

12. Teorías de la evolución y de la herencia. Problemas a la hora de su enseñanza y cuestiones bioéticas

La teoría de la evolución es el pilar central de la biología y es esencial para comprender los fenómenos biológicos. La evolución, como concepto, ha sido históricamente objeto de grandes controversias, críticas e interpretaciones. Diversos estudios en la enseñanza de la biología han señalado preconcepciones específicas de los estudiantes que dificultan la comprensión de la evolución. Por ello, su enseñanza requiere tanto una alta capacidad de síntesis como la habilidad de establecer relaciones por parte del docente, además de fomentar en el estudiante un profundo interés por su relevancia.

Aunque en la enseñanza del paradigma evolutivo suele adoptarse una aproximación histórica, esta no debe limitarse a la simple presentación de biografías ni a la memorización de teorías, nombres de científicos o conceptos aislados. Ideas clave como las de Azara, Lamarck, Wallace, Darwin, Margulis y Gould son esenciales en el aprendizaje de la evolución, pero sus aportaciones deben complementarse con el debate crítico. Asimismo, la comprensión del tema y la conexión con los conocimientos previos de los alumnos dependen de la edad y el nivel educativo, condicionando la profundidad y el enfoque.

En la asignatura de Biología y Geología de cuarto curso de ESO se incorpora el tema de la evolución a los contenidos comunes en el bloque de «genética y evolución». En este bloque se estudian también las leyes y los mecanismos de herencia genética, la expresión génica, la estructura del ADN, las teorías evolutivas más relevantes y la resolución de problemas donde se apliquen estos conocimientos.

Como contenidos más detallados tenemos el análisis del proceso evolutivo de una o más características concretas de una especie determinada a la luz de la teoría neodarwinista y de otras teorías con relevancia histórica (reducido al

lamarckismo y darwinismo); la comprensión del hecho evolutivo, estudio y valoración de los mecanismos de evolución; y, por último, la evolución humana y el proceso de hominización. La legislación también impone unos criterios para la evaluación del aprendizaje de los conocimientos relacionados con la evolución. Los de 4º de la ESO apoyan la memorización de teorías en detrimento de la formación de conexiones y razonamientos elaborados sobre la evolución que ayuden a una mejor comprensión.

Para abordar estos contenidos planteamos aquí un recorrido histórico en el que pondremos de relieve cómo la ciencia es una labor colectiva, interdisciplinar y en continua construcción. Nuestro objetivo es la formación de conexiones y razonamientos elaborados sobre la evolución que ayuden a una mejor comprensión. Marcaremos con precisión los momentos de cambio de paradigma, ahondando en los conflictos, también trabajaremos la cuestión de la prioridad del descubrimiento en ciencia y cómo se comunicaron estos avances. Por último, analizaremos el impacto social y los problemas de comprensión que la teoría de la evolución plantea a los estudiantes y a la sociedad en la actualidad.

12.1. Antecedentes del evolucionismo

Los antecedentes más remotos de la teoría de la evolución cabe localizarlos en el siglo XVIII. Fueron un grupo de científicos que no eran evolucionistas en sentido estricto, pero que no seguían el patrón inmovilista o estable. El primero de estos protoevolucionistas que vamos a tratar es el conde de Buffon, intendente del Jardín del Rey de París, que como vimos en el capítulo sobre la Ilustración siguió en el sentido más estricto la antigua idea de la escala natural de Aristóteles, aunque reconocía que podían existir cambios. Para Buffon hay direccionalidad ascendente y progresiva, de mayor complejidad y que, por supuesto, tiene al ser humano al final de ese proceso. Pero en 1776 publicó un ensayo en el que introducía el concepto de «evolución regresiva» de los animales en función de los factores ambientales, que influye en que ciertos animales deriven a formas degeneradas.

En su libro *Las épocas de la naturaleza* dividió el tiempo en siete periodos, todos estos procesos históricos a los que se refería son secuenciales y culminan en el momento de la creación del hombre, pero introduce una cuestión cronológica o temporal, con el concepto de las épocas de la naturaleza. Introdujo la idea de tiempo geológico y marcó el carácter histórico del proceso de la formación de la vida.

12.1.1. Los trabajos de Félix de Azara en la América Meridional

Félix de Azara (1746-1811), marino, astrónomo y geógrafo español, fue un pionero en el estudio de las concepciones filogenéticas y del mutacionismo (figura 49). En el contexto de sus trabajos geográficos para delimitar las fronteras entre las posesiones españolas y portuguesas en América, fue enviado a las tierras que hoy conforman Paraguay, donde permaneció durante una larga estancia. En sus estudios de campo abordó el análisis de la fauna más allá de la zoología sistemática, destacándose como un naturalista de gran pericia y capacidad de observación. Su aguda mirada le permitió reconocer la naturaleza dinámica del conjunto de los seres vivos.

Azara, basándose en sus observaciones, discrepó de la obra de Buffon en aspectos como la influencia de las condiciones ambientales. En su lugar, enfatizó el papel de las variaciones registradas, como el color del pelaje, la existencia de vacas enanas o el albinismo en animales y seres humanos, atribuyendo estos cambios a una naturaleza interna. En 1809, publicó *Viajes por la América Meridional*, donde documenta múltiples casos de animales singulares:

...1770 nació un toro mocho o sin cuernos, cuya raza se ha multiplicado mucho. Debe observarse que los individuos procedentes de un toro sin cuernos carecen de ellos, aunque la madre los tenga, y que si el padre tiene cuernos los descendientes los tendrán también, aunque la madre no los tenga²⁹⁴.

En la obra de Azara se observa que esos individuos singulares, producidos ocasionalmente por la naturaleza de manera accidental, pueden perpetuarse del mismo modo que los demás, sin que ello dependa del ambiente:

Yo he hecho en estas regiones algunas observaciones sobre los cambios de color que se ven algunas veces en los hombres, los cuadrúpedos y las aves. Me parecen probar que la causa que las produce es accidental, pasajera, y que el principio reside en las madres; que no altera ni las formas ni las proporciones y que no disminuye la fecundidad; que sus efectos se perpetúan y que no dependen de los climas²⁹⁵.

²⁹⁴ Félix de Azara [Francisco de las Barras de Aragón], *Viajes por la América Meridional*, Tomo I. (Madrid: Espasa-Calpe, 1941), 312.

²⁹⁵ Azara. *Viajes por la América Meridional*, Tomo I: 310.

Con respecto a las aves también señaló el hecho de la presencia de especies con gran abundancia y otras con escasa presencia, en las mismas condiciones ambientales:

Debe causar admiración ver algunas especies muy multiplicadas, mientras que otras lo están tan poco que yo no he encontrado más que uno o dos individuos de algunas de ellas. La admiración aumentará si se considera que otras especies que tienen mucha relación con ellas y que son de la misma familia están muy multiplicadas; que las unas y las otras gozan de la misma libertad, del mismo clima y los mismos alimentos; que tienen las mismas proporciones, y que no se ha observado ninguna ración de diferencia vida en su fecundidad ni en la duración de su vida²⁹⁶.



Figura 49. A la izquierda, el resultado de la misión cartográfica de Azara al Paraguay. Fuente: Europeana; en el centro, la portada de la publicación sobre *Viajes por la América Meridional* editada en Francia en 1809; y a la derecha, retrato de Azara realizado por Francisco de Goya. Fuente: cortesía de la Colección Ibercaja – Museo Camón Aznar.

Azara admitió las creaciones separadas y distanciadas en el tiempo y en el espacio, pero no precedidas de ningún cataclismo o evento. En cuanto al impacto de su obra, cabe destacar que fue citada por Darwin tanto en el *Diario del viaje de un naturalista alrededor del mundo* como en *El origen de las especies*. Sin embargo, algunos historiadores han señalado que no se le ha reconocido como uno de los precursores del darwinismo. La cuestión principal es que Azara fue más allá de plantear el evolucionismo, y sus ideas sobre la mutación no fueron retomadas por Darwin ni por otros autores posteriores.

²⁹⁶ Azara, *Viajes por la América Meridional*, Tomo I: 317.

Algunos han querido presentarlo como el primer evolucionista español, aunque lo que realmente hace es reflejar que el patrón de las especies es cambiante. Además, su interés no se limitó a los animales autóctonos, sino que también estudió los domésticos y los llamados cimarrones. Su ensayo *Historia natural de los cuadrúpedos* tuvo gran éxito y fue editado y traducido al francés en 1801.

12.2. Los trabajos del caballero de Lamarck

El sistemático, botánico y filósofo de la naturaleza, Jean Baptiste de Monet de Lamarck, (1744-1829) fue encargado, tras la fundación del Museo de Historia Natural de París en 1793, de clasificar las colecciones de animales inferiores²⁹⁷. Los textos en los que fue desarrollando su teoría fueron: *Recherches sur l'organisation des corps vivants* (1802), *Philosophie zoologique* (1809) e *Histoire naturelle des animaux sans vertèbres* 1815-1822.

En el primero de los textos explica ya su teoría:

No son los órganos, es decir la naturaleza y la forma de las partes del cuerpo de un animal, los que dan lugar a sus hábitos y a sus facultades particulares; sino que, al contrario, son sus hábitos, su forma de vivir y las circunstancias en las que se encuentran los individuos de los que proviene, los que, con el tiempo, han constituido la forma de su cuerpo, el número y el estado de sus órganos, por último, las facultades de las que disfruta²⁹⁸.

Ese estudio y clasificación culminó con *Histoire naturelle des animaux sans vertèbres*, con sus primeras especulaciones evolucionistas intentando explicar los distintos niveles de complejidad de los invertebrados y su relación con restos fósiles.

Lamarck tropezó con grandes dificultades para separar las diversas especies, dificultades que se hallan probablemente en el origen su teoría. Partidario, hasta aquel momento, del fijismo de las especies, Lamarck adoptó una concepción evolucionista que desarrolló en su obra *Philosophie zoologique* (1809). Para Lamarck, la idea de evolución consistió en convertir la jerar-

²⁹⁷ Tras la Revolución francesa, la Convención fundó el Museo de Historia Natural.

²⁹⁸ Jean Baptiste de Lamarck, *Recherches sur l'organisation des corps vivants* (París: Maillard, 1802), 50.

quía clasificatoria biológica en una serie jerárquica ordenada en el tiempo, lo que dependía de la existencia de un «principio creativo» o impulso interno hacia la perfección que daría una respuesta del organismo a un cambio de ambiente o de hábito, dicho impulso tendría la capacidad de transformar una vez que los resultados alcanzados se transmitan de padres a hijos.

Esa capacidad del organismo de adaptación la ilustró Lamarck con una serie de ejemplos:

- El ave que es atraída al agua por la necesidad de encontrar alimento separa los dedos para nadar; la piel toma el hábito de extenderse, y así se forma, por transmisión de los efectos del ejercicio repetido durante numerosas generaciones, la palma de las aves acuáticas.
- La jirafa, obligada a comer las hojas de los árboles, se esfuerza por alcanzarlas; este hábito existe desde hace mucho tiempo en todos los individuos de la especie, y ha acarreado modificaciones útiles de la forma; las piernas delanteras se han hecho más largas que las traseras, y el cuello se ha alargado lo suficiente para alcanzar ramas de seis metros de altura.

Lamarck expresó la siguiente conclusión en su obra *Philosophie zoologique*:

La naturaleza, al producir sucesivamente todas las especies de animales y comenzando por las más imperfectas o las más simples para culminar su obra con las más perfectas, ha ido complicando gradualmente su organización. Estos animales, al dispersarse generalmente por todas las regiones habitables del globo, cada especie ha recibido la influencia de las circunstancias en las que se encuentra. Esto supone además que las circunstancias de los lugares habitados por cada especie de animal han contribuido a su desarrollo y modificaciones²⁹⁹.

Propuso que, en los animales, los órganos se fortalecen o se debilitan según su uso, y este grado de utilización es transmitido a los descendientes de una generación a la siguiente. Lo justificaba por la acción de fluidos. Lamarck, dejando atrás las ideas vitalistas del siglo XVIII, creyó que la vida era una fun-

²⁹⁹ Jean Baptiste de Lamarck, *Philosophie zoologique, ou Exposition des considérations relatives à l'histoire naturelle des animaux. Tome 1* (París: Dentu, 1809), 266.

ción del movimiento de fluidos ponderables (fluidos corporales) dentro de las partes sólidas que forman parte de un cuerpo organizado³⁰⁰.

El lamarckismo no provocó entusiasmos; sus propuestas fueron, sobre todo, ahogadas por el prestigio y las críticas de Cuvier. Pese a las críticas pretéritas o actuales que se le pueda hacer a la teoría evolutiva de Lamarck y a su concepción de los caracteres adquiridos heredables, no hay duda de que significó un importante avance en el camino hacia el evolucionismo moderno. Hemos de recordar que las teorías aparecen encuadradas en un marco conceptual (lo que Kuhn denominó «paradigma»), que permite la construcción de nuevas interpretaciones y hallazgos. La acumulación de observaciones permite la contrastación del marco de explicación general y eso ocurrió poco tiempo después con las evidencias recolectadas por Darwin y Wallace. Darwin se vio forzado a publicar su teoría del origen de las especies a toda prisa tras la llegada de una carta escrita por Wallace, un científico casi desconocido, pero que había llegado a sus mismas conclusiones.

12.3. La teoría de la evolución por selección natural: los trabajos de Darwin y Wallace

Es interesante cómo a finales del siglo XVIII empezó a haber personas que pusieron en cuestión el paradigma fijo, inmutable y estable que era el habitual hasta el momento.

El abuelo de Charles Darwin, Erasmus Darwin, fue autor de *la Zoonomia, or the laws of organic life* (Zoonomía, o las leyes de la vida orgánica) (2 vols., Londres, 1794-1796), obra en la que presentaba una mezcla de juiciosas concepciones teóricas y sueños metafísicos, no sin analogía con los trabajos de Lamarck. En este libro, a pesar de tener un carácter no científico, más bien ensayo lírico, planteaba que todos los seres se habían formado a partir de un rudimentario que llamó «filamento orgánico» y, cómo con el tiempo ese organismo primigenio iba desarrollando y perfeccionando de generación en generación. No consistía en una aportación científica, pero presentaba una concepción dinámica del proceso, de la naturaleza y de las especies que pueblan el mundo.

³⁰⁰ J. Humphreys, «Lamarck and the general theory of evolution», *Journal of Biological Education* 30 n.º 4 (1996): 295-303.

Bajo las olas sin orilla, la vida orgánica nació y se crió en los abismos del océano haciéndose primero muy pequeños, invisibles con la lente curva, moviéndose en el fango o cruzando la masa de agua. Luego, a lo largo de las generaciones sucesivas, sus aptitudes se diversifican, sus miembros se desarrollan, dando origen a grupos innumerables de vegetales, a reinos que respiran y que tienen aletas, pies y alas³⁰¹.

Estas ideas evolucionistas o transformistas se generalizaron en la primera mitad de siglo XIX. Prueba de ello es el libro de Robert Chambers que en *Vestigios de la historia natural de la Creación* planteó puntos de vista convergentes con el pensamiento lamarckiano.

Lo que interesa es que, en este libro, que en primera instancia se publicó de forma anónima, la idea de transformación en el conjunto de la naturaleza empezó a ser expuesta al gran público y comenzó a ser reconocida entre grandes grupos de la sociedad. Cuando Darwin publicó su teoría ya existía un clima de debate previo, primero entre los naturalistas, pero después generalizado en capas más amplias de la población.

Pero en todo caso, tanto en el pensamiento de Chambers como en el de Lamarck, la evolución tiene una dirección y llega al ser humano como culmen del proceso, la aparición del ser humano sobre la tierra y el control que este puede ejercer sobre la naturaleza. Esos son los conceptos que en 1844 había encima de la mesa, antes de la aparición de Darwin el cambio de paradigma del fijismo al evolucionismo estaba en el debate, pero sin poner en duda su carácter teleológico, es decir, teniendo al ser humano en la cúspide del proceso.

12.3.1. El viaje de Darwin en el Beagle

Darwin es, probablemente junto a Mendel, uno de los últimos científicos no profesionales, en el sentido de no estar vinculado a ninguna institución de investigación o académica, sino un personaje que investiga por su cuenta. En el caso de Darwin, no tiene necesidad de trabajar, no se trata de un aristócrata, pero es una persona muy rica por herencia, hijo de un afamado médico, nieto de Erasmus Darwin y nieto de un fabricante de cerámicas. Debido a sus inclinaciones y curiosidad por la naturaleza, comenzó a colaborar con profesores

³⁰¹ Erasmus Darwin, *The Temple of Nature or The Origin of Society: A Poem, with Philosophical Notes* (London: J. Johnson, St. Paul's Churchyard, 1803).

vinculados a las ciencias naturales como su mentor, el botánico Henslow³⁰² o el geólogo Lyell. Se formó como naturalista adquiriendo un cierto reconocimiento.

A los 22 años, tras sus estudios en Cambridge, se embarcó en el *HMS Beagle*, por consejo de Henslow. De este recibió una invitación a participar en este viaje de un barco de la Armada británica que tenía la misión de circunnavegar el mundo para completar observaciones cartográficas con vistas a mejorar la navegación y el conocimiento de las tierras australes. En una carta Henslow informaba de esta manera al joven Darwin:

He dicho que le considero a usted la persona mejor cualificada que conozco para llevar a cabo semejante tarea, y no lo digo suponiendo que usted sea un naturalista consumado, sino por estar ampliamente cualificado para recoger, observar y anotar cualquier cosa digna de mención en historia natural... El viaje durará dos años y, si lleva muchos libros, podrá hacer lo que quiera. Tendrá muchas oportunidades a su disposición³⁰³.

Dotado de un extraordinario talento de observador, Darwin quedó asombrado, durante aquel viaje alrededor del mundo, por cierto número de hechos: comprobó, al viajar de norte a sur, una sustitución de las especies afines; observó la diversidad y el endemismo de las diferentes islas Galápagos, así como el parentesco de las poblaciones de América del Sur con las de las islas próximas a dicho continente; observó los lazos de parentesco entre los mamíferos desdentados vivos y los de las especies extinguidas de los estratos de las Pampas.

El *Beagle* exploró América del Sur y varias islas del Pacífico durante un viaje que se extendió cinco años (1831-1836), influyendo de manera decisiva en las ideas de Charles Darwin. A su regreso a Inglaterra, se dedicó al estudio de las colecciones que había reunido durante la expedición y llevó a cabo un intenso trabajo de gabinete.

Compiló todas sus anotaciones y analizó la información de forma sistemática. Como resultado de esta labor, publicó el *Journal of Researches into the Geology and Natural History of the Various Countries Visited by H.M.S. Beagle*.

³⁰² John Stevens Henslow (1796-1861) fue un naturalista, botánico y geólogo inglés en la Universidad de Cambridge.

³⁰³ *Darwin Correspondence Project*, «Letter no. 105», consultado el 18-8-2024, <https://www.darwinproject.ac.uk/letter/?docId=letters/DCP-LETT-105.xml>

gle, cuya edición independiente apareció en 1844. En esta obra, de carácter más científico y detallado, incluyó observaciones geológicas e históricas sobre la naturaleza, en contraste con el diario de viaje, que tenía un tono más divulgativo, cercano a la literatura de aventuras.

A su regreso a Inglaterra, Darwin se instaló en Cambridge y Londres, y comenzó a trabajar en geología, vinculado a la Sociedad Geológica de Londres. Entre 1836 y 1840 publicó en los *Proceedings* y *Transactions de la Geological Society* estudios sobre la geología sudamericana: el levantamiento de las costas de Chile, la fauna fósil argentina, levantamientos y hundimientos en el Pacífico e Índico, los atolones y arrecifes coralinos. Compendió todos estos trabajos en *Geological observations of South America* (1846). Además del diario de 1844, publicó otras obras específicas sobre atolones del Pacífico. *On the distribution of coral reefs with reference to the theory of their formation* (1842) apoyando las teorías de su amigo Lyell.

Al mismo tiempo que ganó prestigio en sus investigaciones de Geología, comenzó a trabajar sobre los materiales zoológicos recopilados en el *Beagle* y remitidos a la *Zoological Society* y al *British Museum*.

En sus trabajos, describió nuevas especies y certificó la presencia de diversos tipos de pinzones en las Galápagos relacionándolos cada uno con un entorno geográfico distinto. Aunque solía ser un coleccionista cuidadoso, por desgracia se perdió algunas claves importantes en las islas Galápagos, en donde sin prestar suficiente atención a los habitantes, no se enteró de que las tortugas de cada isla se podían distinguir por la forma de su caparazón.

Interesa destacar que, fruto del viaje, tres fenómenos llamaron la atención de Darwin y marcaron su estudio posterior:

- Se preguntó por los restos fósiles de animales gigantes semejantes a armadillos.
- Cayó en la cuenta de la progresiva sustitución de animales semejantes en sentido norte-sur en América.
- El carácter continental de la fauna de las Galápagos y las adaptaciones particulares en cada isla.

De forma que, a partir de 1837, comenzó a realizar anotaciones sistemáticas y reflexiones sobre la transmutación de especies. Concibió entonces estas no como una entidad fija, resultado de una creación arbitraria, sino como entidad que se diversifica progresivamente, sobre todo en medios aislados. Así queda-

ba formulada la hipótesis de una evolución gradual de las formas animales; buscó entonces el posible mecanismo de dicha evolución.

Simultáneamente, trabajó sobre la obra de su abuelo y prestó atención a los animales domésticos y plantas cultivadas. Encontró que la variabilidad en animales domésticos y plantas cultivadas era indudable, y comprendió la importancia de estas variaciones, y Darwin vio todos los beneficios que sabían obtener de ellas los ganaderos y agricultores gracias a la selección artificial, es decir, mediante la rigurosa elección de los progenitores. Para analizar mejor las variaciones, él mismo se dedicó a criar tórtolas.

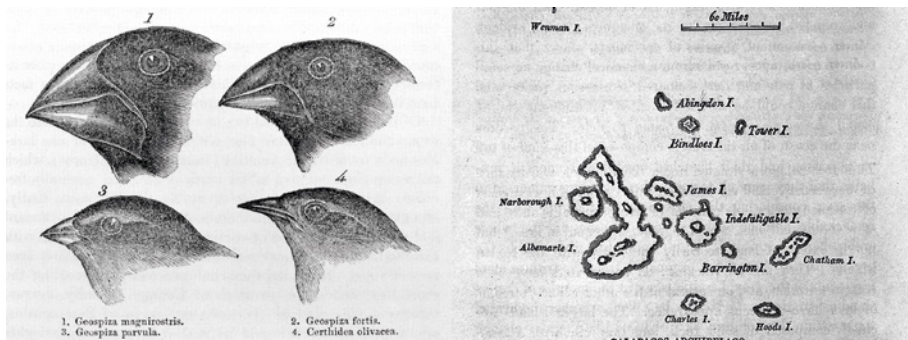


Figura 50. Extractos del *Diario de investigaciones sobre la geología y la historia natural de los diversos países visitados por el H.M.S. Beagle... desde 1832-6* / Charles Darwin. Fuente: Wellcome Collection.

En 1837 leyó el *Essay on the principle of population* (Ensayo sobre el principio de la población) de Thomas Malthus³⁰⁴. Inspirado por el libro concluyó que hay un proceso de competencia entre seres vivos, al que denominó selección natural. En 1842 resumió sus puntos de vista en un resumen inédito de 35 páginas y en 1844 redactó un ensayo, de 230 páginas, también inédito. Circularon entre un selecto grupo de naturalistas (Lyell y Hooker). Lyell insistió a Darwin en que debía publicar su trabajo.

Mientras Darwin esperaba para publicar sus ideas, el problema de las especies se convirtió en tema de un feroz debate público. *Vestiges of the Natural*

³⁰⁴ La tesis defendida por Malthus sobre la población sostenía que todas las visiones utópicas de las sociedades futuras eran inviables, ya que los defectos de la naturaleza humana constituían la raíz de los principales problemas. Defendió que la capacidad reproductiva de los seres humanos superaba de manera universal el suministro de alimentos, lo que generaba una feroz competencia por los recursos esenciales para la vida.

History of Creation (Vestigios de la historia natural de la creación), del periodista Robert Chambers, publicado en 1844, trasladó la discusión sobre la evolución de las salas de disección médica y la prensa librepensadora radical a los hogares victorianos. Se sugería que una ley de desarrollo podría explicarlo todo, desde los orígenes del sistema solar hasta la mente humana.

12.3.2. La biogeografía de Wallace

Alfred Wallace fue un hábil colector que hacía de ello su medio de supervivencia, partió hacia el Amazonas el 26 de abril de 1848 pensando ya en términos evolucionistas. Lo había adquirido a partir de la lectura de dos libros que consideró fundamentales en el desarrollo de sus ideas, entre ellos: *Vestigios de la historia natural de la creación*, de Chambers, de él tomó sobre todo la idea del desarrollo progresivo de las especies³⁰⁵, y el otro fue los *Principios* de Lyell, cuya geología uniformista le impresionó, haciéndole imaginar la posibilidad de que existieran fuerzas físicas generales que provocasen cambios biológicos progresivos; unas fuerzas que actuaran constantemente y que fueran observables y verificables.

Wallace ha sido considerado como uno de los pioneros de la biogeografía, destacando por sus aportes al estudio de la relación entre la diversidad natural y la geografía. Durante sus expediciones identificó límites geográficos que condicionan la distribución de las especies, lo que plasmó en su artículo *Sobre los monos del Amazonas*. Allí planteó preguntas clave sobre los fenómenos físicos que definen estos límites, el papel de las líneas isotérmicas en la distribución de especies y por qué algunas barreras naturales, como ríos o montañas, delimitan especies mientras otras no³⁰⁶.

Tras explorar el Amazonas entre 1848 y 1852, y sobrevivir a un naufragio que le hizo perder especímenes, Wallace emprendió un viaje por Malasia e Indonesia (1854-1862), donde recolectó 125.000 especímenes, muchos desconocidos para la ciencia europea. Observó una marcada diferencia entre la

³⁰⁵ De Chambers recogió sobre todo dos aspectos: que la idea de la evolución consiste en una sucesión progresiva de formas animales y el recurso de las leyes de Newton y Laplace, algo que encajaba perfectamente en el pensamiento de Wallace. Si el mundo de la materia inerte funciona según leyes naturales parece lógico pensar que también lo haga la materia animada, incluyendo la creación de nuevas especies. Ver en: José Fonfría. *El explorador de la evolución Wallace* (Nivola libros y ediciones, S.L. 2003).

³⁰⁶ Fonfría, *El explorador de la evolución Wallace*, 177.

fauna de origen asiático y australiano, lo que lo llevó a definir la línea de Wallace, que divide ambas regiones zoológicas (figura 51). Sus estudios demostraron contrastes significativos, como la abundancia de marsupiales en Australia frente a su ausencia total en la parte asiática.

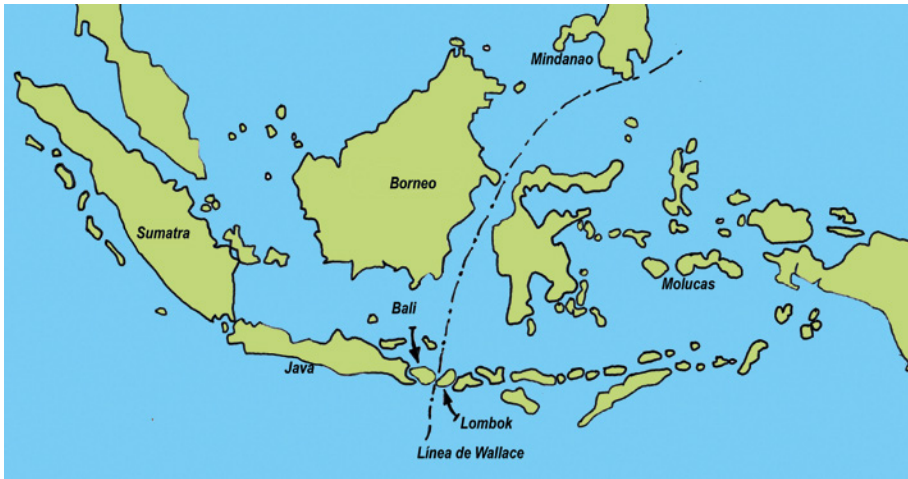


Figura 51. La línea de Wallace, que separa la fauna y flora terrestre del Sudeste Asiático de la región de Australia-Nueva Guinea, es la división biogeográfica mejor estudiada del mundo. Se han documentado subgrupos filogenéticamente distintos de los principales grupos animales y vegetales a ambos lados de la línea de Wallace desde que se propuso por primera vez en 1859³⁰⁷.

Fuente: elaboración propia, basado en el artículo de Wallace de 1863 «On the Physical Geography of the Malay Archipelago» en las actas de la Royal Geographical Society.

En 1855 Alfred Russell Wallace publicó *On the law which has regulated the introduction of new species* (Sobre la ley que ha regulado la aparición de nuevas especies) que se publicó en *Annals and Magazine of Natural History*. Supuso su primer trabajo teórico sobre las especies, gracias a que consiguió reunir suficientes evidencias de que en cualquier región del mundo existen especies que guardan estrechas relaciones entre sí. Para ello, Wallace se basaba en sus propias observaciones sobre la distribución geográfica del Amazonas y de Indonesia, y en las de Darwin en las islas Galápagos, haciendo una interpretación de cómo se podían poblar las islas.

³⁰⁷ Alfred R. Wallace, «Letter from Mr. Wallace concerning the geographical distribution of birds». *Ibis* 1, (1859): 453.

En su artículo defendía la idea de que las nuevas especies surgían a partir de especies preexistentes estrechamente relacionadas con ellas. La ley que defendió fue que todas las especies empezaban a existir coincidiendo, tanto en el tiempo como en el espacio, con una especie estrechamente relacionada preexistente.

12.3.3. Un pacto por la prioridad del descubrimiento

En 1857 Darwin y Wallace intercambiaron varias cartas sobre la variación y distribución de las especies. Darwin quedó impresionado por las observaciones y la capacidad teórica de Wallace. En una carta del 1 de mayo de 1857 aludía a su propia obra inacabada indicando que ese verano se cumplían veinte años desde que Darwin empezara su primer cuaderno de notas sobre la cuestión de cómo y en qué se diferencian entre sí las especies y las variedades. Más tarde, ese mismo año, comentó:

Mi trabajo, en el que llevo trabajando más o menos 20 años, no arreglará ni resolverá nada, pero espero que ayude al ofrecer una gran colección de hechos con un fin definido: Avanzo muy lentamente, en parte por mala salud, en parte por ser un trabajador muy lento. Tengo casi la mitad escrito, pero no creo que lo publique antes de un par de años. Llevo tres meses enteros con un capítulo sobre el hibridismo³⁰⁸.

Puede que fuera este interés compartido por el problema de las especies, junto con las palabras alentadoras de Darwin, lo que llevó a Wallace a enviar un borrador de su propia teoría de la descendencia en 1858. Darwin recibió la carta con el ensayo el 18 de junio de 1858, con la consiguiente turbación, ya que vio reflejadas en el texto sus propias ideas sobre el mecanismo de la evolución.

Según apuntó Wallace, la vida de los animales salvajes era una lucha por la existencia, que requería del ejercicio completo de todas sus facultades, todas sus energías para conservar su propia existencia y cuidar de la de su descendencia. La posibilidad de procurarse alimento durante las épocas menos favorables y escapar a los ataques de sus más peligrosos enemigos eran las condiciones primarias que para Wallace determinaban la existencia, tanto de

³⁰⁸ Darwin Correspondence Project, «Letter no. 2192», consultado el 18/02/2025, <https://www.darwinproject.ac.uk/letter/?docId=letters/DCP-LETT-2192.xml>

los individuos como de las especies. Darwin escribió a Lyell sorprendido por la gran coincidencia, indicando que si Wallace hubiera tenido su escrito de 1842 no habría podido hacer un resumen mejor.

Esta es una polémica muy interesante que entronca con el principio del comunismo y de la honestidad científica que analizamos en el primer capítulo. Darwin es consciente de que tuvo la idea primero y sus colegas le aconsejan que, al mismo tiempo que se presenta el trabajo de Wallace, Darwin presente un resumen de sus investigaciones y consideraciones que había hecho a lo largo de su investigación del mecanismo de la selección natural.

Fue lo que se definió como «arreglo delicado» en el que se reconocía el mérito de Wallace y el de Darwin. Se conoce bastante bien cómo fue el desarrollo posterior de los acontecimientos que condujeron a la presentación, en la sesión de la Sociedad Linneana de Londres el 1 de julio de 1858, del ensayo de Wallace junto a dos textos de Darwin, mostrando que ambos habían llegado al descubrimiento de la selección natural de manera independiente, pero adjudicando la prioridad a Darwin. Este acontecimiento crucial impulsó a Darwin a publicar finalmente su propia teoría, inicialmente en el mencionado resumen conjunto con el artículo de Wallace para la Linnean Society, y luego en *El origen de las especies*, al año siguiente.

Darwin reprendió a veces a Wallace por ser demasiado modesto en sus publicaciones y no atribuirse más méritos por su codescubrimiento. Wallace asumió, tanto en privado como en público, un papel subordinado en el descubrimiento. En cuanto a la teoría de la selección natural, escribió Wallace lo siguiente:

En cuanto a la teoría de la «Selección Natural» en sí misma, siempre mantendré que es realmente suya y solo suya. Usted la había desarrollado en detalles que yo nunca había pensado, años antes de que yo tuviera un rayo de luz sobre el tema, y mi artículo nunca habría convencido a nadie ni se habría considerado más que una especulación ingeniosa, mientras que su libro ha revolucionado el estudio de la historia natural y ha cautivado a los mejores hombres de la era actual. Todo el mérito que reclamo es haber sido el medio de inducirle a escribir y publicar de inmediato³⁰⁹.

Al regresar a Londres en 1862, Wallace luchó por encontrar un puesto remunerado y se mantuvo escribiendo, dando conferencias y vendiendo especímenes.

³⁰⁹ Darwin Correspondence Project, «Letter no. 4514», consultada el 18-02-2025, <https://www.darwinproject.ac.uk/letter/?docId=letters/DCP-LETT-4514.xml>

Rápidamente estableció vínculos con otros naturalistas y sociedades especializadas, trabajó en sus grandes colecciones y publicó artículos sobre zoología, biogeografía y antropología. Wallace se convirtió en uno de los corresponsales más importantes de Darwin, sobre todo en temas teóricos. Aunque ambos se referían el uno al otro en sus trabajos publicados, las cartas eran un espacio en el que discutían los detalles de la teoría evolutiva y aireaban abiertamente sus diferencias.

En la mayoría de los textos de biología de segunda enseñanza, el nombre de Wallace permanece unido al de Charles Darwin pero muy secundariamente³¹⁰. Probablemente, el origen de esta situación sea consecuencia de la diferente relación que en 1858 ambos mantenían con las instituciones científicas de Inglaterra, pero a ello también ha contribuido el comportamiento posterior del propio Wallace.

12.3.4. El origen de las especies

El 24 de noviembre de 1859 se publicó *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, una obra densa y documentada que se presentó como un ensayo³¹¹. En los primeros capítulos, Darwin trazó una analogía con los animales domésticos, estudiando cómo la selección artificial permitió al ser humano generar variedades específicas al reproducir intencionadamente aquellos individuos con características de interés, un proceso aplicado desde tiempos antiguos. Posteriormente, analizó si esta variabilidad también ocurría en la naturaleza y exploró el mecanismo de la selección natural, un concepto amplio que describió cómo la interacción entre los organismos y su entorno determina la supervivencia de determinadas formas biológicas. Más allá de sus aportes biológicos, el libro rompió con la idea de una escala natural jerárquica, proponiendo que los seres vivos no están ordenados según niveles de complejidad o perfección.

Existen variaciones en el conjunto de los seres vivos, esa variación es heredable y confiere ventajas o desventajas adaptativas a la descendencia: la selección natural permitirá la acumulación de caracteres ventajosos en la descendencia.

³¹⁰ José Fonría. *El explorador de la evolución Wallace*, 187.

³¹¹ Diferenciándose del formato actual de un trabajo científico (introducción, material y métodos, resultados y discusión) el ensayo es un texto que expone y desarrolla una idea o argumento basado en evidencia científica, pero de forma más libre y menos estructurada que un artículo científico.

La teoría de Darwin tuvo una enorme resonancia; clara y lógica, parecía dar una suficiente explicación de todos los hechos conocidos. *El origen de las especies* no solo afectaba a la biología, sino que ponía en entredicho muchos aspectos del pensamiento filosófico y cultural de la época. La teoría propuesta por Darwin y Wallace suponía:

- Reemplazar el modelo creacionista, que considera a las especies como entidades inmutables, por un modelo evolutivo que las considera entidades mutables.
- Reemplazar la idea de un diseño inteligente, dirigido por una fuerza sobrenatural, por el diseño natural que se produce por selección natural. Esto provocaba la sustitución de un dios creador, como algo necesario, por algo opcional.
- Sustituir el antropocentrismo por una visión del hombre semejante a la de cualquier otra especie, al menos en la concepción de Darwin.
- Reemplazar la concepción teleológica y la visión del cosmos como algo que tiene dirección y propósito por la consideración del mundo como una sucesión de fenómenos sin propósito, al menos también en la concepción de Darwin.

El éxito de ventas de *On the Origin of Species* fue inmediato; la primera edición, de 1.250 ejemplares, se agotó en una semana; se sucedieron rápidamente nuevas ediciones y traducciones. Entre los partidarios acérrimos de los postulados de Darwin estaba el naturalista Tomas Huxley.

Años después, en 1871, Darwin publicó *The descent of man and selection in relation to sex* (La descendencia del hombre y la selección con relación al sexo) en que extendió sus tesis evolucionistas al ser humano. Generó un conflicto entre ciencia y creencia estimulando la creación de instituciones científicas y órganos de expresión para rebatir el darwinismo (figura 52). En este sentido, el historiador británico James Moore nos recuerda que hablar de darwinismo en el siglo XIX era pensar en un «término cargado»³¹². Por otro lado, es importante recalcar que Darwin no se refirió en ningún momento a darwinismo para referirse a sus ideas³¹³.

³¹² James Moore, «Deconstructing Darwinism: The politics of evolution in the 1860s», *Journal of the History of Biology* 24, n.º 3 (1991): 353-408.

³¹³ Ver más en: J. M. Rodríguez Caso, «El darwinismo puro de Alfred Russel Wallace: aportaciones a la teoría evolutiva moderna», *Asclepio. Revista de Historia de la Medicina y de la Ciencia* 72, n.º 2 (2020): 1-13.



Figura 52. A la izquierda, las caricaturas satíricas de la época reflejaban la polémica intensa y la presencia pública de Darwin en los medios a finales del siglo XIX, Charles Robert Darwin, como un mono (litografía de F. Betbeder). En el centro, otra caricatura: la evolución de un mono en un niño, representando las teorías de Darwin según C. Bennett, 1863. A la derecha, caricatura de Darwin y su obra por F. Goedecker, 1882. Fuente: Wellcome Collection.

Es importante recordar que no hay que utilizar el término darwinismo para referirnos a la actual teoría de la evolución, ya que esta no se reduce solo a las ideas postuladas por Charles Darwin. Las teorías darwinistas son evolucionistas, pero su aportación clave es el concepto de selección natural considerado determinante para explicar la causa de la evolución.

Debido a que su enfermedad crónica se agravaba con la excitación, la discordia o las discusiones, Darwin no podía entrar en confrontaciones directas con los oponentes de la ciencia evolutiva. Afortunadamente para Darwin, la batalla fue emprendida por algunos naturalistas extremadamente combativos, decididos e ingeniosos. Los principales fueron Thomas Henry Huxley y Ernst Haeckel. Por su papel defensor de las tesis evolucionistas, el incontenible Huxley recibió el título de «bulldog de Darwin». Sin embargo, Huxley era un eminente científico por derecho propio, no era un seguidor servil de las hipótesis darwinistas. De hecho, Darwin consideraba que convertir a Huxley a la teoría evolutiva era uno de sus mayores logros³¹⁴.

Huxley se dedicó a la tarea de establecer una nueva moral basada en el conocimiento natural. A pesar de la reputación de Huxley como defensor del

³¹⁴ Magner, *A history of the life sciences*, 366.

pensamiento ilustrado y de la educación de las mujeres, sus posiciones sobre la profesionalización de la ciencia, el control de la antropología victoriana y el papel de la mujer revelan la profundidad de su creencia, muy convencional, en la inferioridad femenina³¹⁵.

Llegados a este punto, es importante explicar qué fue el darwinismo social. Esta corriente ideológica fue una interpretación errónea y pseudocientífica de las ideas de Charles Darwin sobre la selección natural y la supervivencia del más apto. Se trasladaron conceptos de la biología evolutiva al ámbito social, político y económico, justificando jerarquías sociales, desigualdades y políticas discriminatorias al afirmar que ciertas personas, razas o grupos sociales son intrínsecamente superiores a otros. Herbert Spencer (1820-1903) fue filósofo británico y principal precursor del darwinismo social, popularizó la frase «supervivencia del más apto», que Darwin nunca usó en sus obras originales. Cuestiones como la competencia en lo biológico fueron asociadas en el campo de la economía y la lucha por la posición social. Francis Galton (1822-1911) científico británico y primo de Charles Darwin, promovió la idea de mejorar la «calidad» genética de las poblaciones humanas mediante el control de la reproducción.

12.4. La cuestión de la herencia y el trabajo de los hibridadores

Aunque Darwin no propuso un mecanismo claro para explicar la herencia, agrónomos e hibridadores ya estudiaban cómo se transmitían los caracteres para mejorar variedades vegetales y animales de interés económico. Investigadores como Joseph Gottlieb Kölreuter (1733-1806) observaron patrones de herencia en híbridos y destacaron la importancia de los insectos en la polinización. Antonio Martí y Franqués (1750-1832) demostró la reproducción sexual de plantas como la sandía y promovió la producción artificial, mientras que Mariano La Gasca (1776-1839) y Simón de Rojas Clemente (1777-1827) lograron establecer líneas puras en cereales. Thomas Andrew Knight (1759-1838), por su parte, resaltó las ventajas del guisante como modelo experimental, sentando bases importantes para el estudio de la herencia.

³¹⁵ Magner, *A history of the life sciences*, 367.

12.4.1. La herencia mendeliana

La cuestión de la herencia y el trabajo de los hibridadores llegó a su máxima expresión con los trabajos de Gregor Mendel (1822-1884) que planteó la existencia de una herencia discreta e inmutable a lo largo del tiempo, un concepto de herencia que chocaría con el de Darwin. El caso de Mendel es el de otro investigador aficionado o *amateur* que está fuera del panorama científico de la época y su descubrimiento, aunque fue publicado, no fue conocido por el conjunto de la comunidad científica. En 1866, Mendel publicó su artículo «Versuche über Pflanzenhybriden» (Experimentos sobre híbridos de plantas), en el que desentrañaba, de una forma cuantitativa, los fundamentos básicos de la herencia.

Quien haya estudiado genética en el instituto o en los años de universidad habrá conocido las leyes de Mendel: variedades de guisantes de huerta con rasgos dicotómicos bien definidos, como las semillas lisas frente a las arrugadas y amarillas frente a las verdes, o el hábito de crecimiento alto frente al corto. Las explicaciones sobre estos rasgos se han perpetuado en el contexto pedagógico, enmarcándose tradicionalmente en torno a los conceptos de dominancia y recesividad. Mendel se dedicó primero, mediante cultivos normales, a obtener líneas puras constantes recogiendo metódicamente las semillas. Luego cruzaba esas estirpes de dos en dos mediante polinización artificial. Combinaba así distintas variedades de forma precisa.

En cada uno de esos cruzamientos obtenía (como otros hibridadores) una primera generación (F1) uniforme, que reproducía una de las dos formas de los progenitores. Para las generaciones siguientes (F2, F3, F4) dejaba que se realizara la autofecundación natural. Ahora bien: en F2 obtenía así regularmente $\frac{3}{4}$ de las plantas con uno de los dos tipos iniciales, y $\frac{1}{4}$ con el otro tipo, el cual reaparecía, mientras que estaba enmascarado en la generación F₁.

La primera ley de Mendel, también conocida como la ley de la segregación, establece que existen un par de factores (hoy conocidos como alelos) para cada característica, y estos se separan durante la formación de los gametos, de manera que cada uno de ellos recibe solo uno de estos factores. La segunda ley, de la segregación independiente, estipula que los diferentes pares de alelos se heredan de manera independiente unos de otros, Mendel descubrió esta ley al estudiar dos características a la vez en los guisantes, el color de la semilla (amarillo o verde) y su textura (lisa o rugosa). Cruzando dos plantas heterocigotas (VvRr x VvRr), se obtiene la proporción fenotípica 9:3:3:1 en la descen-

dencia³¹⁶. Las representaciones de estas leyes se hicieron habituales en los libros de texto de biología general incluyendo los manuales estos esquemas, en los años treinta, en España (figura 53).

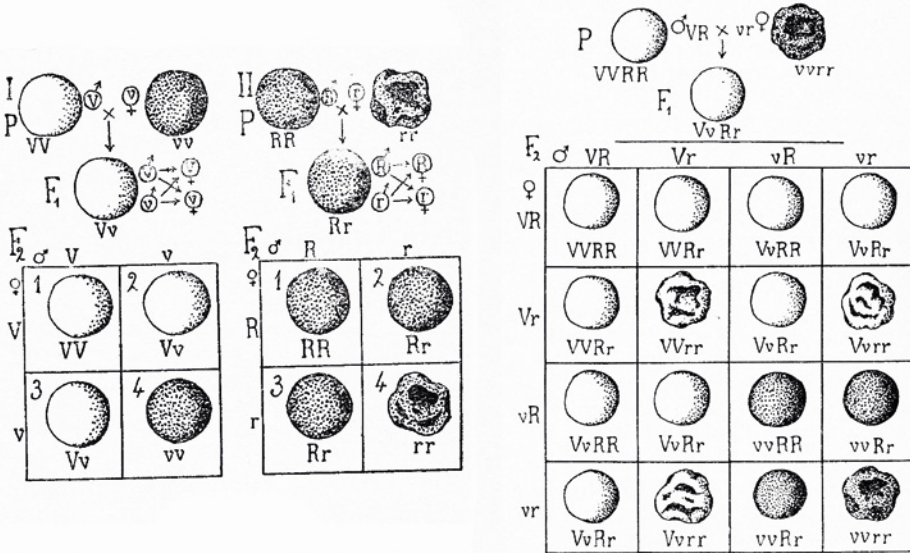


Figura 53. Representaciones de las leyes de Mendel. A la izquierda, resultados del cruzamiento de una variedad pura de guisantes amarillos con otra de guisantes verdes, *idem* entre una variedad de guisantes lisos y otra de rugosos. Los individuos de la segunda generación se representan con el método de tablero, en uno de los lados del cuadro se sitúan las letras que designan los factores de los gametos femeninos y masculinos, en las cuadrículas se anotaban las combinaciones y el aspecto fenotípico. A la derecha, resultados entre variedades que difieren por dos pares de alelos mostrando la segunda ley de la segregación independiente³¹⁷.

No sería hasta 1900 cuando tres investigadores biometristas rescatasen casi a la vez el trabajo de Mendel, empezando por el austríaco Erich Tschermak y con la confirmación experimental del botánico holandés Hugo de Vries y el alemán Carl Correns, ratificando su trabajo y dándolo a conocer como las leyes de Mendel.

³¹⁶ Recordar que esto ocurre siempre que los genes no estén ligados, es decir, que se encuentren en diferentes cromosomas.

³¹⁷ José Loustau, *Principios de Biología General y Genética* (Murcia: Tipografía de José Antonio Jiménez, 1935), 476 y 494.

El trabajo de Mendel no fue automáticamente aceptado por la comunidad científica, especialmente por algunos biometristas, en su mayoría ingleses, que tenían una noción de herencia «no discreta» (variación continua), coherente con la interpretación darwiniana. El valedor de esta posición fue Walter Frank Raphael Weldon (1860-1906); frente a él, el zoólogo inglés William Bateson, como veremos figura clave en la historia de la genética que asumió plenamente los puntos de vista mendelianos publicando, en 1902, *Mendel's principles of heredity* (Los principios mendelianos de la herencia). Los mendelistas como Bateson pensaban en una herencia discontinua de los caracteres; para ello se basaban en numerosas pruebas y experimentos que mostraban, cada vez de forma más precisa, la razón de Mendel.

A ese debate de estos primeros años del siglo xx, mantenido por mendelistas y biómetras, se le ha llamado «la guerra de los treinta años». Pese a ser una de las disputas más intensas en la historia de la ciencia, con posturas irreconciliables, estas discusiones fueron muy provechosas, más que los momentos de gran estabilidad científica, donde nada se discute, y puede imperar el miedo o respeto a contradecir el inmenso poder de quienes parecen poseer la «verdad»³¹⁸.

Weldon fue uno de los científicos de principios del siglo xx que criticó las teorías de Mendel por simplistas. También consideraba que su aplicabilidad no sobrepasaba los límites de la experimentación en entornos controlados. Por todo ello, no constituían una explicación válida para un fenómeno tan complejo como la herencia. Sobre este tema profundizaremos a la hora de tratar los problemas de la enseñanza de la genética.

«¡Si se pudiera saber si todo esto no es una maldita mentira!» exclamó Weldon a Pearson. Para Weldon, la mezcla más que la herencia alternativa parecía la que caracterizaba el color incluso el tipo de semillas de guisantes de Mendel. Para Pearson, la confianza del mendelismo en los «elementos» hereditarios intrínsecos violaba la regla epistemológica de tratar solo con fenómenos medibles y observables³¹⁹. No en vano, tanto Pearson como Weldon, albergaban una intensa antipatía por el adalid británico del mendelismo, William Bateson, que no era partidario de la biometría. Al contrario que los mendelistas, los biómetras eran fervientes darwinistas y nada se interponía entre

³¹⁸ Joaquín Fernández y Antonio González Bueno, *Biodiversidad de Linneo a nuestros días* (Madrid, Comunidad de Madrid, 1998), 123.

³¹⁹ Daniel J. Kevles, *In the name of eugenics. Genetics and uses of human heredity* (Massachusetts, Harvard University Press, 1999), 43.

ellos y la explicación evolucionista. Su mérito fue el desarrollo de una buena parte de la estadística y de algunos de sus principales conceptos.

En resumen, entre 1900 y 1902, Bateson se convenció de que el trabajo de Mendel representaba una nueva base para una ciencia de la herencia, que sería experimentalmente precisa y cuantitativa. Weldon, por el contrario, llegó a pensar que cualquier intento de poner a Mendel en el centro de la comprensión de la herencia era un error, y de hecho un enorme paso atrás para la biología. En 1902, publicó una crítica de la perspectiva mendeliana en la revista *Biometrika* (1902).

12.5. La aparición de una nueva disciplina: la genética

El término «genética» fue acuñado por Bateson en una carta que dirigió en 1905 a Adam Sedgwick, profesor de zoología de la Universidad de Cambridge. En dicha carta, dedicada al estudio de la «herencia y la variación», patrocinada por el benefactor F. J. Quick, proponía que se denominara «Cátedra Quick para el estudio de la herencia». Y apostillaba que no existía ninguna palabra de uso común para designar esa disciplina, pero si hubiese que acuñar una, esta podría ser «genética», del griego *gennētikós*, «que produce o genera».

Bateson ya había publicado, en 1894, un estudio de esas variaciones bruscas discontinuas bajo el significativo título de *Materials for the study of variation treated with special regard to discontinuity in the origin of species* (Materiales para el estudio de la variación, tratados con especial atención a la discontinuidad en el origen de las especies). Y asumió plenamente los puntos de vista mendelianos, como se ha comentado con anterioridad, en *Mendel's principles of heredity* (1902).

En Estados Unidos e Inglaterra, además de Bateson, el mendelismo fue adoptado de inmediato por numerosos estudiosos de la evolución y por fitomejoradores, como William J. Spillman, científico del Washington State College que, en 1902, mientras desarrollaba una variedad de trigo de invierno, descubrió que los resultados de sus cruces mostraban una asombrosa regularidad explicable por la teoría de Mendel. Sin embargo, la teoría también se enfrentó a un gran escepticismo. Lo que era cierto para los guisantes o el trigo no lo era necesariamente para el resto del reino vegetal y animal. Las matemáticas de la herencia mendeliana parecían entrar en conflicto con la proporción uno a uno entre machos y hembras de las especies que se reproducían sexualmente.

En 1902, en la Universidad de Columbia, Walter Sutton, estudiante en el laboratorio del citólogo Edmund B. Wilson, demostró que en la división los cro-

mosomas se comportaban de forma coherente con las leyes de Mendel. Tres años más tarde, trabajando independientemente el uno del otro, Wilson y Nettie M. Stevens, de Bryn Mayr, llegaron a la conclusión de que la determinación del sexo, incluida la proporción de uno a uno entre hombres y mujeres, estaba causada de forma mendeliana por la segregación y la reunión de los cromosomas X e Y.

El botánico danés Wilhelm Johannsen acuñó la palabra «gen» en 1909, para describir las unidades mendelianas de herencia. También estableció la distinción entre la apariencia externa de un individuo (fenotipo) y sus características genéticas (genotipo).

La palabra gen está completamente libre de cualquier hipótesis; expresa solo el hecho evidente de que, en cualquier caso, muchas características del organismo se especifican en las células germinales por medio de condiciones especiales, fundamentos y determinantes que están presentes de forma única, separada y, por tanto, independiente, en resumen, precisamente lo que queremos llamar genes³²⁰.

El término «genética» de Bateson no comenzó a popularizarse hasta que Wilhelm Johannsen sugirió que los factores mendelianos de la herencia fueran llamados «genes». La palabra propuesta se remonta al término griego *genos*, que significa «nacimiento». Esta palabra dio origen a otras, como «genoma».

12.5.1. La *fly room* de Morgan y el primer Nobel de genética

En el desarrollo de la genética del principio de siglo xx mencionamos la escuela del norteamericano Thomas Hunt Morgan (1866-1945), biólogo experimental del ámbito de la embriología, que no terminaba de estar convencido del esquema mendeliano. Morgan era de la opinión de que quizá esas leyes funcionasen para el caso de los guisantes, pero albergaba dudas de que sirviera para todos los seres vivos y, por ejemplo, señalaba que no explicaban la herencia del sexo. Tampoco consideraba la diferencia entre caracteres dominantes y recesivos, tan taxativa en muchos seres vivos: el otro problema que se planteaba es que no había todavía evidencia física de los factores que explicaban la herencia de una generación a otra.

³²⁰ Wilhelm Johannsen, *Elemente der exakten Erblchkeitslehre* (Jena: Verlag von Gustav Fischer, 1909), 124.

Con esas objeciones Morgan decidió poner a prueba las leyes de Mendel y utilizar, a partir de 1911, para su experimentación, un modelo animal manejable como la mosca *Drosophila melanogaster*, primero en la Universidad de Columbia y después en la de California. La elección del modelo animal fue crucial. Las poblaciones que se reproducían rápidamente, como las aves de corral, los roedores y las moscas de la fruta, eran los sujetos más ventajosos para la investigación genética.

Morgan y su equipo sentaron las bases de la experimentación genética en ese verdadero laboratorio de ideas que fue la habitación de las moscas *fly room* (figura 54). En este espacio Morgan y sus colaboradores, C. B. Bridges, A. H. Sturtevant y H. J. Muller, descubrieron la localización cromosómica de los genes y edificaron la genética moderna. Hubo siempre otros muchos trabajando allí, un flujo continuo de estudiantes americanos y extranjeros, doctorandos y postdoctorales. Con la utilización de este modelo buscó la existencia de los factores hipotéticos que había planteado Mendel, focalizando el trabajo en los cromosomas de las células de estas moscas.



Figura 54. Morgan en la *fly room*, en 1916, el laboratorio de *Drosophila* en la Universidad de Columbia, activo a principios del siglo xx. Era una sala (de 16 por 23 pies), en la que había ocho pupitres abarrotados y a pesar de su desorden general, se consideraba un gran lugar para la colaboración, la discusión y la investigación. Fuente: Huettner, Alfred – Photo Collection³²¹.

Eran años en los que el talento y las ideas constituían prácticamente las únicas herramientas con las que se contaba en el laboratorio. Con moscas,

³²¹ Huettner, Alfred – Photo Collection, consultado el 24-02-2025, <https://hdl.handle.net/1912/21011>

botes para guardarlas, plátanos para alimentarlas y sencillos microscopios para observarlas.

Un acontecimiento clave en la genética fue la publicación, en 1915, de *Mechanism of Mendelian Heredity*³²², un libro de texto elaborado por el grupo de Morgan donde se sintetizaron descubrimientos de diversas fuentes, especialmente estudios con *Drosophila* y otras especies. En esta obra se estableció que los factores hereditarios propuestos por Mendel residen en los cromosomas, ocupando lugares fijos (*loci*) dispuestos linealmente, y se definieron como las unidades fundamentales de la herencia. Se explicó que cada gen puede tener múltiples alelos, manteniendo su estructura salvo por mutaciones, y que su expresión puede ser influenciada por el ambiente o la interacción con otros genes. A través de cruzamientos biométricos entre mutantes espontáneos de *Drosophila*, el equipo logró mapear genes en los cromosomas (figura 55). Además, descubrieron la herencia ligada al sexo y demostraron que el daltonismo en humanos se debe a un gen recesivo ubicado en el cromosoma sexual.

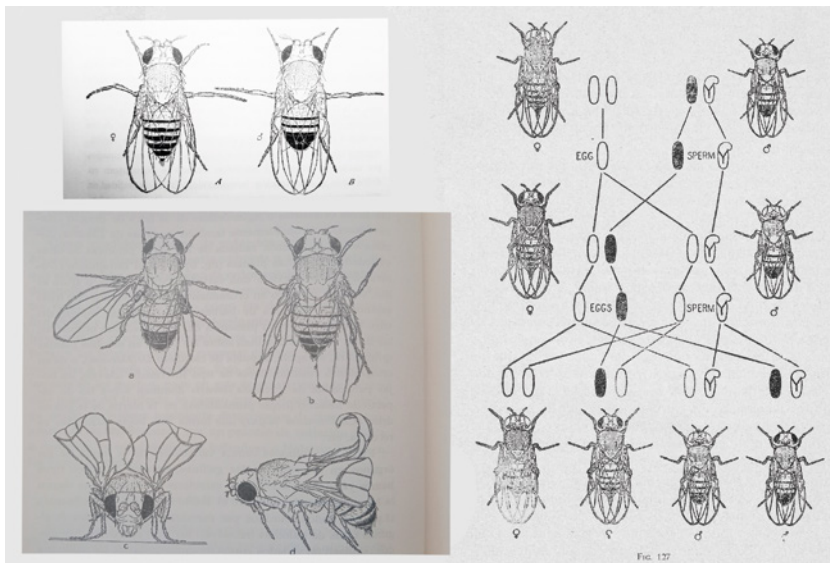


Figura 55. Representación de los experimentos y observaciones de Morgan³²³.
Fuente: Nonidez, 1935.

³²² Thomas Hunt Morgan, Alfred H. Sturtevant, Hermann J. Müller y Calvin B. Bridges, *The Mechanism of Mendelian Heredity* (New York: Henry Holt, 1915).

³²³ José F. Nonidez, *La herencia mendeliana. Introducción al estudio de la genética* (Madrid: Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas, 1935), 36, 228 y 323.

La consolidación de la teoría cromosómica estuvo marcada por un cambio de terminología, ya que Morgan y sus colaboradores aún empleaban el término «factor». Hacia 1920, cambiaron a «gen», haciendo hincapié en los compromisos específicos de la teoría cromosómica. Aunque se produjeron numerosos y reñidos debates sobre perfeccionamientos y cuestiones específicas, esa teoría dominó la genética hasta después de la Segunda Guerra Mundial.

En 1919 Morgan escribió, junto a su equipo, sobre la base física de la herencia desarrollando la teoría cromosómica y en 1926 salió a la luz un libro sobre la teoría del gen o de caracteres que se transmiten de generación en generación. En 1933 Morgan recibió el Nobel de fisiología o Medicina por sus descubrimientos sobre el papel que desempeñan los cromosomas en la herencia. Morgan se hizo un convencido mendeliano. A principios de siglo los científicos empezaron a buscar pruebas de la teoría de Mendel en el ser humano, a pesar de la lentitud de su reproducción.

Morgan estuvo fuertemente influenciado por las ideas y el trabajo de Hugo DeVries, uno de los redescubridores de Mendel y el proponente de la teoría de la mutación. Esta teoría creía que las nuevas especies surgían *de novo* y no por un cambio darwiniano gradual a lo largo de cientos o miles de generaciones.

12.5.2. Muller y las mutaciones

Hermann Joseph Muller pronto decidió unirse al grupo de *Drosophila* de Morgan en la Universidad de Columbia. Obtuvo su doctorado en 1915 por sus investigaciones sobre el *crossing-over*. Contribuyó también de forma decisiva al desarrollo de la teoría cromosómica de la herencia.

La Academia de Ciencias de la Unión Soviética contaba con un programa de genética de *Drosophila* muy desarrollado, y con la colaboración de Muller, en 1922, su laboratorio de Leningrado llegó a ser enormemente productivo. En la década de 1930 se descubrieron cromosomas gigantes en la glándula salival de la *Drosophila*. Muller y su colega soviética Alexandra Prokofieva-Belgovskaya pudieron estimar el tamaño de un gen e iniciar una investigación pionera sobre la organización física de los genes dentro de los cromosomas³²⁴.

Muller presentó su informe sobre las mutaciones inducidas por rayos X en moscas de la fruta en el V Congreso Internacional de genética (figura 56) ce-

³²⁴ Magner, *A history of life sciences*, 423.

lebrado en Berlín en 1927, también fue publicado en la revista *Science*³²⁵. Mientras trabajaban en Berlín en 1932, Muller y Nicolai Timofeeff Ressovsky (1900-1981) intentaron utilizar la inducción de mutaciones como medio para conocer la identidad del gen utilizando la radiación. Estos experimentos preliminares y discretos dieron lugar más tarde a una exposición conjunta de la teoría de la mutación «hit» o «target» por parte de Timofeeff-Ressovsky y Max Delbrück (1935).

Muller es considerado fundador de los estudios de radiación en genética, dichos estudios le valieron ser Premio Nobel de fisiología o Medicina en 1946.

Muller, en su primera comunicación, concluyó que la radiación de alta energía es peligrosa no solo para los individuos expuestos, sino también para sus descendientes. Esta conclusión ha llegado a ser entendida y aceptada de forma general, y ahora tiene un gran interés público en lo que tiene que ver con el uso de los rayos X en medicina y odontología, y en la distribución en todo el mundo de los isótopos³²⁶.



Figura 56. Congreso Internacional de genética de 1927, con la foto de los asistentes y un detalle del sello conmemorativo del Congreso dedicado a Gregor Mendel. Fuente: Wikimedia Commons.

Muller llegó a la Universidad de Indiana en el verano de 1945 e instaló un amplio laboratorio de *Drosophila* en Science Hall en Bloomington³²⁷. El laboratorio de Muller era un lugar bullicioso, con estudiantes de posgrado, técnicos

³²⁵ Hermann J. Muller, «Artificial transmutation of the gene», *Science* 46: 84-87.

³²⁶ Alfred Henry Sturtevant, *History of Genetics* (New York: Harper & Row, 1965), 81.

³²⁷ La Universidad de Indiana posee un amplio archivo relacionado con Hermann Muller incluida una exposición virtual que explora su vida y obra a partir de una selección de artícu-

y personal de laboratorio. Las mujeres desempeñaban un papel de enorme importancia en el proceso científico, aunque a menudo no podían alcanzar los niveles profesionales superiores por factores institucionales sexistas y expectativas opresivas de la maternidad. El trabajo con *Drosophila* fue más allá del ámbito de la investigación, siendo también un elemento clave en las prácticas de su docencia al utilizar modelos tridimensionales que él mismo diseñó con piezas intercambiables para representar diversas mutaciones³²⁸.

La genética clásica y los estudios sobre la *Drosophila* fueron perdiendo protagonismo. A partir de la década de 1940, nuevos organismos modelo, como el hongo *Neurospora*, las bacterias y los bacteriófagos (virus que infectan bacterias) cobraron un interés creciente.

12.5.3. La teoría sintética

Durante unos años se produjo lo que algunos autores llaman el eclipse del darwinismo, la aparente incompatibilidad de la teoría genética y evolutiva. Diversos trabajos, iniciados hacia 1920, abordaron el estudio teórico y experimental de la evolución y fueron el origen de una nueva teoría: la teoría sintética.

Esta teoría, también conocida como la síntesis moderna de la evolución, es una actualización más completa y avanzada del neodarwinismo. A lo largo de los años treinta y cuarenta se produjo la conjunción de la selección natural darwiniana, la genética mendeliana, la genética de poblaciones, la sistemática y la paleontología.

En una primera fase, al inicio de la década de 1930, algunos genetistas vinculados al laboratorio de Morgan empezaron a consolidar la genética de poblaciones, intentando responder a la cuestión de cómo se transmite la herencia en las poblaciones de seres vivos con la obra de R. Fisher *The Genetical Theory of Natural Selection* (1930), la de J. B. S. Haldane *The Causes of Evolution* (1932) y S. Wright *Evolution in Mendelian populations* de 1931.

A pesar de los fundamentos matemáticos que estos autores aportaron a la genética de poblaciones durante las décadas de 1920 y 1930, seguía sin estar claro si la teoría del gen podía conciliarse de manera adecuada con las teorías

los de la colección: *Hermann J. R. Muller: IU Nobelist*, consultado el 13/03/2025, <https://collections.libraries.indiana.edu/muller/>

³²⁸ El modelo original se encuentra en la colección de la Biblioteca Lilly. Fuente: Lilly Library LMC 1899. Indiana University Bloomington.

naturalistas de la evolución. La llamada síntesis evolutiva no se afianzó realmente hasta los años cuarenta y cincuenta con una segunda fase con los trabajos de Dobzhansky³²⁹, Mayr, Huxley³³⁰ y Simpson que profundizaron en la compatibilidad de la genética y el origen de las especies, armonizando los modernos descubrimientos genéticos con la obra de Darwin.

El texto de E. Mayr, *Systematics and the Origin of Species*, de 1942, se convirtió en un clásico, mostraba el estado de la sistemática en aquellos años. Su definición de especie como población reproductora fue especialmente sugerente.

Huxley, Dobzhansky, Mayr y Simpson³³¹, con sus cuatro textos fundamentales, son considerados los artífices del neodarwinismo. Este no es otra cosa que la adaptación del darwinismo a los nuevos conocimientos y el rechazo de algunos supuestos darwinistas cuya falsedad había sido demostrada. Todo ello se veía apoyado por una abundante acumulación de pruebas favorables a la explicación de que el proceso en su origen, es decir el causante de la variabilidad, es aleatorio y, por tanto, la selección natural no tiene ningún propósito.

Los principios neodarwinistas se concretan en estos tres: el medio no provoca variaciones deliberadas, por lo que la relación causa-efecto en la variabilidad no existe, los caracteres adquiridos no se heredan y la selección natural no conduce hacia ningún fin.

12.6. Problemas éticos sobre el estudio de la herencia: de la eugenesia a la edición génica a la carta

La eugenesia es una teoría pseudocientífica que sostuvo la posibilidad de «perfeccionar» a las personas y a los grupos mediante la genética y las leyes científicas de la herencia. La palabra «eugenesia» fue acuñada en 1883 por el científico inglés Francis Galton, primo de Charles Darwin. Galton, pionero en el tratamiento matemático de la herencia, tomó la palabra de una raíz griega que significa «bueno de nacimiento» o «noble por herencia». La colaboración internacional eugenista comenzó con el Primer Congreso Internacional de Eugenesia celebrado en Londres en 1912, y luego se consolidaron en el Segun-

³²⁹ Dobzhansky publicó en 1937: *Genetics and the Origin of Species*.

³³⁰ Huxley publicó: *The New Systematics* en 1940, y *Evolution: The Modern Synthesis* en 1942.

³³¹ Simpson publicó: *Tempo and Mode in Evolution* en 1944.

do y Tercer Congreso Internacional celebrados en Nueva York en 1921 y 1932, respectivamente.

En su búsqueda de una sociedad perfecta, desde posiciones eugenistas clasificaron como no aptos a grupos como minorías étnicas y religiosas, personas con discapacidades y personas desfavorecidas. La homosexualidad fue también objeto de incompreensión y persecución.

Los debates sobre la eugenesia comenzaron a finales del siglo XIX en Inglaterra y luego se extendieron a otros países, incluyendo Estados Unidos. Para el final de la Primera Guerra Mundial, la mayoría de los países industrializados contaban con organizaciones dedicadas a promover la eugenesia. Las prácticas eugenésicas fueron llevadas a su máxima expresión de crueldad y genocidio durante el nazismo, como el caso de Spiegelgrund en Viena, pero también en los años 30 con las esterilizaciones forzosas en algunos países anglosajones³³².

A mediados de la década de 1930, los propagandistas nazis afirmaban que su programa de esterilización³³³ obligatoria no se diferenciaba en nada de otras legislaciones similares introducidas en países como Estados Unidos y Suecia, y planeadas en Japón y en otros países europeos como Gran Bretaña, Hungría y Polonia. «No estamos solos», decían, con la esperanza de conseguir apoyo internacional para sus planes de eliminar a los que consideraban «defectuosos» de la sociedad (figura 57).

Hoy la palabra «eugenesia» se ha convertido en un término de connotación negativa. En la primera mitad del siglo XX, los objetivos eugenésicos se fusionaron con interpretaciones erróneas de la nueva ciencia de la genética para contribuir a producir resultados sociales cruelmente opresivos.

Desde el punto de vista del *ethos* de los científicos, destacamos que Muller fue un polémico crítico de los abusos de la genética y formó parte de numerosos comités nacionales e internacionales como defensor de la seguridad radiológica. Fue a la vez crítico y defensor de la eugenesia, denunciando el movimiento eugenésico estadounidense por su racismo, elitismo espurio, sexismo y suposiciones erróneas.

³³² Interesante línea cronológica para conocer más acerca de la eugenesia en la web del National Human Genome Research Institute, consultado el 15-01-2025, <https://www.genome.gov/about-genomics/educational-resources/timelines/eugenics>

³³³ La esterilización quirúrgica en hombres se realizaba con una operación sencilla que consistía en la ligadura y resección de los vasos o conductos deferentes. En las mujeres era mucho más compleja con la ligadura y resección de los oviductos o trompas de Falopio. También llegó a realizarse la esterilización con rayos X.

los Derechos Humanos y la Biomedicina de 1997 (Convenio de Oviedo)³³⁵ y la Carta de los Derechos Fundamentales de la Unión Europea (Carta de la UE)³³⁶.

Los organismos modificados genéticamente (GMO) son aquellos cuyo ADN ha sido alterado artificialmente. La legislación de la UE regula su uso, comercialización y liberación al ambiente para proteger la salud, el medioambiente y los consumidores, basándose en evaluaciones de riesgo de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria. También establece normas de autorización, seguimiento, etiquetado y trazabilidad, permitiendo a los Estados miembros restringir su cultivo. A nivel internacional, la UE aplica el Protocolo de Cartagena para regular los movimientos transfronterizos de GMO.

Tanto el término ingeniería genética como el de manipulación génica son difíciles de definir, y a menudo se aplican a técnicas y conceptos diversos. En España se elaboró la ley 8/2003 del 25 de abril, por la que se estableció el régimen jurídico de la utilización confinada, liberación voluntaria y comercialización de organismos modificados genéticamente, a fin de prevenir los riesgos para la salud humana y para el medio ambiente.

Actualmente se habla mejor de «edición genética» en vez de manipulación. Por edición génica se entiende una serie de técnicas científicas del ámbito de la biología que permiten realizar modificaciones muy precisas en el genoma de las células vivas, induciendo una ruptura en la doble cadena del ADN y corrigiéndola, con los mecanismos de reparación que posee la propia célula, a fin de deshabilitar o de introducir una secuencia funcional. Sus posibles aplicaciones son muy amplias y abarcan desde la fabricación de fármacos y las terapias celulares en el ámbito de la salud, a la ingeniería de ecosistemas y a la producción alimentaria.

La necesidad de regular la edición genética es una de las grandes cuestiones planteadas por la bioética. Una de las prioridades de la ingeniería genética está en la prevención de las enfermedades hereditarias con la edición genética de embriones antes de implantarlos para eliminar las causas hereditarias. Otro de

³³⁵ Convention for the Protection of Human Rights and Dignity of the Human Being with regard to the Application of Biology and Medicine, Oviedo, 4 April 1997, ETS No. 164, Council of Europe.

³³⁶ Artículo 3: En el marco de la medicina y la biología se respetarán en particular: el consentimiento libre e informado de la persona de que se trate, de acuerdo con las modalidades establecidas en la ley, la prohibición de las prácticas eugenésicas, y en particular las que tienen por finalidad la selección de las personas, la prohibición de que el cuerpo humano o partes del mismo en cuanto tales se conviertan en objeto de lucro y la prohibición de la clonación reproductora de seres humanos. Carta de los Derechos Fundamentales de la Unión Europea, Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2000/C 364/01, consultado el 22-04-2025, https://www.europarl.europa.eu/charter/pdf/text_es.pdf

los campos es el de la producción de vegetales y animales para beneficio humano, incrementando la productividad, reforzando la resistencia a las enfermedades u obteniendo mejoras nutritivas o de otro tipo.

Ahora que los proyectos Genoma Humano y HapMap han concluido, la comunidad científica internacional se centra en el Proyecto 1000 Genomas, una colaboración internacional entre China, Alemania, Reino Unido y Estados Unidos, que tiene como fin descubrir la mayor parte de la variación genética que se produce con una frecuencia poblacional superior al 1%. El campo de la medicina genómica avanza rápidamente, y a medida que se crean nuevas tecnologías y surgen nuevos datos, se establecen aplicaciones clínicas. En este proceso, la consideración de las implicaciones éticas de las tecnologías y los datos genómicos son cruciales para que avances genómicos puedan mejorar la salud humana. En cuanto al acceso a la información, la genómica tiene una cultura de datos abiertos que se remonta a antes del Proyecto Genoma Humano, con los principios de accesibilidad formalizados en el acuerdo de las Bermudas, que condujeron a un principio general según el cual los datos de secuenciación deben ser de dominio público tan pronto como sea posible una vez generados, y al menos antes de su publicación. En el floreciente campo de la secuenciación médica, este principio se ha visto atenuado³³⁷.

12.7. Problemas a la hora de enseñar la evolución y la herencia

La comprensión de la evolución se hace imprescindible para el estudio de la biología, los obstáculos que se presenten a los alumnos a este nivel repercutirán negativamente en etapas educativas posteriores. Probablemente las ideas erróneas en genética y ecología mantenidas por el alumnado son, al mismo tiempo, causa y efecto de los problemas surgidos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la evolución.

Existe una tendencia general de los estudiantes a interpretar los procesos de cambio en las especies según planteamientos erróneos (evolución dirigida, adaptación lamarckiana), tan solo en el Bachillerato, las ideas han de ser sustituidas por concepciones darwinistas o más acordes con las teorías científicas actuales.

A la hora de buscar ayuda en los libros de texto se observa cómo, de forma generalizada, estos solo tratan las teorías evolutivas clásicas, con los ejemplos

³³⁷ Rebecca F. Furlong, «Ethical, legal and social issues: out in the open», *Genome Medicine* 4 (2012): 18.

recurrentes que monopolizan la mayoría del temario. No encontramos espacio para tratar las teorías evolutivas actuales como el neutralismo o los equilibrios puntuados. En cuanto a las actividades propuestas, se circunscriben a lecturas de ampliación o de repaso. En este caso, se echan en falta actividades de tipo procedimental como el análisis de imágenes, de diagramas o la interpretación de noticias.

12.7.1. Errores comunes al estudiar la obra de Darwin

Uno de los errores más llamativos en muchos estudiantes y el gran público es la creencia de que Charles Darwin fue el primero en proponer el concepto de evolución. Como ya hemos señalado lo que hizo fue, con un trabajo muy metódico, proponer un mecanismo para explicar cómo se produce la evolución, el de la selección natural, expuesto simultáneamente con Wallace, en la sesión de la Sociedad Linneana de Londres.

Se debe poner atención al error de interpretar que la «supervivencia del más apto» sea que solo sobreviven los individuos más fuertes o agresivos. En términos darwinianos, «el más apto» se refiere al éxito reproductivo, lo que a menudo implica cooperación, no solo competencia. Una idea errónea muy extendida es que la teoría de Darwin afirma que los humanos evolucionaron a partir de los monos. Por el contrario, Darwin propuso que los humanos y los monos comparten un ancestro común y han seguido caminos evolutivos diferentes desde esa divergencia.

En cuanto a los fundamentos de la ciencia, hay que recalcar que las ideas de Darwin son solo teorías, por lo tanto, no están probadas, no son una ley. Ya hemos tratado de las dificultades de la genética de poblaciones y de la teoría sintética. Los estudiantes a menudo malinterpretan el término «teoría», siendo esta una explicación bien fundamentada de algún aspecto del mundo natural, basada en un conjunto de hechos que se han confirmado repetidamente mediante la observación, aunque en este caso difícilmente reproducible en un laboratorio o bajo unas condiciones controladas.

12.7.2. Errores sobre el mecanismo de la selección natural

El error más común es que la selección natural implica que los organismos «intentan» adaptarse, es algo que hasta se escucha en los documentales. Es

común la creencia de que los organismos se adaptan o cambian conscientemente sus rasgos en respuesta a su entorno. Hay que remarcar que, en realidad, la selección natural es un proceso que favorece ciertos rasgos existentes que proporcionan una ventaja, y estos rasgos se hacen más comunes en la población a lo largo de las generaciones.

Otro error conceptual es que la selección natural conduce a la perfección a organismos perfectamente adaptados. En realidad, la selección natural solo puede funcionar con variación genética disponible y también se ve influida por compensaciones y entornos cambiantes. Por lo tanto, los organismos no están perfectamente adaptados, sino lo suficientemente bien como para sobrevivir y reproducirse.

Otro concepto erróneo es el de la escala del tiempo, ya que se tiene la percepción de que la selección natural solo puede observarse a lo largo de millones de años, pero ejemplos como la resistencia a los antibióticos en las bacterias demuestran que pueden producirse cambios evolutivos significativos a corto plazo.

12.7.3. Apreciaciones sobre el mecanismo de la herencia

Autores como Annie Jamieson y Gregory Radick, historiadores de la ciencia de la Universidad de Leeds, entre otros, propusieron un modelo que diluye el concepto de dominancia/recesividad, enfocándose en la interacción gen-entorno³³⁸. El enfoque mendeliano en la enseñanza de la genética ha persistido por su sencillez hasta el siglo XXI a pesar del creciente reconocimiento en muchas disciplinas, como la genética, la biología molecular y las neurociencias, entre otras, de que, contrariamente a la imagen mendeliana de los guisantes, los genes no deben considerarse las únicas causas de los rasgos fenotípicos de los organismos, sino como elementos en una red compleja de factores involucrados en el desarrollo de un organismo³³⁹.

En la actualidad, en cuarto de la ESO se introduce al alumnado a la genética por primera vez, empezando por el concepto de ADN y ARN. Esta estructuración de contenidos está en consonancia con lo que Jamieson y Radick

³³⁸ Gregory. M. Radick, «Beyond the Mendel-Fisher controversy», *Science* 350 (2015): 159-160.

³³⁹ Annie Jamieson y Gregory Radick, «Putting Mendel in His Place: How Curriculum Reform in Genetics and Counterfactual History of Science Can Work Together», en *The Philosophy of Biology: A Companion for Educators, History*, ed. por Kostas Kampourakis (Springer, 2013), 577-596.

explican en su artículo, rompiendo con la tendencia clásica de empezar el tema con la genética mendeliana, de esta forma se puede comprender mejor la complejidad de la expresión y regulación genéticas. Y se puede conseguir que el alumnado de Secundaria adquiera un concepto de la genética y la herencia más complejo, permaneciendo las aproximaciones mendelianas como algo menos central.

En 2º de Bachillerato, se empieza desde el nivel molecular: se incluye comprender el ADN como portador de la información genética y el concepto de gen, analizar el mecanismo de replicación del ADN en procariotas y las diferencias con los eucariotas, así como estudiar las etapas de la expresión génica en ambos modelos, abarcando la transcripción y traducción. Se profundiza en los distintos tipos de ARN y sus funciones, el código genético y su aplicación en la resolución de problemas. También se abordan las mutaciones, su papel en la evolución y biodiversidad, los agentes mutagénicos y la regulación de la expresión génica, clave en la diferenciación celular. Asimismo, se exploran estrategias para resolver problemas de herencia genética, considerando la dominancia, recesividad, herencia ligada al sexo, codominancia, dominancia incompleta y alelismo múltiple.