. M., y Litt, A. R. (2013). Six Classroom Exercises to Teach Natural Selection to Undergraduate Biology Students. *Life Sciences Education*, 12(Fall 2013), 483–493. <http://doi.org/10.1091/cbe-12-06-0070>.
- Kemp, A. C. (2002). Implications of diverse meanings for “scientific literacy”. En P. Rubba, J. Rye, W. Di Biase, & B. Crawford (Eds.), *Annual International Conference of the Association for the Education of Teachers in Science*. Charlotte: University of North Carolina.
- Kocher, T. D. (2004). Adaptive evolution and explosive speciation: the cichlid fish model. *Nat Rev Genet*, 5(4), 288–298. <http://dx.doi.org/10.1038/nrg1316>.
- Koonin, E. V. (2005). Orthologs, paralogs, and evolutionary genomics. *Annual Review of Genetics*, 39, 309–338. <http://doi.org/10.1146/annurev.genet.39.073003.114725>.
- Kutschera, U., y Niklas, K. J. (2004). The modern theory of biological evolution: an expanded synthesis. *Naturwissenschaften*, 91, 255–276. <http://doi.org/10.1007/s00114-004-0515-y>.
- Las personas con ojos azules descienden de un solo antepasado que vivió hace 6.000 años. (2008, Febrero 2). *El Mundo*. Descargado de <http://www.elmundo.es/elmundo/2008/02/01/ciencia/1201889800.html>.
- Leakey, M. G., Spoor, F., Brown, F. H., Gathogo, P. N., Kiarie, C., Leakey, L. N., y McDougall, I. (2001). New hominin genus from eastern Africa shows diverse middle Pliocene lineages. *Nature*, 410(6827), 433–440. <http://dx.doi.org/10.1038/35068500>.
- López-Gay, R., Jiménez-Liso, M. R., y Martínez-Chico, M. (2015). Enseñanza de un modelo de energía mediante indagación y uso de sensores. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 80, 38–48.
- Los Cinco dedos de la Evolución. (s.f.). Descargado de <https://www.youtube.com/watch?v=KWXQ8ouXgxY>.
- Majerus, M. E. N. (1999). Evolucion y mantenimiento del melanismo industrial en los Lepidoptera. *Boletín de La Sociedad Entomológica Aragonesa*, 26, 637–649.
- Makerbot Thingiverse. (s.f.). Descargado de <https://www.thingiverse.com/>.
- Malone, M. (2012). Natural Selection and Evolution: Using Multimedia Slide Shows to Emphasize the Role of Genetic Variation. *Science Scope*, 36(2), 26–30.
- Martínez Chico, M., López-Gay Lucio-Villegas, R., y Jiménez Liso, M. R. (2014). ¿Es posible diseñar un programa formativo para enseñar ciencias por Indagación basada en Modelos en la formación inicial de maestros? Fundamentos, exigencias y aplicación. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 4379(28), 153–173. <http://doi.org/10.7203/dces.28.3153>.
- Martínez-Chico, M. (2013). *Formación inicial de maestros para la enseñanza de las ciencias. Diseño, implementación y evaluación de una propuesta de enseñanza*. (Tesis doctoral). Universidad de Almería.
- Masel, J. (2012). Rethinking Hardy-Weinberg and genetic drift in undergraduate biology. *BioEssays: News and Reviews in Molecular, Cellular and Developmental Biology*, 34(8), 701–710. <http://doi.org/10.1002/bies.201100178>.
- Mayr, E. (1992). A Local Flora and the Biological Species Concept. *American Journal of Botany*, 79(2), 222–238. <http://doi.org/10.2307/2445111>.
- Meyer, S. C. (2015). 3D Printing of Protein Models in an Undergraduate Laboratory: Leucine Zippers. *Journal of Chemical Education*, 92(12), 2120–2125. <http://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00207>.

- Møller, A. P. M., y Alatalo, R. V. (1999). Good-genes effects in sexual selection. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 266(1414), 85. <http://doi.org/10.1098/rspb.1999.0607>.
- Morjan, C. L., y Rieseberg, L. H. (2004). How species evolve collectively: implications of gene flow and selection for the spread of advantageous alleles. *Molecular Ecology*, 13(6), 1341–1356. <http://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2004.02164.x>.
- Murillo, P., Gandul, M. I., y Pérez, M. T. (1996). Apoyo colaborativo interprofesional. En A. Parrilla (Ed.), *Apoyo a la escuela: Un proceso de colaboración* (pp. 139–168). Bilbao: Mensajero.
- National Center for Biotechnology Information. (s.f.). Descargado de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>.
- Nudelman, N. S. (2015). Educación en ciencias basadas en la indagación. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 10, 11–22.
- Orden ECD/65/2015 por la que se describen las relaciones entre las competencias, los contenidos y los criterios de evaluación de la educación primaria, la educación secundaria obligatoria y el bachillerato (2015): *Orden ECD/65/2015, de 21 de enero, por la que se describen las relaciones entre las competencias, los contenidos y los criterios de evaluación de la educación primaria, la educación secundaria obligatoria y el bachillerato*. (Publicado en BOE, nº 25, de 29 de enero de 2015). Descargado de <http://www.boe.es/boe/dias/2015/01/29/pdfs/BOE-A-2015-738.pdf>.
- Orden por la que se desarrolla el currículo correspondiente a la Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Autónoma de Andalucía, se regulan determinados aspectos de la atención a la diversidad y se establece la ordenación de la evaluación del proceso de aprendizaje del alumnado y se regulan determinados aspectos de la atención a la diversidad (2016). *Orden de 14 de julio de 2016, por la que se desarrolla el currículo correspondiente a la Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Autónoma de Andalucía, se regulan determinados aspectos de la atención a la diversidad y se establece la ordenación de la evaluación del proceso de aprendizaje del alumnado y se regulan determinados aspectos de la atención a la diversidad*. (Publicado en BOJA, nº 144, de 28 de julio de 2016). Descargado de <http://www.juntadeandalucia.es/boja/2016/144/BOJA16-144-00479.pdf>.
- Orr, H. A. (2003). The Distribution of Fitness Effects Among Beneficial Mutations. *Genetics*, 163(4), 1519 LP-1526.
- Orr, H. A. (2009). Fitness and its role in evolutionary genetics. *Nat Rev Genet*, 10(8), 531–539. <http://dx.doi.org/10.1038/nrg2603>.
- Otto, S. P., y Whitlock, M. C. (1997). The probability of fixation in populations of changing size. *Genetics*, 146(2), 723–733.
- Pedrinaci, E., Gil, C., y Gómez de Salazar, J. M. (2008). *Biología y Geología 1*. Ed. SM.
- Pennisi, E. (2003). Colorful Males Flaunt Their Health. *Science*, 300(5616), 29 LP-31.
- Pérez, S. I. (2012). ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LOS HUMANOS. La historia de la divergencia de los primates. *Ciencia Hoy*, 22(129), 22–30.
- PHYLO | DNA Puzzles. (s.f.). Descargado de <http://phylo.cs.mcgill.ca/#!/SP/>.
- Prieto Navarro, L. (2007). *El aprendizaje cooperativo*. PPC.
- Rábano, I. (1999). Historia evolutiva de los trilobites. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*, 26, 225–233.

- Real Decreto por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato (2015): *Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato*. (Publicado en BOE, nº 3, de 3 de enero de 2015). Descargado de <https://www.boe.es/boe/dias/2015/01/03/pdfs/BOE-A-2015-37.pdf>.
- Romero López, M. C. (2011). *Identificación de ideas previas sobre los conceptos de individuo, población y especie en el alumnado de secundaria*. (Trabajo Fin de Máster no publicado). Universidad de Granada.
- Roque, M. Á., y Valverde, R. (2012). La observación y percepción del entorno y modelos en el espacio a través de aplicaciones prácticas con sistemas de impresión en la Educación Artística. En *IV Congreso de Educación Artística y Visual. Contribuciones desde la periferia*. Jaén.
- Ross, M. R. (2005). Who Believes What? Clearing up Confusion over Intelligent Design and Young-Earth Creationism. *Journal of Geoscience Education*, 53(3), 319–323.
- Rossi, S., Benaglia, M., Brenna, D., Porta, R., y Orlandi, M. (2015). Three Dimensional (3D) Printing: A Straightforward, User-Friendly Protocol To Convert Virtual Chemical Models to Real-Life Objects. *Journal of Chemical Education*, 16(1), 3–6. <http://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00168>.
- Sabariago, J. M., & Manzanares, M. (2006). Alfabetización Científica. En *I Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Sociedad e Innovación*. México D.F.
- Sarasa Funes, D. (2014). Creatividad tecnológica: Mantener al alcance de los niños. *Economía Aragonesa*, 54, 95–108.
- Scratch. (s.f.). Descargado de <https://scratch.mit.edu/>.
- Shen, B. S. P. (1975). Science literacy and the public understanding of science. En *Communication of scientific information* (pp. 44–52). Karger Publishers.
- Shubin, N. H., Daeschler, E. B., y Coates, M. I. (2004). The early evolution of the tetrapod humerus. *Science*, 304(5667), 90–93. <http://doi.org/10.1126/science.1094295>.
- Stripgenerator.com. (s.f.). Descargado de <http://stripgenerator.com/strip/create/>.
- Text2MindMap. (s.f.). Descargado de <https://www.text2mindmap.com/>.
- Thagard, P., y Findlay, S. (2010). Getting to Darwin: Obstacles to Accepting Evolution by Natural Selection. *Science & Education*, 19, 625–636. <http://doi.org/10.1007/s11191-009-9204-8>.
- The New Media Consortium. (2013). *NMC Horizon Report: Edición sobre Educación Superior 2013*. Austin, Texas. Descargado de http://revista.unir.net/especiales/horizon-report/files/UNIR_HORIZON_REPORT.pdf.
- ThingLink. (s.f.). Descargado de <https://www.thinglink.com/>.
- Travieso-Rodríguez, J. A., Jerez-Mesa, R., y Gómez-Gras, G. (2014). Impresión 3D: del laboratorio a casa. Programa de divulgación científico-tecnológica sobre la tecnología de impresión 3D. En EUETIB (Ed.), *Jornades de Recerca EUETIB 2014*. Barcelona. Descargado de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099/16355>.
- Trujillo Sáez, F. (2002). Aprendizaje Cooperativo para la enseñanza de la Lengua. *Publicaciones*, 32, 147–162.
- University of California Museum of Paleontology & National Center for Science Education. (s.f.). *Understanding Evolution*. Descargado de http://evolution.berkeley.edu/evolibrary/article/0_0_0/evo_21_sp.

- Uttal, D. H., y Cohen, C. A. (2012). Spatial thinking and STEM education: When, why and how? *Psychology of Learning and Motivation*, 57(2), 147–181.
- Verner, I., y Merksamer, A. (2015). Digital Design and 3D Printing in Technology Teacher Education. *Procedia CIRP*, 36, 182–186. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.041>.
- Wong, K. (2014). Una diferencia mínima, pero notable. *Investigación y Ciencia*, 458, 15.
- Wood, B. (2014). Nuestro intrincado árbol genealógico. *Investigación y Ciencia*, 458, 23–27.
- Wood, B., y Constantino, P. (2004). Human origins: Life at the top of the tree. En M. J. Donoghue (Ed.), *Assembling the Tree of Life* (pp. 517–553). New York: Oxford University Press.
- Wood, B., y Richmond, B. G. (2000). Human evolution: taxonomy and paleobiology. *Journal of Anatomy*, 197 (Pt 1), 19–60.
- Zamora, C. (2002). Evidencias a favor de la evolución. En M. Soler (Ed.), *Evolución: La base de la Biología* (pp. 57–74). Granada.

ANEXOS

Anexo I- Glosario²³

Acervo genético: conjunto de alelos para un determinado gen de una población

ADN: Ácido desoxirribonucleico. Material genético de todos los organismos, consistente en una molécula formada por dos cadenas de nucleótidos unidas entre sí y dispuestas de forma helicoidal. El azúcar que compone sus ácidos nucleicos es la desoxirribosa.

Alelo: Cada una de las diferentes formas alternativas o variantes de un gen.

Artrópodo: Animal triblástico celomado cuyo cuerpo está recubierto por una cutícula de quitina (exoesqueleto) y posee apéndices articulados.

Clado: Conjunto de especies que descienden de un ancestro y forman una rama del árbol filogenético

Cámbrico: Periodo incluido dentro de la Era Paleozoica que empezó hace 540 m.a. y finalizó alrededor de 485 m.a.

Dominante: Alelo que se manifiesta en el heterocigoto y que enmascara al resto en un determinado grado.

Especie: Grupo de individuos que pueden reproducirse entre sí, con un antecesor común y aislados de otros grupos desde el punto de vista reproductivo.

Exoesqueleto: Estructura de soporte externa y no envuelta por tejido vivo. Opuesto a endoesqueleto.

Fenotipo: Caracteres visibles o patentes de un organismo, resultado de la acción combinada del genotipo y la influencia de los factores ambientales.

Fijación de alelos: Cambio que se da en el acervo genético desde una situación donde existen al menos dos variantes de un gen (alelo) hasta otra en la que sólo uno de esos alelos prevalece.

²³ Se han tomado numerosos términos del glosario online "Genome Dictionary - Genetics Glossary - Definitions", (s.f.).

Filogenia: Historia evolutiva de un organismo. Clasificación de las especies en conjuntos, denominados taxones, en función de sus relaciones de parentesco evolutivo.

Fósil: Resto de un organismo del pasado o de su actividad (pisadas, galerías, excrementos...), que se ha conservado de manera permanente.

Gen: Unidad fundamental, física y funcional, que transmite información de una generación a la siguiente y es un segmento de ADN que lleva la información necesaria para la síntesis de un polipéptido.

Genoma: Conjunto completo de genes referido a un individuo o una especie.

Genotipo: Combinación de alelos específicos de una célula o de un individuo referidos al conjunto del genoma o más frecuentemente a un determinado gen.

Hábitat: En biología, lugar donde normalmente vive un organismo o los individuos de una población.

Haplotipo: Forma de denotar el genotipo colectivo de un número de loci estrechamente relacionados en un cromosoma.

Herencia multifactorial: Situación en la cual la sucesión de un rasgo está sujeta a varios factores.

Heterocigoto: Individuo con alelos distintos para uno o más genes.

Homocigoto: Individuo con alelos iguales para uno o más genes.

Homología: Estructuras u órganos presentes en especies diferentes que revelan un mismo origen evolutivo, aunque en el presente no desempeñen la misma función

Insecto: Clase del filo artrópodos caracterizada principalmente por presentar un par de antenas y tres pares de patas.

Lepidóptero: Perteneciente al orden *Lepidoptera*, artrópodos dentro de la clase *Insecta*, en su mayoría voladores.

Ligamiento de genes: La proximidad de dos o más marcadores en un cromosoma que manifiesta la probabilidad relativa de ser separados por procesos de replicación o reparación de ADN, y por tanto la probabilidad de que sean heredados juntos o no.

Locus: Lugar que ocupa un gen en un cromosoma. Su plural es loci.

Mapa genético: Determinación de la posición relativa de genes en un cromosoma o un plásmido, y la distancia entre ellos mediante unidades de ligamiento o unidades físicas.

Marcador molecular: Gen u otro elemento identificable del ADN cuya herencia puede ser rastreada.

Metámero: Cada uno de los anillos o segmentos que forma la unidad de división de un artrópodo o anélido.

Mutación: Proceso que da lugar a la aparición de una nueva forma alternativa para un gen, o gen que resulta de este proceso.

Nucleótido: Molécula básica que compone el ADN, formada por una pentosa, un grupo fosfato y una base nitrogenada que puede ser timina, adenina, guanina y citosina. En la doble hélice de ADN, estas bases se unen mediante enlaces de puentes de hidrógeno con complementariedad T-A y C-G.

Paleozoico: Era que abarca desde el Cámbrico Inferior (hace 540 m.a.) hasta el Pérmico Superior (hace 250 m.a.)

Parietal: Cada uno de los dos huesos situados en las partes del cráneo correspondientes a la zona media y lateral de la cabeza

Quelicerado: Subfilo de artrópodos caracterizado por no presentar antenas, tener el cuerpo dividido, generalmente, en dos regiones y tener por apéndices bucales los quelíceros, entre otras características.

Ramoneador: Animal que pace de las hojas y las puntas de las ramas de los árboles, cortadas antes o en pies tiernos de poca altura.

Recesivo: Alelo que no se manifiesta de forma total o parcial en un heterocigoto. Opuesto a dominante.

Recombinación genética: Proceso por el cual la descendencia presenta una combinación de genes diferente de la de sus progenitores , producido por la rotura de cromosomas maternos y paternos, el intercambio de las correspondientes secciones y la reunión de los cromosomas, en la meiosis. El resultado es un intercambio de alelos entre cromosomas.

Secuenciación: Determinación del orden de los nucleótidos en una secuencia de ADN o ARN, o el orden de aminoácidos en una proteína.

SNP: Nucleótido de Polimorfismo Simple, variaciones en una secuencia de ADN que ocurren cuando ocurre la alteración de un sólo nucleótido (A, T, C, G).

Subfilo: Categoría taxonómica que reúne a los integrantes de la categoría inmediatamente superior, el filo, por ciertas características comunes.

Tagma: Región del cuerpo de un artrópodo que es resultado de la fusión de dos o más metámeros corporales.

Taxón: Cualquier grupo de los utilizados para clasificar a los seres vivos, como especie o reino.

Tórax: Región media de las tres en las que se divide el cuerpo de algunos grupos de artrópodos.

Torus: reborde óseo muy pronunciado que se sitúa sobre las órbitas oculares en el cráneo.

Anexo II- Trasposición del artículo de Eiberg

El color del ojo humano es un rasgo cuantitativo representado mediante [herencia multifactorial](#), en la que el resultado es una distribución y concentración variable de [melanina](#), un tipo de pigmento. Así, la variedad de colores de ojos que conocemos son resultado de las variaciones de la distribución de este pigmento en el iris. En los humanos, podemos encontrar la mayor diversidad de colores de ojos entre los caucásicos.

Popularmente, siempre se ha visto la herencia de los ojos marrones o azules como el típico ejemplo que se enseña en los problemas de genética en el Instituto. Sin embargo, la exposición de este pigmento en diferentes concentraciones y distribución en el iris sugiere, según datos recientes, que la herencia del color del ojo podría ser mucho más compleja de lo que se creía. La pérdida de pigmentación en la piel, pelo y ojos, también conocida como albinismo oculocutáneo, tiene su origen en mutaciones en los genes OCA 1-4. Según varios estudios, la variación del color del ojo humano tiene parte de sus orígenes en un [locus](#) llamado OCA2. Este se considera actualmente como el mayor contribuyente a la variación del ojo humano, y su función está directamente relacionada con la biosíntesis de melanina. Se averiguó que el lugar que determina el color azul del ojo se encuentra en una región dentro del gen HERC2, situado corriente arriba del locus OCA2, tras el diseño y análisis de [mapas genéticos](#) de diferentes familias de orígenes danés, turco y jordano.

Esta pequeña región se caracterizaba por tener secuencias que varían en sólo uno de sus nucleótidos (Polimorfismo de nucleótido simple, [SNP](#)) y varios de ellos eran transmitidos juntos en la herencia, sin separarse por recombinación, a lo que se denomina [haplotipo](#). 15 de estos SNPs fueron usados para análisis de asociación y la construcción de los haplotipos, lo que conllevó la [secuenciación del ADN](#) y su análisis funcional en varias de las secuencias. Se identificaron dos SNPs que se podían asociar al color de ojos azul y marrón: el rs12913832 y el rs1129038. El alelo para el marrón de rs12913832 se estudió y se encontró una alta conservación y similaridad entre diferentes especies de animales. Sin embargo, a modo de dato, el [fenotipo](#) en este estudio no se clasificó tan sólo como marrón y azul, sino como cuatro fenotipos diferentes observados que fueron azul, azul con puntos marrones, avellana (una mezcla de verde y marrón) y el color marrón.

Los genes que expresan la variación del color del ojo ya fueron rastreados anteriormente y situados en el brazo largo del cromosoma 15 en una población Danesa por Eiberg y Mohr en 1996. En el estudio de Eiberg, se rastreó a un nivel superior esta región encargada de la pigmentación del iris en el color marrón/azul mediante análisis de **ligamiento de genes**, flanqueados por **marcadores moleculares** específicos. Esto también se utilizó para la construcción de haplotipos cuyo principio y final se identificaban con la presencia de unos determinados SNPs que ya conocían. Así, un conjunto de los haplotipos hallados se encontró compartido en los individuos de ojos azules que se analizaron en el estudio. En ellos había un fragmento de 166 Kb entre el gen OCA2 y el HERC2, relacionado con un elemento regulador inhibitorio. El hecho de que personas de ojos azules compartiesen de forma perfecta este fragmento, incluso teniendo diferentes haplotipos (divididos en *h-1*, *h-2*, *h-3* y *h-4*), sugería que el fenotipo de color azul tuvo su origen en la mutación de un “fundador” (un antepasado común). Además el haplotipo *h-1* lo compartía el 97% de los individuos analizados, siete de ellos de origen mediterráneo y sin ser familiares, lo cual indicaba que dicho haplotipo era idéntico en gente de ojos azules de otras poblaciones. Mediante rastreo, llegaron a estimar que este fundador con ojos azules pudo existir hace unos 10.000-6000 años. Como ya se ha dicho, se propusieron varios SNPs dentro de esta región como candidatos a que hubiesen sido la secuencia mutada, entre ellos el llamado “rs12913832”, que daba lugar a un elemento inhibidor de OCA2, produciendo el azul de los ojos. Se cree que el color de los ojos azules remonta sus orígenes a la región noroeste del Mar Negro. La alta frecuencia actual de individuos con ojos azules en las áreas bálticas y provincias escandinavas indican una selección positiva de este color de ojos, que puede deberse, según las hipótesis, a una selección de los caracteres pigmentarios en los que hay varios factores que influyen, como la exposición a rayos UV, que causan cáncer de piel, o deficiencia de vitamina D, y también ha sido propuesta una supuesta selección sexual. Aun así, en el resto de áreas no parece haber una selección positiva de este carácter.

Anexo III- Tablas estratigráficas que pueden servir de ayuda a los docentes

Tabla geológica

ERA	PERÍODO	ESPECIES	ESTADIO EVOLUTIVO	
4.600	Arcaico		No existe la vida en la Tierra; erupciones volcánicas; la lluvia enfría la superficie del planeta; formación de los océanos	00:00
3.800	PROTOZOICA		Metanogénes (procarióticos); cianobacterias; presencia de oxígeno en el aire	04:00
2.500			Células complejas (eucariotas)	15:00
850	Criogénico		Tierra helada	
635	Ediacárico		Criaturas pluricelulares	20:50
488	Cámbrico		Conchas, huesos y dientes	
443	Ordovícico		Vertebrados	21:50
416	Silúrico		Plantas terrestres primitivas; gusanos	
359	Devónico		Peces óseos; tetrápodos	
299	Carbonífero		Anfibios; reptiles; bosques; moscas	
251	Pérmico		Reptiles medio mamíferos; Pangea	22:50
199	Triásico		Primeros dinosaurios; pequeños mamíferos; ictiosaurios	
145	Jurásico		Los dinosaurios dominan la Tierra; los pterodáctilos dominan los cielos	
65.5	Cretácico		Últimos dinosaurios; insectos sociales; flores; pájaros; monocotiledóneas	23:40
55	CENOZOICA	Paleoceno	Los mamíferos aumentan de tamaño	
33		Eoceno	Las ballenas regresan al océano	
23		Oligoceno	Evolución de los caballos en América	
5		Mioceno	Migraciones de los simios	
1.8		Plioceno	Primeros seres bípedos y primeros humanos	23:57
0.11	HISTÓRICA	Pleistoceno	Extinciones de megafauna	23:59
0.02		Holoceno	Origen de la agricultura y la ganadería; primeras civilizaciones humanas	
hoy		Antropoceno	Globalización; incremento de los niveles de CO ₂	24:00

Millones de años atrás

Reloj de 24 horas

20:48:00

Fuente: <http://historiaybiografias.com/tierra/>



CUADRO ESTRATIGRAFICO INTERNACIONAL

Comisión Internacional para la Estratigrafía

Fanerozoico				Eonothem Eon
Mesozoico		Cenozoico		Erathem Era
Cretácico		Paleógeno	Neogeno	Sistema Periodo
Inferior	Superior	Paleoceno	Holoceno	Serie Epoca
			Pleistoceno	Piso
Inferior	Superior	Eoceno	Superior	Edad Ma
			Medio	GSSP
Inferior	Superior	Paleoceno	Medio	0,0115
			Inferior	0,126
Inferior	Superior	Eoceno	Medio	0,781
			Inferior	1,806
Inferior	Superior	Paleoceno	Gelasiano	2,588
			Piacenziano	3,600
Inferior	Superior	Eoceno	Zancleano	5,332
			Messiniano	7,246
Inferior	Superior	Paleoceno	Tortoniano	11,608
			Serravalliano	13,65
Inferior	Superior	Eoceno	Burdigaliano	15,97
			Aquitaniano	20,43
Inferior	Superior	Paleoceno	Chatthano	23,03
			Rupeliano	28,4 ±0,1
Inferior	Superior	Eoceno	Praboniano	33,9 ±0,1
			Bartoniano	37,2 ±0,1
Inferior	Superior	Paleoceno	Lutetiano	40,4 ±0,2
			Ypresiano	48,6 ±0,2
Inferior	Superior	Eoceno	Thanetiano	55,8 ±0,2
			Selandiano	61,7 ±0,2
Inferior	Superior	Paleoceno	Daniano	65,5 ±0,3
			Maastrichtiano	70,6 ±0,6
Inferior	Superior	Eoceno	Campañiano	83,5 ±0,7
			Santoniano	85,8 ±0,7
Inferior	Superior	Paleoceno	Coniaciano	89,3 ±1,0
			Turoniano	93,5 ±0,8
Inferior	Superior	Eoceno	Cenomaniano	99,6 ±0,9
			Albiano	112,0 ±1,0
Inferior	Superior	Paleoceno	Apilano	125,0 ±1,0
			Barrémiano	130,0 ±1,5
Inferior	Superior	Eoceno	Hauteriviense	136,4 ±2,0
			Valanginiense	140,2 ±3,0
Inferior	Superior	Paleoceno	Berriasiense	145,5 ±4,0

Fanerozoico				Eonothem Eon	
Paleozoico		Mesozoico		Erathem Era	
Carbonífero		Triásico	Jurásico	Sistema Periodo	
Missis-sippiano	Penn-silvaniano	Inferior	Superior	Tioniano	Serie Epoca
				Kimmeridgiense	Piso
Inferior	Medio	Inferior	Superior	Edad Ma	
			Oxfordiense	GSSP	
Inferior	Medio	Inferior	Caloviense	145,5 ±4,0	
			Batoniense	150,8 ±4,0	
Inferior	Medio	Inferior	Bajociano	155,0 ±4,0	
			Aaleniano	161,2 ±4,0	
Inferior	Medio	Inferior	Toarciense	161,2 ±4,0	
			Pleniabasiense	164,7 ±4,0	
Inferior	Medio	Inferior	Sinemuriense	167,7 ±3,5	
			Hettangiense	171,6 ±3,0	
Inferior	Medio	Inferior	Rético	175,6 ±2,0	
			Nórico	183,0 ±1,5	
Inferior	Medio	Inferior	Ladiniano	189,6 ±1,5	
			Artísico	196,5 ±1,0	
Inferior	Medio	Inferior	Olenekiano	199,6 ±0,6	
			Induano	203,6 ±1,5	
Inferior	Medio	Inferior	Changshingiano	216,5 ±2,0	
			Wuchiapingiano	228,0 ±2,0	
Inferior	Medio	Inferior	Capitaniano	237,0 ±2,0	
			Wordiano	245,0 ±1,5	
Inferior	Medio	Inferior	Roadriano	249,7 ±0,7	
			Kunguriano	251,0 ±0,4	
Inferior	Medio	Inferior	Artinskiano	253,8 ±0,7	
			Sakmariano	260,4 ±0,7	
Inferior	Medio	Inferior	Asseliano	265,8 ±0,7	
			Gzheliano	268,0 ±0,7	
Inferior	Medio	Inferior	Kasimoviano	270,6 ±0,7	
			Moscoviense	275,6 ±0,7	
Inferior	Medio	Inferior	Bashkiriano	284,4 ±0,7	
			Viséano	294,6 ±0,8	
Inferior	Medio	Inferior	Asseliano	299,0 ±0,8	
			Kasimoviano	303,9 ±0,9	
Inferior	Medio	Inferior	Bashkiriano	306,5 ±1,0	
			Viséano	311,7 ±1,1	
Inferior	Medio	Inferior	Tournaisiano	318,1 ±1,3	
			Ypresiano	326,4 ±1,6	
Inferior	Medio	Inferior	Ypresiano	345,3 ±2,1	
			Chalkiano	352,2 ±2,5	

Fanerozoico				Eonothem Eon	
Paleozoico		Mesozoico		Erathem Era	
Cámbrico		Ordovícico	Devónico	Sistema Periodo	
Inferior	Medio	Superior	Superior	Famenniano	Serie Epoca
				Frasniano	Piso
Inferior	Medio	Superior	Medio	Edad Ma	
			Givetiano	GSSP	
Inferior	Medio	Superior	Eifeliano	359,2 ±2,5	
			Erismiano	374,5 ±2,6	
Inferior	Medio	Superior	Pragianio	385,3 ±2,6	
			Lochkoviano	391,8 ±2,7	
Inferior	Medio	Superior	Lochkoviano	397,5 ±2,7	
			Pragianio	407,0 ±2,8	
Inferior	Medio	Superior	Lochkoviano	411,2 ±2,8	
			Pragianio	416,0 ±2,8	
Inferior	Medio	Superior	Ludfordiano	418,7 ±2,7	
			Gorstiano	421,3 ±2,6	
Inferior	Medio	Superior	Wenlock	422,9 ±2,5	
			Sheinwoodiano	428,2 ±2,3	
Inferior	Medio	Superior	Telychiano	436,0 ±1,9	
			Aeroniano	439,0 ±1,8	
Inferior	Medio	Superior	Rhuddaniense	443,7 ±1,5	
			Hirnantiano	445,6 ±1,5	
Inferior	Medio	Superior	Darriwiliano	455,8 ±1,6	
			Frasniano	460,9 ±1,6	
Inferior	Medio	Superior	Frasniano	468,1 ±1,6	
			Pabliano	471,8 ±1,6	
Inferior	Medio	Superior	Tremadociano	478,6 ±1,7	
			Pabliano	488,3 ±1,7	
Inferior	Medio	Superior	Pabliano	501,0 ±2,0	
			Pabliano	513,0 ±2,0	
Inferior	Medio	Superior	Pabliano	542,0 ±1,0	
			Pabliano		

Precámbrico				Eonothem Eon	
Arqueano		Proterozoico		Erathem Era	
Euarqueano		Paleo-proterozoico		Sistema Periodo	
Euarqueano	Paleo-proterozoico	Euarqueano	Edicariano	Edicariano	Serie Epoca
				Cryogeniano	Piso
Euarqueano	Paleo-proterozoico	Euarqueano	Medio	Age Ma	
			Toniano	GSSP	
Euarqueano	Paleo-proterozoico	Euarqueano	Sideriano	542	
			Orosiriano	600	
Euarqueano	Paleo-proterozoico	Euarqueano	Calymniense	880	
			Statheriano	1000	
Euarqueano	Paleo-proterozoico	Euarqueano	Eclatiano	1200	
			Calymniense	1400	
Euarqueano	Paleo-proterozoico	Euarqueano	Statheriano	1600	
			Orosiriano	1800	
Euarqueano	Paleo-proterozoico	Euarqueano	Rhyaciense	2050	
			Sideriano	2300	
Euarqueano	Paleo-proterozoico	Euarqueano	Neoproterozoico	2500	
			Neoproterozoico	2800	
Euarqueano	Paleo-proterozoico	Euarqueano	Mesoproterozoico	3200	
			Paleoproterozoico	3600	
Euarqueano	Paleo-proterozoico	Euarqueano	Arqueano	3600	
			Arqueano		

Las subdivisiones del registro geológico global se definen formalmente por su límite inferior. La base de cada unidad del intervalo fanerozoico (<542 Ma) y del Edicariano se define mediante un Punto y Sección Global Estándar (GSSP, en inglés), mientras que el intervalo Precámbrico se subdivide por edad absoluta o Edad Estratigráfica Global Estándar (GSSA).

Este cuadro da tanto una visión de las unidades conoestratigráficas internacionales como de su rango, nombres y estatus formal. Han sido aprobadas por la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS) y ratificadas por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS).

Los GSSP en que se ha acordado un estrato tipo se han marcado en el cuadro con una "estaca dorada" y en terreno, con una placa. Las GSSA, en cambio, son edades abstractas sin referencias a un nivel específico en una sección litológica. En el sitio www.stratigraphy.org se suben regularmente descripciones de los GSSP y GSSA.

Se asignarán nombres formales a algunos pisos del Ordovícico y Cámbrico cuando se logre un acuerdo internacional respecto a sus límites GSSP. La mayoría de los límites intra-piso (e.g. AptianMedio y Superior) no han sido definidos formalmente. Las edades numéricas de los límites entre unidades de la escala son las de "Una escala geológica del tiempo 2004 de Gradstein, Ogg, Smith, et al." (Cambridge University Press) y están sujetas a revisión. Los colores siguen a los acordados por la Comisión para el Mapa Geológico del Mundo (www.cgmw.org).

Fuente: <http://capellan.es.tl/galeria/pic-5.htm>