

Neurociencia aplicada a la educación

Colección
Educación Superior

Coordinadores
GONZALO JOVER OLMEDA
MARÍA JOSÉ FERNÁNDEZ DÍAZ



Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de la propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sigs. Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (www.cedro.org) vela por el respeto de los citados derechos.

Neurociencia aplicada a la educación

David Bueno i Torrens



Consulte nuestra página web: **www.sintesis.com**
En ella encontrará el catálogo completo y comentado

Agradecimientos:

Ismail Hermelo por las ilustraciones de las figuras 4.5. y 6.9
y Maria Tricas por la de la figura 5.8

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización previa por escrito de Editorial Síntesis, S. A.

© David Bueno i Torrens

© EDITORIAL SÍNTESIS, S. A.
Vallehermoso, 34. 28015 Madrid
Teléfono: 91 593 20 98
www.sintesis.com

ISBN: 978-84-9171-420-0
Depósito Legal: M. 31.502-2019

Impreso en España - Printed in Spain

Índice

Introducción	11
Por qué es importante conocer cómo se forma y cómo funciona el cerebro	11
1. La neuroeducación	15
1.1. Contexto general de la educación	15
<i>1.1.1. Los objetivos de la educación, 16. 1.1.2. Qué esperan los alumnos de un buen profesor, 19</i>	
1.2. Teorías del aprendizaje	20
<i>1.2.1. El conductismo, 21. 1.2.2. El cognitivismo, 22. 1.2.3. El constructivismo, 23. 1.2.4. El conectivismo, 24. 1.2.5. Otras aproximaciones pedagógicas, 24</i>	
1.3. La posición de la neurociencia en la educación	25
1.4. El método científico en neuroeducación	28
<i>1.4.1. La moda “neuro” y los neuromitos, 28. 1.4.2. El método científico, 29. 1.4.3. La filosofía de la ciencia en el estudio del cerebro, 35. 1.4.4. El método científico en educación, 36</i>	
En la práctica: doce aspectos clave del cerebro en educación	37
Resumen	39
2. Genes y aprendizaje	41
2.1. El genoma humano	41
2.2. Estructura del material genético	43
2.3. Genes, alelos y proteínas: el flujo de información génica	44

2.3.1. <i>La síntesis de proteínas a partir del mensaje genético</i> , 45.	
2.3.2. <i>Variantes génicas: los alelos</i> , 47	
2.4. Regulación de la expresión génica: los programas genéticos	48
2.4.1. <i>Intensificadores y factores de transcripción</i> , 48. 2.4.2. <i>Modificaciones epigenéticas</i> , 49	
2.5. Heredabilidad del comportamiento humano	52
2.5.1. <i>Genes y ambiente</i> , 52. 2.5.2. <i>Mutaciones y alteraciones de las funciones mentales</i> , 58	
En la práctica: herencia y crianza	59
Resumen	60
3. Neuronas, neurotransmisores y redes neurales	61
3.1. Células y tejidos	61
3.1.1. <i>Las células como unidades fundamentales de la vida</i> , 62.	
3.1.2. <i>El microbioma</i> , 64. 3.1.3. <i>Morfología general de las células</i> , 66. 3.1.4. <i>Los tejidos</i> , 67	
3.2. Las células del sistema nervioso	69
3.2.1. <i>Las neuronas</i> , 70. 3.2.2. <i>Las células gliales</i> , 71	
3.3. Redes neurales	74
3.3.1. <i>Las sinapsis</i> , 74. 3.3.2. <i>El impulso nervioso y las sinapsis eléctricas</i> , 75. 3.3.3. <i>Las redes neurales</i> , 76	
3.4. Sinapsis químicas y neurotransmisores	79
3.4.1. <i>Los neurotransmisores</i> , 80. 3.4.2. <i>La conexión sináptica química</i> , 81	
En la práctica: alimentación y neurotransmisores	83
Resumen	84
4. El sistema nervioso	85
4.1. El estudio del sistema nervioso	85
4.1.1. <i>Breve historia del estudio del cerebro</i> , 86. 4.1.2. <i>La dualidad mente-cerebro</i> , 88. 4.1.3. <i>Técnicas actuales de estudio del cerebro</i> , 90	
4.2. El sistema nervioso periférico y los órganos de los sentidos	92
4.2.1. <i>Sistema nervioso periférico</i> , 93. 4.2.2. <i>Órganos de los sentidos</i> , 95	
4.3. Sistema nervioso central	98
4.3.1. <i>La médula espinal</i> , 99. 4.3.2. <i>El tronco del encéfalo</i> , 100. 4.3.3. <i>El cerebelo</i> , 101	

En la práctica: la sensorialidad	103
Resumen	104
5. El cerebro	105
5.1. Anatomía y morfología funcional del cerebro	105
5.1.1. <i>Los sistemas de protección</i> , 106. 5.1.2. <i>Los hemisferios cerebrales y el cuerpo calloso</i> , 108. 5.1.3. <i>Los lóbulos cerebrales</i> , 111. 5.1.4. <i>Funciones asociadas a la corteza cerebral</i> , 114. 5.1.5. <i>Engramas de memoria</i> , 115. 5.1.6. <i>Las neuronas espejo</i> , 116	
5.2. El sistema límbico	117
5.2.1. <i>El tálamo</i> , 117. 5.2.2. <i>El hipotálamo</i> , 119. 5.2.3. <i>El hipocampo</i> , 119. 5.2.4. <i>La amígdala</i> , 120. 5.2.5. <i>El cuerpo estriado</i> , 122. 5.2.6. <i>Las glándulas del cerebro: hipófisis y glándula pineal</i> , 122	
5.3. Otra manera de ver el cerebro en educación: la importancia del qué, el cómo y el por qué	124
5.4. La evolución del cerebro	125
5.4.1. <i>El origen de los humanos</i> , 125. 5.4.2. <i>La neotenia</i> , 126. 5.4.3. <i>El crecimiento diferencial del cerebro</i> , 127. 5.4.4. <i>La red neural semántica</i> , 128. 5.4.5. <i>La sociabilización</i> , 130	
En la práctica: imitación y patrones de conducta	132
Resumen	133
6. De la concepción a la preadolescencia	135
6.1. La formación del cerebro	135
6.1.1. <i>El desarrollo embrionario</i> , 136. 6.1.2. <i>El desarrollo fetal</i> , 138	
6.2. Los tres primeros años de vida	140
6.2.1. <i>Sinapsis y poda sináptica tras el nacimiento</i> , 141. 6.2.2. <i>Adaptación al entorno social</i> , 142. 6.2.3. <i>Los primeros aprendizajes</i> , 143. 6.2.4. <i>Somatosensorialidad</i> , 145. 6.2.5. <i>Adquisición del lenguaje</i> , 146	
6.3. De los cuatro a los once años	149
6.3.1. <i>Teoría de la mente</i> , 151. 6.3.2. <i>Memoria y plasticidad cerebral</i> , 152. 6.3.3. <i>Música, arte y psicomotricidad</i> , 153. 6.3.4. <i>Lectoescritura y lógico-matemática</i> , 154. 6.3.5. <i>La tecnología digital</i> , 157. 6.3.6. <i>Poda neural</i> , 158	
En la práctica: las destrezas personales y académicas	159
Resumen	160

7. La adolescencia	161
7.1. El origen y la función biológica de la adolescencia	161
7.1.1. <i>¿Existe la adolescencia?</i> , 163. 7.1.2. <i>Evolución de la adolescencia</i> , 165	
7.2. Los cambios biológicos en el cerebro adolescente	167
7.2.1. <i>Glándula pineal y ritmos circadianos</i> , 167. 7.2.2. <i>Sustancia blanca, cuerpo calloso e hipocampo: la integración de funciones</i> , 170. 7.2.3. <i>Amígdalas, estriado y lóbulos frontales: recompensas, control de funciones ejecutivas e hipersensibilidad emocional</i> , 172. 7.2.4. <i>Poda sináptica</i> , 175	
7.3. La monitorización de los estados mentales	177
7.3.1. <i>Metacognición</i> , 177. 7.3.2. <i>Autoconsciencia</i> , 178	
7.4. El cerebro social	179
7.4.1. <i>Cognición social</i> , 180. 7.4.2. <i>Comunicación verbal y no verbal</i> , 181	
7.5. El cerebro masculino y el cerebro femenino	183
En la práctica: miradas, responsabilidad y límites	186
Resumen	187
8. El cerebro aprendiz: memoria, atención y motivación	189
8.1. La memoria	189
8.1.1. <i>Memoria implícita</i> , 190. 8.1.2. <i>Memoria explícita</i> , 193. 8.1.3. <i>Contexto y aprendizajes cooperativos en la memoria explícita</i> , 194. 8.1.4. <i>Memoria de trabajo</i> , 195. 8.1.5. <i>De la memoria sensorial a la memoria a largo plazo</i> , 196. 8.1.6. <i>Falsos recuerdos</i> , 200	
8.2. Las emociones	201
8.2.1. <i>Anatomía cerebral de las emociones</i> , 202. 8.2.2. <i>Tipos de emociones</i> , 203. 8.2.3. <i>Reconocimiento de las emociones</i> , 205. 8.2.4. <i>Control emocional</i> , 207	
8.3. La atención, la motivación, el esfuerzo y el estrés	209
8.3.1. <i>Alegría y sorpresa como emociones proactivas en los aprendizajes para activar la atención y la motivación y para facilitar el arousal</i> , 210. 8.3.2. <i>Expectativas, esfuerzo, maduración de la motivación y resaca emocional</i> , 212. 8.3.3. <i>El estrés y los aprendizajes</i> , 215	
En la práctica: el cómo debe anticipar el qué	217
Resumen	218

9. El cerebro anticipador: flexibilidad cognitiva, creatividad y control ejecutivo	219
9.1. La reserva cognitiva	219
9.1.1. Eficiencia y capacidad mental, 220. 9.1.2. Actividad física, 222. 9.1.3. Meditación, 224	
9.2. La plasticidad y la flexibilidad neural	225
9.2.1. Códigos neurales y refuerzo positivo, 226. 9.2.2. El juego como fuente de aprendizaje: de lo individual a lo cooperativo, 228	
9.3. La creatividad	230
9.3.1. Redes neurales del pensamiento creativo, 230. 9.3.2. Búsqueda de novedades, 232	
9.4. Las funciones ejecutivas: flexibilidad cognitiva y capacidad de autogestión personal	233
9.4.1. Flexibilidad cognitiva, 235. 9.4.2. Reflexividad, pensamiento crítico y dogmatismos, 236. 9.4.3. Razonamiento fluido, 237. 9.4.4. Las funciones ejecutivas y su importancia en la construcción personal, 237	
En la práctica: flexibilidad cognitiva, creatividad y control ejecutivo: ¿las claves de la educación para el futuro?	238
Resumen	240
 Bibliografía	 241

2

Genes y aprendizaje

El cerebro humano, como cualquier otro órgano del cuerpo, está formado por células, cuya estructura y fisiología permiten el funcionamiento específico e integrado de este órgano. La vida mental depende de las conexiones que establecen las neuronas entre ellas, en las cuales intervienen unas moléculas muy singulares, los neurotransmisores. Todo el funcionamiento biológico del cuerpo, incluidos la construcción del cerebro durante el desarrollo embrionario y fetal, la infancia, la adolescencia y la edad adulta, y también la fisiología neuronal y el funcionamiento del sistema de neurotransmisores, está regulado por programas génicos, cuyos elementos fundamentales, los genes, constituyen el genoma humano. Los genes son los elementos básicos de la herencia biológica, y determinan o influyen todas las características del cuerpo, incluidas las funciones mentales y los procesos cognitivos.

En este capítulo se va a tratar la cuestión del genoma humano, la estructura del material genético y, muy especialmente, el funcionamiento de los genes, incluyendo la influencia de los factores ambientales. También se examinará el alcance de su participación en los procesos mentales, y se establecerá la gran diferencia existente a nivel biológico entre *determinar* e *influir*, especialmente en relación con el comportamiento y las capacidades de aprendizaje. No se pretende profundizar en exceso en estos temas, sino sentar las bases que permitan entender en los próximos capítulos hasta qué punto la biología influye en las capacidades cognitivas, cómo funcionan las neuronas y la importancia del sistema de neurotransmisores para la vida mental de las personas.

2.1. El genoma humano

Todos los sistemas biológicos, desde los virus y las bacterias más simples hasta los animales más complejos, basan su funcionamiento en el material genético. Está organizado en unidades discretas, los genes, cuya función es especificar, o contribuir a especificar, algún aspecto de la biología del organismo al cual pertenecen. La mayoría de los genes contienen la información necesaria para fabricar una o más de una proteína, lo que implica la existencia de procesos de descodificación desde el material genético hasta las proteínas, puesto que usan lenguajes bioquímicos y moleculares diferentes. Todos los seres vivos usan el mismo sistema básico de descodificación, lo que sirve de prueba de

que todos proceden de un mismo ser vivo ancestral, en el origen de la vida. Y, por consiguiente, de que todos los organismos actuales están emparentados mediante procesos evolutivos.

El conjunto de genes de un organismo se denomina genoma. Todos los individuos de una misma especie tienen el mismo genoma, esto es, el mismo número y tipo de genes. Aunque no necesariamente tienen las mismas variantes en todos sus genes, lo que justifica que no haya nunca dos organismos exactamente idénticos. De forma análoga, todas las células de un mismo organismo poseen no solo el mismo genoma, sino también las mismas variantes para cada gen. Sin embargo, cada tipo celular o cada tejido solo expresa aquellos genes que requiere para realizar su función y el resto permanecen silenciados. Es decir, solo hace que funcionen los genes que precisa. Una neurona, por ejemplo, y una célula de la piel de una misma persona tienen exactamente el mismo genoma y también las mismas variantes para cada gen, pero los programas génicos que mantienen activos son diferentes, para poder realizar funciones distintas.

Todas las células del cuerpo humano, incluidas las neuronas, tienen el material genético encerrado en una estructura especial denominada *núcleo* (figura 2.1). Las células que tienen el material genético encerrado dentro de un núcleo celular se denominan genéricamente eucariotas, y son típicas de todos los seres vivos a excepción hecha de las bacterias.

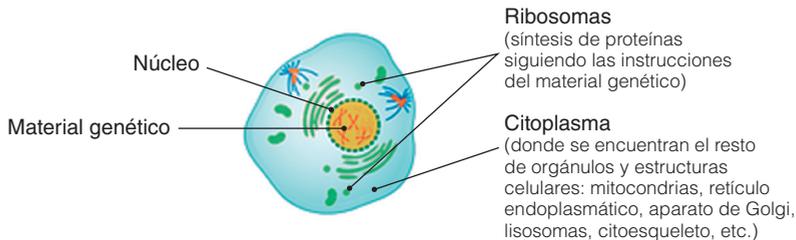


Figura 2.1. Imagen idealizada y simplificada de una célula humana.

El genoma humano está formado por unos 20.300 genes. Contiene toda la información necesaria para:

- Guiar el desarrollo de la persona, desde la fecundación hasta la edad adulta.
- Controlar el funcionamiento de todas sus células, unos 200 tipos celulares diferentes, incluidos diversos tipos de neuronas y de otras células presentes en el sistema nervioso, como las denominadas *células de la glía* (para una descripción de los distintos tipos celulares que forman el cerebro, véase el capítulo 3).
- Realizar todas las funciones vitales.

2.2. Estructura del material genético

El material genético está constituido por largas hebras de ADN –acrónimo de ácido desoxirribonucleico, DNA, según sus siglas en inglés–, las cuales están formadas por la unión de cuatro moléculas que forman los genes, repetidas muchas veces. Estas moléculas elementales se denominan *nucleótidos*, y hay cuatro diferentes. Se diferencian unos de otros por una de las piezas, llamadas *bases nitrogenadas*, que se representan con las letras C, G, T y A, iniciales de su nombre químico: citosina, guanina, timina y adenina, respectivamente. Están dispuestas de manera lineal, unidos uno tras otro de manera ordenada y sin ramificaciones, formando largas cadenas (figura 2.2), de hasta 250 millones de nucleótidos

Cada cadena de ADN está formada por dos hebras de nucleótidos, que están enrolladas formando una doble hélice. En estas dos cadenas, los nucleótidos se encuentran siempre emparejados entre ellos, uno de una cadena con otro de la otra cadena, siguiendo una norma estricta. Cuando en una cadena hay una T, en la complementaria siempre hay una A (y viceversa); y cuando en una hay una G, en la complementaria siempre hay una C (y viceversa).

El ADN completo de una neurona, como el de cualquier otra célula humana, a excepción hecha de los gametos, contiene unos 6.400 millones de nucleótidos repartidos en varias cadenas, y pesa unas diez billonésimas de gramo. La única excepción a estas cifras, como se ha dicho, la constituyen las células reproductoras o gametos, esto es, los óvulos y los espermatozoides, que contienen solo la mitad de material genético. De este modo, cuando se fusionan un óvulo y un espermatozoide para construir un nuevo ser humano, se recupera la cantidad total de material genético propio de la especie humana.

Ejemplo 2.1

Si escribiésemos las letras correspondientes a estos 6.400 millones de nucleótidos una detrás de otra, como se encuentran en el ADN, configuraríamos un texto de 6.400 millones de letras. Para hacernos a la idea de qué representa esta cifra, cada página de este libro contiene unos 2.500 caracteres, y el libro completo unos 650.000 caracteres. Necesitaríamos, por lo tanto, una enciclopedia de algo más de 10.000 libros como este para contener toda la información genética del genoma humano. A pesar de que los nucleótidos son mucho más pequeños que los caracteres de este libro, la longitud total del ADN de cada célula sigue siendo considerable. Si uniéramos todo el ADN de una neurona, por ejemplo, obtendríamos un hilo molecular de casi 5 metros de longitud. Es, sin ninguna duda, una medida sorprendente, especialmente si tenemos en cuenta que este ADN está contenido dentro del núcleo celular que no supera, de media, los 6 micrómetros de diámetro (esto es, 6 milésimas de milímetro).

El material genético se encuentra empaquetado dentro de las células formando unas estructuras de complejidad creciente, la cromatina y los cromosomas (figura 2.2). Cada cromosoma está formado por una única hebra de ADN que va de extremo a extremo, a la que se encuentran unidas muchas proteínas, entre las que destacan las denominadas *histonas*. Cuando el ADN se encuentra unido a las histonas, forma lo que se denomina fibra de cromatina. Una de las funciones de las histonas es enrollar y plegar el ADN para que tenga una estructura y una conformación adecuada, la susodicha cromatina y los cromosomas. Además, también contribuyen a darle estabilidad y a regular la expresión de los genes que contiene.

Cada célula humana (a excepción hecha de nuevo de los gametos), tiene exactamente 23 pares de cromosomas (es decir, 46 cromosomas en total). De estos 23 pares de cromosomas, un miembro de cada par proviene del progenitor materno, y el otro del paterno. Por este motivo, los gametos tienen solo la mitad de material genético y, por extensión, de cromosomas. Así, cada progenitor transmite solo la mitad del material hereditario a sus descendientes, una mitad complementaria a la del otro progenitor, de forma que al unirse los dos gametos se recuperan los 23 pares de cromosomas típicos de nuestra especie.

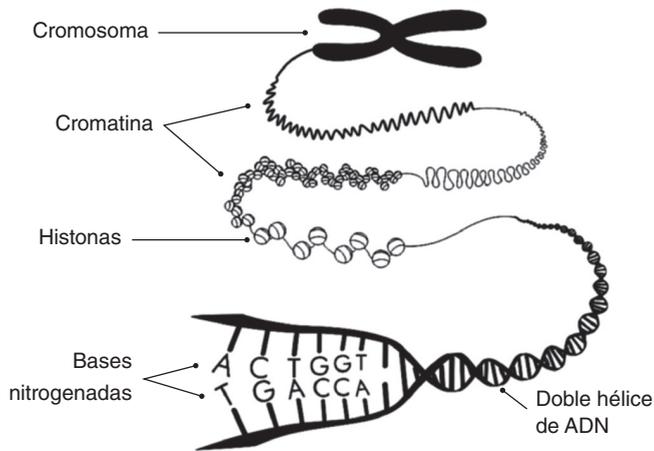


Figura 2.2. Estructura del material genético.

Fuente: modificada de Bueno (2018).

2.3. Genes, alelos y proteínas: el flujo de información génica

Cada cadena de ADN contiene muchas unidades funcionales, denominadas *genes*. Los genes son las unidades básicas de la herencia biológica. O, dicho de otro modo, son

segmentos discretos de ADN que llevan la información necesaria para codificar y transmitir las características biológicas de los organismos. Están formados por secuencias de nucleótidos. Cada gen tiene una secuencia de nucleótidos determinada, de una longitud concreta, que le da su especificidad.

Ejemplo 2.2

La secuencia:

ATGGGGAACCGCAGCACCGCGGACGCGGAC

corresponde a los treinta primeros nucleótidos de uno de los receptores de la dopamina. La dopamina es un neurotransmisor de actuación cerebral que está implicado, entre otros aspectos del comportamiento, en la motivación, el aprendizaje y las sensaciones de recompensa.

En cambio, la secuencia:

AGCCCTCCAGGACAGGCTGCATCAGAAGAG

corresponde a los primeros treinta nucleótidos de un gen completamente diferente, en este caso, de la insulina. La insulina es una hormona implicada, entre otras funciones, en la gestión energética del cuerpo. También está implicada en algunas funciones cerebrales relacionadas con el aprendizaje, como la memoria y el estado de ánimo, de forma sinérgica con otras moléculas cerebrales, como la citada dopamina.

2.3.1. La síntesis de proteínas a partir del mensaje genético

La mayor parte de genes codifican proteínas. Es decir, llevan la información necesaria para que las células fabriquen una o más de una proteína específica. El paso de información desde el ADN hasta la proteína se produce en dos pasos claramente diferenciados, que en conjunto se denominan *flujo de información génica* (figura 2.3). En un primer paso, la información contenida en el ADN se copia en una molécula intermediaria, que se denomina ARN. La estructura química del ARN es muy parecida a la del ADN, aunque no es exactamente idéntica. Este proceso se denomina *transcripción*.

Este ARN, que en virtud de su función se denomina ARN mensajero (ya que transporta el mensaje del ADN), sale del núcleo celular y se dirige a unos orgánulos específicos llamados *ribosomas* (véase la figura 2.1). Los ribosomas actúan como una mesa de trabajo, donde una miríada de otras moléculas se encarga de descodificar el mensaje y de fabricar la proteína correspondiente a partir de él. Las proteínas están formadas por la

unión lineal de aminoácidos, unas moléculas con una estructura diferente a la del ADN y el ARN. Por eso es necesario descodificar el mensaje genético y traducirlo al lenguaje de las proteínas.

Hay 20 aminoácidos diferentes. Este proceso de descodificación durante el cual se fabrican las proteínas se denomina *traducción*. En la traducción, cada tres nucleótidos consecutivos del ARN determinan la incorporación de un aminoácido específico en la cadena proteica. El “diccionario molecular” que permite asignar un aminoácido específico a cada conjunto de tres nucleótidos consecutivos se denomina *código genético*. El código genético es universal, es decir, es igual para todos los seres vivos de la Tierra, lo que constituye una de las mejores pruebas de que todos los seres vivos estamos emparentados, y que procedemos de un ser vivo ancestral muy simple, parecido a una bacteria, mediante procesos evolutivos. Según cual sea la información original en el ADN, la proteína que se sintetizará será una u otra, con una función determinada y específica en cada caso.

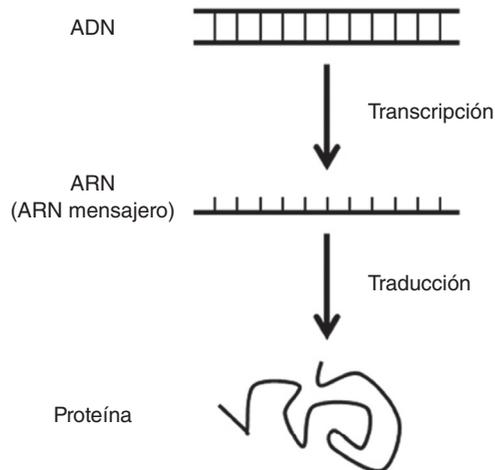


Figura 2.3. Flujo de información génica.

Hay muchas proteínas diferentes, más de 120.000 identificadas en el cuerpo humano, con funciones específicas. Si los genes son los directores del funcionamiento biológico del cuerpo, las proteínas forman parte de los obreros encargados de realizar todas las funciones. Algunas de estas funciones, además, son imprescindibles para el funcionamiento del cerebro, la generación de los procesos mentales y los aprendizajes.

Las principales funciones de las proteínas son:

- Defensivas, entre las que destacan los anticuerpos.

- Motoras, como las proteínas contráctiles implicadas en todos los movimientos celulares y musculares.
- Estructurales, como las proteínas que definen la forma de las células. En este sentido, uno de los elementos neuronales básicos que controla el crecimiento y la morfología neuronal son los denominados *neurofilamentos*. Forman parte del citoesqueleto celular y participan también en el transporte de vesículas dentro de las neuronas, como por ejemplo las que transportan los neurotransmisores.
- Catalíticas o enzimáticas, que consisten en favorecer o acelerar reacciones químicas. Muchos neurotransmisores no están formados por proteínas, pero en su fabricación y en su degradación y reciclaje intervienen siempre enzimas proteicas.
- De señalización y receptoras, imprescindibles para el correcto funcionamiento coordinado de todos los tejidos y órganos del cuerpo, incluido el cerebro. En este sentido, para que los neurotransmisores puedan realizar su función necesitan unirse a receptores específicos, todos de naturaleza proteica.
- Transportadoras, como por ejemplo la hemoglobina, que se encarga del transporte de oxígeno dentro de los glóbulos rojos. En el caso del cerebro, la mayor parte de neurotransmisores no pueden viajar libremente de una neurona a otra, sino que necesitan proteínas transportadoras que los acompañen y dirijan.

En la formación y el funcionamiento del cerebro, son cruciales las proteínas estructurales, que dan forma a las neuronas; las enzimáticas, que permiten la fabricación y la degradación de los neurotransmisores; los receptores, que unen los neurotransmisores para interpretar el mensaje que transportan; y las transportadoras, que son imprescindibles para que los neurotransmisores que no son de naturaleza proteica alcancen las neuronas de destino.

2.3.2. Variantes génicas: los alelos

Según el último recuento de genes realizado dentro de los proyectos Genoma Humano y ENCODE (acrónimo de *Encyclopaedia of DNA Elements*, o Enciclopedia de los elementos del ADN), encargados del análisis del genoma humano y de su funcionalidad, el genoma humano contiene unos 20.300 genes, de los cuales, aproximadamente de 8.000 a 8.500 funcionan en algún momento en las células del cerebro. Todas las personas tienen los mismos genes, es decir, el mismo tipo de información en el genoma, pero cada gen puede presentar distintas variantes. Estas variantes génicas, denominadas *alelos* en terminología genética, implican pequeños cambios en la secuencia del gen y, en consecuencia, en la función de la proteína que codifican. Dicho de otro modo, cada alelo puede influir de manera ligeramente distinta en la característica biológica en la que participa ese gen, lo justifica parte de las diferencias que se observan entre dos personas cualesquiera.

Ejemplo 2.3

Todos poseemos un gen que determina que tengamos un grupo sanguíneo en el denominado *sistema ABO*. Tenemos dos copias de este gen; una la hemos heredado de nuestra madre y la otra de nuestro padre. El gen del sistema sanguíneo ABO puede presentar, a saber, tres alelos diferentes, denominados I^O , I^A e I^B . El alelo I^O determina el grupo sanguíneo O; el alelo I^A , el grupo sanguíneo A; y el alelo I^B el grupo sanguíneo B. Puesto que tenemos dos copias de este gen, hay varias combinaciones posibles, cada una de las cuales termina por determinar un grupo sanguíneo concreto:

$I^O I^O$ - grupo sanguíneo O
 $I^A I^A$ o $I^A I^O$ - grupo sanguíneo A
 $I^B I^B$ o $I^B I^O$ - grupo sanguíneo B
 $I^A I^B$ - grupo sanguíneo AB

También los genes que intervienen en la formación y el funcionamiento del cerebro presentan distintos alelos, que condicionan su funcionalidad y, en consecuencia, influyen de una u otra manera en la manifestación de la característica biológica a la que contribuyen. Esto implica que existan predisposiciones genéticas hacia cualquier característica mental, como se verá a continuación.

2.4. Regulación de la expresión génica: los programas genéticos

Dentro de estos procesos generales, cada célula hace funcionar únicamente los genes que necesita, cuando los necesita y en la intensidad que precisa para realizar su función de la mejor manera posible. Una neurona y una célula epitelial, por ejemplo, tienen el mismo genoma, pero no deben tener los mismos genes funcionando o expresándose, como se suele decir en terminología genética. La expresión génica se puede regular de distintas maneras, como por ejemplo a través de los denominados *intensificadores* y los factores de transcripción, y de las modificaciones epigenéticas.

2.4.1. Intensificadores y factores de transcripción

Los genes, como se ha dicho, forman parte intrínseca de las largas hebras de ADN. Sin embargo, no suelen estar pegados uno al lado de otro. Entre ellos suele haber grandes trechos de ADN que no contienen genes. En estas zonas intergénicas, como se las denomina, se encuentran un gran número de otras secuencias de nucleótidos que actúan a modo de “interruptores moleculares”. Se denominan, de forma genérica, *intensificadores*, y su función es regular la expresión de los genes (figura 2.4). El flujo de información

génica, es decir, el paso de información de los genes del ADN para fabricar las proteínas correspondientes, no se inicia si estos interruptores moleculares no lo activan.

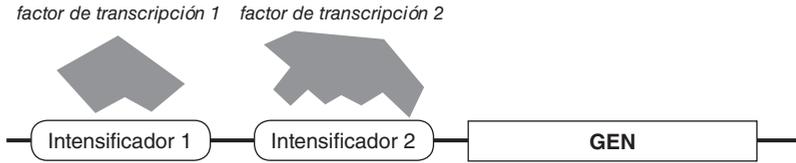


Figura 2.4. Regulación de la expresión génica mediante intensificadores y factores de transcripción.

Se han identificado unos 110.000 intensificadores diferentes en el genoma humano. Los hay que indican al gen o a los genes que regulan cuándo deben expresarse; otros, en qué lugar, etc. También los hay cuya función es evitar que se exprese el gen que regulan. En este caso se denominan *silenciadores*, pero el mecanismo básico de funcionamiento es el mismo. Este sistema constituye una manera muy efectiva y refinada de regular la expresión de los genes, para que cada uno solo se exprese dónde y cuándo sea necesario.

A los intensificadores y a los silenciadores se les unen unas proteínas específicas, que se denominan genéricamente *factores de transcripción*. La unión de estos factores de transcripción activa o inhibe la expresión del gen correspondiente, según se trate de un intensificador o de un silenciador. Es un sistema que funciona de manera combinatoria, activando o alternativamente inhibiendo la expresión génica en función de los intensificadores y silenciadores que tenga cada gen y de los factores de transcripción concretos que tengan unidos.

Los genes no suelen funcionar de manera aislada, lo que constituyen la base de los *programas genéticos*. Un programa genético está formado por la interacción de diversos genes que actúan de manera sinérgica para dotar una célula de una característica específica. En este contexto, el funcionamiento de los distintos tipos de neuronas que forman el cerebro humano se sustenta en programas genéticos.

2.4.2. Modificaciones epigenéticas

La regulación de la expresión génica mediante intensificadores, silenciadores y factores de transcripción constituye un sistema muy eficiente y de respuesta rápida, que permite activar o desactivar los genes de manera dinámica para que las células puedan responder a los posibles cambios de su entorno. No obstante, es energéticamente muy costoso. Cuando una célula debe tener siempre unos genes concretos activados, o alternativamente

desconectados, la fabricación constante de los factores de transcripción adecuados le consume unos recursos energéticos muy valiosos. En estos casos intervienen las *modificaciones epigenéticas*.

Las modificaciones epigenéticas se basan en la adición controlada de determinadas moléculas a la hebra de ADN o alternativamente en las proteínas histonas que lo acompañan (figura 2.5). Estas moléculas, que pueden ser de distintos tipos, no alteran de ningún modo el mensaje que contienen los genes, pero contribuyen a regular su expresión. Las más habituales son las denominadas *metilaciones* y las *acetilaciones*, aunque no son las únicas. Las modificaciones epigenéticas que se producen sobre la hebra de ADN son siempre metilaciones (adición de un grupo químico denominado *metilo* a zonas concretas y específicas del ADN), y las que se dan en las proteínas histonas pueden ser acetilaciones, metilaciones o de otros tipos.

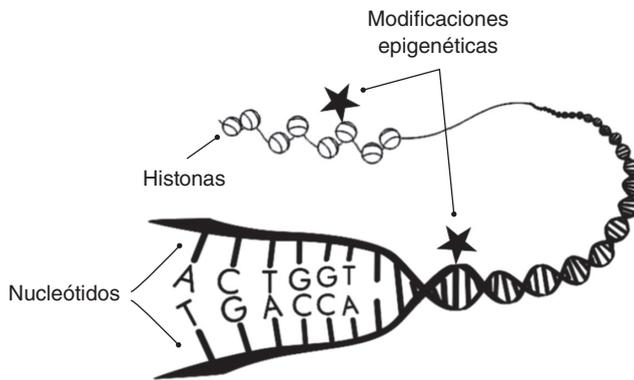


Figura 2.5. Modificaciones epigenéticas establecidas sobre la hebra de ADN y las proteínas histonas que la acompañan.

La diferencia de las modificaciones epigenéticas con respecto a los factores de transcripción es que son moléculas estructuralmente mucho más sencillas y, además, una vez unidas permanecen en ese sitio durante mucho tiempo, a menudo durante toda la vida de esa persona, sin que sea necesario ir produciéndolas constantemente. Estos dos hechos hacen que sea un sistema de regulación de la expresión génica mucho más económico desde el punto de vista energético, y muy útil cuando se trata de tener un gen siempre activo o alternativamente siempre silenciado.

El conjunto de modificaciones epigenéticas de una célula se denomina *epigenoma*. En este sentido, es importante destacar que todas las células de un individuo tienen el mismo genoma, exactamente el mismo conjunto de genes y de alelos, pero cada célula o cada grupo de células especializado en una tarea concreta tiene su propio epigenoma,

adecuado a la función o a las funciones que deben realizar. Las metilaciones sirven para bloquear la expresión de los genes adyacentes a ellas, y las acetilaciones para activarlos.

Uno de los aspectos relevantes de las modificaciones epigenéticas en el campo de la educación es que muchas de ellas se establecen por interacción con el ambiente. Dicho de otro modo, es un sistema muy efectivo para incorporar los condicionantes ambientales al funcionamiento cotidiano de los genes, lo que a su vez repercute en el funcionamiento de las células donde estos realizan su función. Y esto incluye las neuronas que forman el cerebro. Las experiencias vitales y los propios aprendizajes condicionan cómo funcionarán los genes que contribuirán a la manera en que va a continuar aprendiendo ese cerebro.

Ejemplo 2.4

Un trabajo publicado en 2010 por Alexa H. Veenema y sus colaboradores, en la Universidad de Massachusetts, en los Estados Unidos, demostró en ratas que la sensación de abandono que pueden experimentar las crías durante las dos primeras semanas de vida propicia cambios en la expresión de algunos genes que condicionan el comportamiento que manifestarán cuando sean adultas, haciéndolas más agresivas y disminuyendo sus capacidades de socialización. Son, además, menos curiosas, lo que hace que tiendan a rehuir las novedades.

Sin que se puedan descartar completamente los efectos del aprendizaje y la imitación, que también están comprobados y sin lugar a duda son muy importantes, se ha visto que las ratas de este experimento muestran cambios en la expresión de diversos genes, debidos a modificaciones epigenéticas específicas. Destacan cambios epigenéticos en los receptores de la vasopresina y de la oxitocina en diversas zonas de la corteza cerebral. La vasopresina es una hormona que actúa como neurotransmisor gestionando situaciones de miedo y en las relaciones sociales, y la oxitocina actúa a nivel cerebral fomentando los lazos maternos, aumenta la confianza y disminuye el miedo social y favorece la empatía. También se ha visto que esta separación produce un aumento significativo en la expresión de otro gen concreto, el receptor de glucocorticoides, en una zona específica del cerebro, el hipotálamo. La función de este receptor es recibir las señales que transmiten los glucocorticoides, unas neurohormonas que, entre otras funciones, contribuyen a gestionar el estrés.

Dicho con palabras coloquiales, las crías de rata que han recibido atención materna, por este simple hecho, tienden a ser adultos más tranquilos y curiosos porque pueden gestionar mejor las situaciones de estrés. En cambio, las crías que reciben poca atención, al crecer tienden a ser más ansiosas y ariscas, a partir de determinadas modificaciones epigenéticas. Las personas compartimos el 95% de nuestros genes con estos animales, así que es de suponer que se produce un efecto similar. El ambiente de infancia condiciona las respuestas posteriores a los aprendizajes, influyendo, al menos en algunos casos, en las modificaciones epigenéticas que regulan la expresión génica.

Hay muchos estudios de correlación realizados en la especie humana en los que se pone de manifiesto que las experiencias vitales condicionan la formación del epigenoma, lo que influye en la manifestación de diversos comportamientos, incluidos los relacionados con el aprendizaje. Incluso el simple hecho de aprender cosas o aptitudes nuevas favorece que se hagan modificaciones epigenéticas en algunos genes de actuación cerebral que facilitan el funcionamiento de las neuronas e incrementan la capacidad de continuar aprendiendo, en un círculo vicioso que favorece la incorporación de nuevos conocimientos a los que ya se tienen. Se podría profundizar mucho en este tema, pero lo importante es considerar que las experiencias que se ofrecen a los niños y adolescentes, y las experiencias que forman parte de su bagaje cuando llegan al aula, condicionan su respuesta a los aprendizajes, también en cuanto a funcionamiento genético.

Ejemplo 2.5

En un trabajo publicado en 2018 por Elena L. Grigorenko y sus colaboradores se demostró que la parentalidad negativa, definida como la relación basada en poca o nula calidez afectiva, en la indiferencia o la negligencia, y el rechazo o la hostilidad, en comparación con la parentalidad positiva, que implica la afectividad basada en la confianza y el cuidado no sobreprotector, y en la coherencia entre recompensas y amonestaciones con finalidad educativa, estimula modificaciones epigenéticas que predisponen a las personas afectadas a manifestar síntomas depresivos posteriormente en su vida, durante la adolescencia y la edad adulta.

De forma análoga se ha identificado que determinados traumas de infancia, como el acoso emocional y el abuso sexual, producen efectos similares a través de modificaciones epigenéticas (revisado por Bueno, 2019).

2.5. Heredabilidad del comportamiento humano

El comportamiento humano, incluidos los aspectos relacionados con los mecanismos de aprendizaje, se ve influido por los genes, pero no cabe duda de que el ambiente resulta crucial. Para discernir hasta qué punto pueden influir los genes se usa el concepto de *heredabilidad*.

2.5.1. Genes y ambiente

Hay genes que determinan una característica biológica, mientras que otros solo la influyen. *Determinar* no es lo mismo que *influir*, y esta diferencia es crucial cuando se aborda el tema de la genética en contextos de aprendizaje. Algunos de los 20.300 genes del genoma humano determinan características biológicas concretas, sin concesiones de ningún tipo, como

sería el caso del sistema sanguíneo ABO. Otros, en cambio, solo predisponen (o influyen). Es lo que sucede con muchos, si no todos, los genes que de una manera u otra intervienen en la construcción y el funcionamiento del cerebro: condicionan o predisponen el resultado final, pero por sí solos no lo determinan de manera estricta. El resultado final se ve influenciado por los genes, pero también por el ambiente donde vive y se forma esa persona.

Ejemplo 2.6

Hay un gen llamado MAO-A (acrónimo de monoaminoxidasa de tipo A), por ejemplo, que está implicado en la gestión de algunos neurotransmisores del cerebro. Los neurotransmisores son las moléculas que permiten que las neuronas se comuniquen entre ellas. La función biológica de este gen es degradar algunos neurotransmisores que ya han sido usados para evitar que se acumulen. MAO-A presenta diversos alelos, como los denominados *variante larga* y *variante corta* (porque, como su nombre indica, uno es un poco más largo que el otro).

Las personas que tienen dos alelos largos o bien uno de cada suelen tener un carácter más tranquilo y reposado, más reflexivo ante cualquier situación externa. Las personas que tienen dos alelos cortos, en cambio, suelen ser más impulsivas, pero no siempre. Si una persona con dos alelos cortos se ha educado y vive en un ambiente relativamente estable, no manifestará esta mayor impulsividad, o al menos lo hará con mucha menos frecuencia que si ha sido educada en un ambiente conflictivo.

En la manifestación de estos rasgos intervienen tanto los genes, según cada alelo, como también el ambiente, entendido en sentido amplio; esto es, cualquier aspecto exterior con que nos relacionemos. Los genes predisponen, pero el ambiente favorece que esa característica se manifieste en mayor o en menor grado.

Para valorar el grado de contribución genética se ha desarrollado el concepto de *heredabilidad*. La heredabilidad es el porcentaje (%) de la variancia entre dos individuos de una población con respecto a una característica biológica que es atribuible a diferencias genéticas. El resto de las diferencias dependerá del ambiente, entendido en sentido amplio; esto es, social, familiar, educativo, climático, etc., incluidas las experiencias azarosas e imponderables. En este sentido, es necesario distinguir entre el ambiente compartido, común a los individuos que se comparan en cada estudio, y el no compartido, que depende de sucesos azarosos acaecidos en la vida de cada uno de ellos. Lo que no indican los valores de heredabilidad es qué genes concretos influyen en cada característica, ni tan siquiera cuántos genes hay implicados, en virtud de los distintivos y variados programas genéticos que constituyen la base del funcionamiento de las células. Solo como curiosidad, hay métodos genéticos que sí permiten identificar estos parámetros, como por ejemplo a través del estudio de polimorfismos de un nucleótido (SNP, o *single nucleotide polymorphisms*), pero su descripción va más allá del objetivo de este libro.