

Los sistemas receptores



Jaime Reguart Pelegrí

Los sistemas receptores

Marzo 2018

A partir de la serie “*Los sistemas receptores*” editada en el blog El Cedazo.

(<https://eltamiz.com/elcedazo/series/los-sistemas-receptores/>)

Imagen de portada: Obtenida en la red, fair use.

Licencia CC BY-NC-ND 2.5 ES

El único coste será el exclusivo de edición. El autor.

ÍNDICE

Prólogo 5

- 01. Introducción 9
- 02. Un poco de anatomía para una navegación confortable 14
- 03. Los primeros talleres en el procesamiento cerebral de las señales somatosensoriales 22
- 04. Los caminos de la información 31
- 05. El tacto 42
- 06. La propiocepción 49
- 07. Sistema vestibular I: Los sensores 55
- 08. Sistema vestibular II: Procesos 60
- 09. Dolor y temperatura 66
- 10. La visión I. Detección 74
- 11. La visión II. Procesos intermedios 83
- 12. La visión III. Procesos superiores 92
- 13. La audición I. Detección 100
- 14. La audición II. Procesos superiores 107
- 15. Sistema sensorial del olfato 114
- 16. Sistema sensorial del gusto 124
- 17. La interocepción 132
- 18. Más allá de los cualia 142

ANEXO I: El GPS biológico. Sentido de orientación 149

ANEXO II: Sentido de la propia identidad (Yo y consciencia) 164

Los sistemas receptores

Siempre me he preguntado sobre lo que me parecía observar. Ahí afuera da la impresión de que hay una serie variadísima de experiencias, desde piedras grises a brisas cálidas, desde espinas punzantes a olas ruidosas. Sin todo ello no podría ser yo mismo, no tendría referencias sobre las que construir nada. Solamente sería un globo aislado, atendiendo a mi interior, sin entender nada. Hasta que de pronto dejara todo de existir de una forma igualmente sorprendente. Soy yo, gracias a que experimento referencias fuera de mí, que me construyen un escenario en donde la evolución me ha colocado y que es mi casa. Ahí está, y con mi cerebro soy consciente de su realidad.

Se me antoja que la interfaz entre la supuesta realidad externa, y la refleja realidad interna, tiene que ser decisiva. Cuántas deformaciones se producen al tener cualquier deficiencia o patología en las vías que unen mundo y cerebro. O en las de procesamiento interno de la información sensorial. Las más evidentes, como la ceguera, la lepra, la sordera... o algunas más desconocidas como el síndrome de Riley-Day por el que no sentimos el dolor, o la prosopagnosia por la que no somos capaces de reconocer los rostros de las personas que tenemos delante, o el daltonismo que incluso puede llevar a ver el mundo en gris, o la ageusia por la que todo nos sabe a nada... y tantas otras disfunciones que evidentemente tienen que afectar a la manera como el cerebro hace percibir nuestro yo.

Motivado por el interés que me produce esta realidad funcional de nuestro organismo y nuestra personalidad, se me ocurrió el profundizar un poco en estos procesos vitales, desde un punto de vista exclusivamente anatómico, y saber por qué caminos transcurre la información exterior captada por nuestros sentidos y cuáles son los destinos en el sistema nervioso. Como siempre, mi forma de trabajar, debido a mi falta absoluta de memoria, ha sido el leer, visionar, consultar... extrayendo notas de todo aquello que me parecía interesante. Para luego ir las “pegando” en lo que me parece un hilo argumental lógico. Me gusta escribir, me gusta cómo suena el idioma -me da igual cuál-, así que el siguiente paso fue, como ha sucedido en otras series que he publicado en el blog “*El Cedazo*”, el trenzar un relato literario con la cadena de información preparada. Esta vena “escritora” me lleva muchas veces a ser un poco retórico y reiterativo, lo sé. Pero la verdad... es que disfruto con ello, aunque quizás vaya en ocasiones en contra de la sencillez y la claridad. Pido excusas al que esto le suponga una barrera en el entendimiento de lo expuesto.

A pesar de ello, y quizás porque sea obra mía, creo que mi escrito es útil para aquellos que sientan una curiosidad pareja a la mía y, aunque las redes de información son riquísimas, expongo esta especie de cuaderno de campo a la consideración de quien quiera seguir adelante. Objetivo: compartir... y aprender con vuestros comentarios (no olvidéis que este trabajo se publicó en un blog sujeto a útiles comentarios).

Delante de vosotros tenéis una exposición de lo que llamo “*Los sistemas receptores*”. Comienzo con unos capítulos en los que introduzco conceptos básicos anatómicos y fisiológicos, necesarios para entender mejor lo que va a seguir. Que no es, ni más ni menos, que seguir uno a uno todos los sentidos que proporcionan información del exterior o del interior a nuestro cerebro. Seguir la información desde el punto de entrada, donde algún sensor corporal se da por aludido, hasta las regiones finales del sistema nervioso a donde llega la información sensorial. Ya es harina de otro costal el saber qué es lo que hace el cerebro con todo ello.

Un dato: creo que os sorprenderá el conocer que los soportes de cualquier información sensorial son idénticos, desde el que instruye sobre el dolor hasta el que lo hace con el gusto, desde la temperatura al olfato, para todos y cada uno de los sentidos. Entonces ¿cómo se genera la diversidad de percepciones? La explicación la debemos buscar en la evolución. Las circunstancias ambientales van modelando a las partes de nuestro organismo, con el resultado de que van “sobreviviendo” aquellas que permitieron a nuestros antecesores reproducirse más. No hay un plan general, por lo que deberemos pensar que para cada estímulo exterior el organismo se las arregló de forma individual y específica, dentro de un patrón global de equilibrio. Y, al igual que la evolución, partiendo de cuatro extremidades ancestralmente análogas dotó al animal humano de dos para coger y dos para andar, también tuvo que desarrollar a partir de un conjunto análogo de células sensibles -protoneuronas- un bloque para la vista, y a su lado el del olfato, y a su lado el del equilibrio... La evolución vio que las interconexiones entre estos bloques también aportaban una ventaja y permitió el procesamiento conjunto de los módulos individuales...

En definitiva, esta historia acerca de “*Los sistemas receptores*” es para mostrar, en el fondo, que a pesar de la igualdad en los bits de entrada, estos se discriminan produciendo diversidad de perceptos al llegar a los sitios adecuados en el cerebro. Y que las experiencias son más que subjetivas, unas construcciones de nuestro sistema nervioso.

Pues eso es un poco lo que pretendo poner en común en este libro: Los sistemas perceptores y sus rutas por el sistema nervioso. Que lo disfrutéis.

01: Introducción

“La mente humana no percibe ningún cuerpo externo como si existiera realmente, excepto a través de las ideas de las modificaciones de su propio cuerpo”.

Benedicto Spinoza^[1] en su obra “*Ethica*” publicada en 1677.

En este libro sobre **los sistemas receptores** me propongo analizar los sistemas corporales receptores de las señales que, en líneas generales, necesita el organismo para interactuar con su medio. Son sustanciales en sí mismos, ya que son los mensajeros en los que nuestro director de orquesta vital, el cerebro, confía para poder realizar sus funciones. Funciones que a todas luces se nos ocurren trascendentales para nuestra supervivencia.

Como dice el neurólogo Rodolfo Llinás, el cerebro es una caja negra. En el camino de la evolución de los artrópodos hacia los animales vertebrados, el exoesqueleto de los primeros se fue dando la vuelta para posicionarse en el interior del cuerpo al que da sustento. Menos... pues sí, el cerebro que quedó encerrado en una caja ósea: el cráneo. Tiene su sentido, ya que, así, el que puede considerarse como el órgano principal para mantener nuestro delicado equilibrio químico vital quedaba en una posición de máxima protección frente a acciones que venían del exterior. No sólo esto, ya que, a su vez, fisiológicamente está parcialmente aislado de lo que pueda venir a través del sistema circulatorio, que lo alimenta y lo limpia, gracias a una serie de células gliales que llevan a cabo la función de frontera hemodinámica. Aclaramos que las células gliales son las grandes olvidadas de la población encefálica, en donde parece que sólo hay que tener en cuenta a las superestrellas, las neuronas. Por cada neurona hay diez gliales. Pero no es momento de hablar de ellas.

Volvamos a nuestra caja negra. El encéfalo queda, pues, encerrado en su jaula de aislamiento en donde no tiene más interfaz con el medio exterior que la que le viene a través de las señales que le envían los

receptores sensoriales. Bien como señales eléctricas a través de los nervios craneales o periféricos -que actúan a nivel de la médula-, o como señales químicas que le vienen a través del torrente circulatorio o de la linfa. Es en esta circunstancia anatómica donde encuentro la gran trascendencia, la asombrosa importancia, de nuestras antenas sensoriales. Sin ellas el cerebro “encerrado” no podría llevar a cabo sus maravillosas y vitales funciones.

El cerebro humano es capaz, no sólo de dirigir la fisiología del cuerpo, sino también de llevar a cabo funciones que nosotros conceptuamos como de orden superior. Recibe señales con las que contextualiza el medio interno y externo en un determinado momento. Compara con sus patrones internos de funcionamiento y decide una actuación que pueda ser coherente con la información recibida, normalmente con un propósito último, que suele ser motor. Actuación que no tiene que ser la mejor ni la más eficaz. Hecho esto, el cerebro desconecta, mientras el organismo actúa siguiendo sus órdenes, para con posterioridad recibir a través de los inputs actualizados por los receptores sensoriales la información de la nueva situación del organismo en su entorno. Con esta nueva información, y en base a los mismos modos de funcionamiento -comparar con sus patrones internos-, modifica el rumbo, comenzando un nuevo ciclo.

Como veis, el cerebro no tiene un modo continuo de funcionamiento sino un modo *digital*, podríamos decir. No puede funcionar en analógico, ya que la información que debe manejar, las infinitas alternativas que debe sopesar y la coordinación tan endiablada que debería realizar sobre los innumerables mecanismos del cuerpo -prácticamente a nivel de respuesta celular- es tan astronómica que el propio cerebro colapsaría. No le queda más remedio que -y así se observa al estudiar su origen y devenir evolutivo- actuar mediante un tren de fotogramas generados en base a la información recibida y a las valiosas pautas internas, patrones de respuesta corporal, que incorpora su genética y que adapta en su epigenética. Inventa, propone, observa resultados y corrige. Y si las señales que le dicen como está de bien o mal la interfaz cuerpo-exterior en cada momento no existen o son manifiestamente erróneas... mal puede cometer su función de preservar el equilibrio homeostático.

Mencionaré que la consecuencia de esta forma de funcionar, el **inventar el exterior**, ha sido objeto de preocupación e interés a lo largo de la historia de la humanidad. ¿Es lo exterior real o sólo un constructo cerebral? ¿Vivimos una mentira, una ilusión personal? Como aseguran los neurólogos y filósofos constructivistas, parece probable el hecho de que la realidad, lo que es el objeto de nuestras percepciones, no deja de ser más que un útil invento de nuestras neuronas, un código universal de señales -aunque no tienen por qué ser percibidas universalmente como iguales- que nos permite interactuar eficientemente, desde el punto de vista vital, con lo que sea el exterior. De ahí la tremenda importancia de los sistemas sensoriales, que no por casualidad fueron surgiendo a lo largo de la evolución como eficientes asistentes del encéfalo. Merece la pena que los conozcamos y que sintamos la especial sensación de asombro al saber cómo dirigen nuestra vitalidad.



El Universo está en nuestro cerebro. Los sentidos nos ayudan a construirlo (imagen: de la red, fair use)

Evidentemente, los sistemas sensoriales son parte del milagro. El resto lo pone el cerebro, sus neuronas y su particular organización. Condición de la que deberíamos pensar también en profundidad ya que es parte importante en la concreción y la percepción de nuestra humanidad: ¿soy algo más o soy simplemente un milagro de la materia y la energía?

Volvamos a los sentidos. Tradicionalmente se nos ha explicado un abanico de cinco sentidos: la **vista**, el **oído**, el **olfato**, la **vista** y el **tacto**. Pero la nómina es más extensa, ya que a estos cinco hay que añadir el sentido del equilibrio o **vestibular**; el sentido de la

propiocepción o de la posición corporal; el sentido de la **interocepción** o de la situación fisiológica interna; o el sentido de la **nocicepción** o de la percepción del dolor -o temperatura-. A partir de unos se van a generar percepciones que notaremos de forma consciente, mientras que el resultado del trabajo de otros va a quedar en el subconsciente. Unos tienen la misión de la supervisión lejana, como la vista o el olfato; otros la de corto alcance, como el gusto, el tacto o la capacidad de sentir el dolor; otros aún más a corto, tanto que detectan información interna, como la interocepción, mientras que otros actuarán como giróscopos ante campos de aceleración. Hablando del conjunto de sentidos no “clásicos” es lógico el pensar que la torre de control y mando, que es el encéfalo, precisará de algo más que la información exteroceptiva de los cinco tradicionales más la nocicepción, ya que la tiene que integrar con su propia realidad tanto posicional propioceptiva como con la interocepción de la situación del propio equilibrio químico interno. Y todo esto en cada momento, con lo que conforma un todo informativo: exterior más interior.

Lo más sorprendente de todo ello es que, a pesar de los múltiples sistemas sensoriales que dan servicio al cerebro, ninguno da señales especiales propias: todos transducen la situación exterior, o lo que sea que detecten, a un mismo tipo de respuesta, lo que en neurología se conoce como un **potencial de acción** -o una cadena de ellos- que no deja de ser más que una variación del potencial eléctrico en las neuronas, particularmente en sus axones y dendritas, que va desplazándose a través de estas ramificaciones neuronales conformando algo semejante a una corriente eléctrica. Las variaciones de potencial mencionadas, que al final conformarán la señal eléctrica neuronal, se producen en las membranas de las células y son consecuencia de un juego de permuta de iones entre el interior y exterior de las mismas. Los mecanismos para ello son físicamente muy semejantes en todas ellas. No en vano prácticamente todas las células tienen un medio interior -el citoplasma- químicamente semejante, y un medio exterior también muy parecido, de aquí que todas propongan patrones similares. Y aunque las neuronas de la retina -vista- son distintas a las neuronas de la cóclea -oído-, por poner un ejemplo, ambas producen señales semejantes. Señales que

llegan a estructuras cerebrales específicas y que allí son interpretadas como diferentes, ya que, a la postre, unas darán como resultado la percepción de vista y otras la percepción de sonido. Quizás lo más fácil del proceso sea el intuir que, ya que la señal de entrada al cerebro es siempre la misma, la interpretación de la percepción la tienen que definir los núcleos neuronales que las reciban. Lo neurológicamente difícil es determinar por qué un núcleo nos proponga **la percepción** de color verde y otro **la percepción** de los sonidos agudos... ¿cómo lo gestiona el cerebro? Hoy por hoy es el gran misterio de lo que se conoce como los *cualia* o las percepciones subjetivas de cada individuo. Lo cual nos lleva al constructivismo mencionado antes: el cerebro de cada uno inventa y propone algo coherente y eficiente con el hecho de seguir viviendo. Una comida peligrosa me la “colorea” con la sensación de amargor. Pero al ser un invento cerebral, ¿es *tu* amargo igual que *mi* amargo? Y rizando más el rizo, ¿por qué rayos una sensación exterior muy específica percibida en mi boca y transmitida a mi cerebro, éste me lo propone como “amargo”?

Aunque no sigo por ahí, ya que estas últimas consideraciones se escapan al propósito de esta serie, que estará dedicada en exclusiva a la maravilla de nuestras antenas sensoriales. Ciertamente, aunque los procesos cerebrales sean cuasi milagrosos, está claro, al menos para mí, que no enmascaran la importancia de los procesos sensoriales a cuyo conocimiento, sin duda, es obligado, e ilusionante, dedicar nuestra atención. Y en esto estamos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 01:

1. Filósofo de raíces sefardíes portuguesas, país de donde había sido expulsada su familia que recaló en la Holanda del siglo XVII. Nació en Amsterdam en 1632 ciudad en la que creció en el seno de una familia de mercaderes y donde desarrolló su pensamiento libre. Con el tiempo sus ideas provocaron que sus correligionarios judíos le expulsaron de la sinagoga y de su pueblo. Gran pensador cuyas tesis, rechazadas de plano por la sociedad de su momento, son consideradas por muchos como las precursoras que sentaron la base del pensamiento ilustrado del siglo siguiente.

02: Un poco de anatomía para una navegación confortable

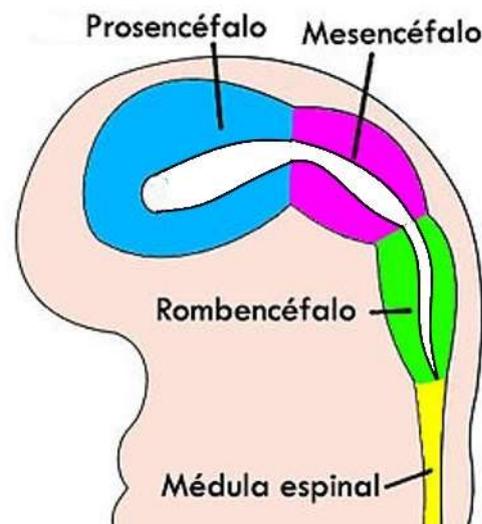
El título de este capítulo es lo suficientemente aclaratorio. Tras el capítulo introductorio anterior, y para no perdernos durante las descripciones de los diversos sistemas sensoriales que sirven al sistema nervioso, descripciones que necesariamente precisan de menciones anatómicas, vamos a dedicar este capítulo a introducir un recorrido a vista de pájaro -no por su perspectiva externa, sino por lo poco detallado y general- de la estructura del sistema nervioso. Comencemos.

El sistema nervioso, como es lógico imaginar, está repartido por todo el organismo. Es preciso vigilar y comandar cualquier parte de nuestro cuerpo con un objetivo primordial, que es el de conseguir mantener el equilibrio químico vital de cada una de nuestras células y del conjunto general. Hay que acercarse a la comida, huir del peligro, aproximarse a la posible pareja y alejarse de los deshechos. Para ello el sistema nervioso adopta una arquitectura que podríamos diferenciar en varias partes, con un sentido lógico de intercomunicación.

Resulta muy didáctico el profundizar en esta arquitectura a partir de observar lo que ocurre durante el desarrollo embrionario. A fin de cuentas, el órgano tan complejo que nos parece ser el cerebro, su tamaño globular, sus circunvoluciones externas, sus núcleos escondidos, sus interconexiones internas, todo provienen de una sencilla estructura inicial que es muy fácil de entender porque tiene todas sus partes dispuestas de una forma muy elemental, casi podríamos decir “todo a la vista”. Por eso propongo iniciar por ahí.

Vayamos entonces a un embrión humano en el momento en que se está cumpliendo su tercera semana de edad. Es una especie de plánula alargada, con tres capas celulares superpuestas y una serie de orificios internos dispuestos según un eje longitudinal, el que al fin será el eje fronto-caudal del individuo adulto.^[1] A uno de estos orificios

tubulares se le conoce como tubo neural, y de él derivará todo el sistema nervioso central. Vamos a centrarnos en este tubo cerrado por ambos extremos, una especie de globo alargado con unas delgadas paredes celulares que desarrollarán toda la complejidad y riqueza del tejido neural. El interior quedará siempre hueco y relleno por lo que se conoce como líquido raquídeo, un buen amortiguador de golpes y presiones internas a la vez que suministrador de nutrientes o basurero de residuos.



Los comienzos del sistema nervioso en un embrión (Imagen a partir de Wikimedia, CC Attribution 3.0 Unported)

En la parte frontal de este globo, con el paso del tiempo, se van generando una especie de ensanchamientos -inicialmente tres-, distribución primaria de lo que será el encéfalo. La parte caudal del globo formará la médula espinal. Lo podemos ver en la figura anterior. Podemos imaginar que la información viajará de y desde el organismo hacia la cabeza, siguiendo recorridos básicos con un orden que se ajustan a este tren de ensanchamientos.

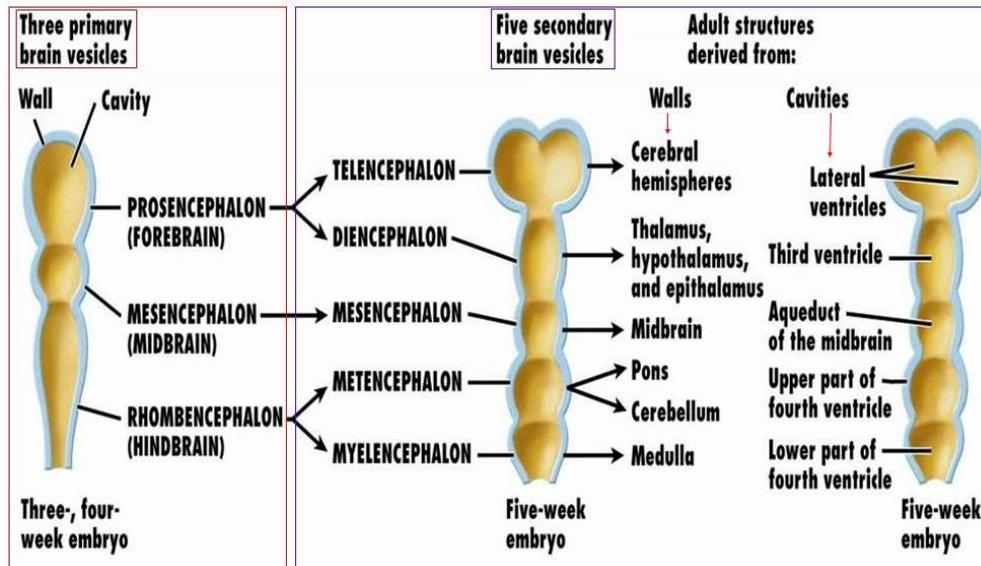
El más próximo a la zona de la médula desarrollará las funciones más vitales, muchas de ellas automáticas y autónomas, como lo son los ritmos respiratorios y cardíaco, la motilidad intestinal, la gestión del sueño-vigilia o el control fino e inconsciente de los movimientos -o incluso de los procesos de razonamiento-. Siguiendo la dirección hacia el extremo frontal aparece el segundo ensanchamiento que

quedará como nexo de unión entre el anterior y el que le sigue, prestando unas funciones de servicio a ciertos sistemas sensoriales -ojos y oídos- e incluso motoras. Por su simplicidad diremos que en su gran parte lo forman unas estructuras en forma de colinas -dos pares- y que por eso se llaman los colículos. El último grano del rosario, el del extremo frontal, devendrá en la mayor parte -en volumen- del cerebro, lo que realmente apreciamos cuando lo podemos ver fuera del cráneo, y que desarrollará las funciones emocionales, sensoriales, motoras y superiores -atención, memoria, análisis, predicción...-. Es fácil imaginar que la información que precisa el sistema nervioso para desarrollar su trabajo, la externa y la interna del propio organismo, básicamente debe confluir en este último ensanchamiento viniendo de los más caudales. Y así es, ya que los nervios que vehiculan tales datos divergirán, o bien del módulo más próximo a la médula, o de ésta misma. En el primer caso se tratan de los nervios craneales -imaginad la cantidad de información que se genera en la cabeza-, mientras que por la médula discurren los nervios espinales.

Ahora que sabemos el fondo vayamos a ponerles nombres: De cabeza a cola, el primer ensanchamiento es el **prosencefalo** (*anterior-encéfalo*), el segundo el **mesencefalo** (*el de en medio-encéfalo*), el tercero el **rombencefalo** (*forma de rombo-encéfalo*) para acabar con la **médula espinal**.

Así que, y creo que no pecho de repetitivo, los datos que maneja el sistema nervioso básicamente entran y salen por la médula y el rombencefalo, atraviesan el mesencefalo y desembocan en el prosencefalo. Fácil. Y además curioso, ya que podemos casi asimilar una menor antigüedad y complejidad evolutiva a medida que recorremos esta cadena de centros de gestión de información. Por decir un ejemplo, reptiles y mamíferos tienen todas estas estructuras, pero en los últimos -evolutivamente más modernos- el prosencefalo es comparativamente descomunal.

Y ya que el prosencefalo ha llegado a ser tan complejo, vamos a abrir una serie de subdivisiones que no creo que introduzcan oscuridad. Nos ayudarán a entender mejor la función del encéfalo.

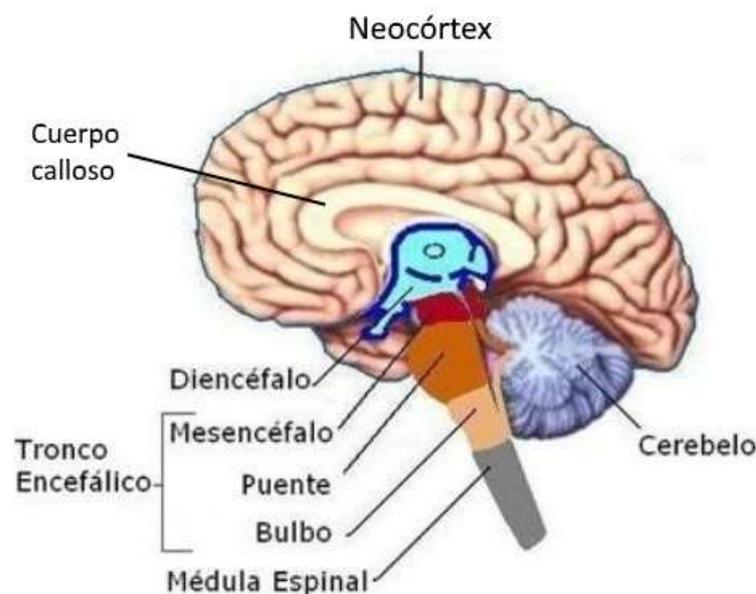


Las diversas partes del sistema nervioso en el embrión (imagen modificada a partir de la red: fair use)

La información que llega a la parte “alta” del sistema nervioso central es tremenda, como podemos imaginar. En este punto la evolución le echó una manita, ya que creó un pequeño y nuevo ensanchamiento en el prosencéfalo, junto al mesencéfalo. Técnicamente se llama **diencéfalo** (*separación-encéfalo*) pero es mucho más conocido como el complejo talámico. Uno de sus principales componentes es el **tálamo**, auténtico portero, registro de entrada y guardia urbano de las señales sensoriales que llegan. Y, dada su posición de conexión entre dos importantes zonas del encéfalo, podéis imaginar que por él pasan casi todas ellas. Básicamente en su camino hacia la corteza.

El resto del prosencéfalo crecerá y se hará sumamente complejo para formar una serie de ganglios internos junto a la zona talámica -con variadas funciones, incluida cierta gestión emocional y motora-, rodeados por una corteza evolutivamente primitiva -memoria y gestión visceral, entre otros cometidos- que a su vez está rodeada de otra corteza, la que se observa a simple vista, evolutivamente más moderna y en donde residen las funciones cerebrales motoras, sensoriales, de memoria y todas aquellas que consideramos de alto nivel. Paleocorteza y neocórtex respectivamente. Son dos palabras que llevan incorporadas en su etimología un claro significado de la flecha evolutiva.

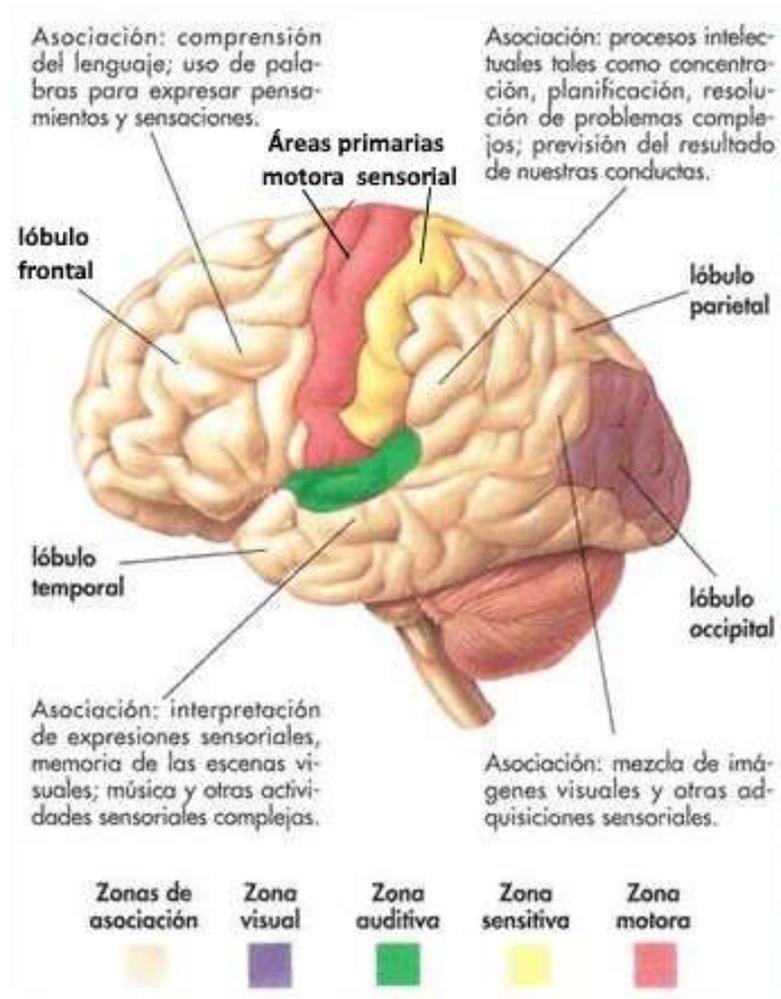
Así que imaginemos un poco. Tenemos un tubo hueco, bueno, relleno de líquido, en el que se van destacando unos ensanchamientos que se van desarrollando con el tiempo. Donde más crecerá en los humanos es en su extremo proencefálico, abrazando a todo el conjunto “talámico” –lo llamaremos así por simplificar aunque allí se encuentran otros ganglios-, que a su vez se desborda sobre las estructuras de entrada al cráneo, el mesencéfalo y rombocéfalo, a lo largo de su crecimiento. Dentro va quedando confinado y deformado el hueco del tubo relleno de líquido cefalorraquídeo. Sobre la zona “talámica”, y rodeando la parte más extrema del hueco interior, va desarrollándose la corteza que rodea otra parte, y que ha ido creciendo sobre la talámica como crecen los granos de maíz en una cazuela de palomitas. Hasta, al final, conformar lo que parece una coliflor abultada y arrugada, un amasijo ordenado de morcillas.



Corte sagital del encéfalo en donde se puede ver sus estructuras internas (Imagen: fair use)

Es necesario saber aproximadamente como está dividido el neocórtex, al menos en cuanto a su configuración externa ya que, en cierta medida, podemos asimilar determinadas zonas a ciertas funciones cerebrales. En principio está dividido en dos hemisferios, derecho e izquierdo, más o menos iguales y unidos interiormente por un gran mazo de nervios que forman lo que llamamos el cuerpo calloso. Hay gente que se permite describirlo como un sabroso

sándwich de hamburguesa: dos panes por fuera y algo por dentro. Los panes por fuera serían la neocorteza, que al abrirla darían luz a la visión del cuerpo calloso, la paleocorteza y la zona talámica en su interior -la hamburguesa-. Lo podemos ver en la imagen de arriba en donde un corte central permite apreciar la parte oculta del cerebro.



Aspecto exterior del encéfalo con la división primaria de sus áreas corticales (imagen: CC BY-NC-SA 3.0 ES)

Cada hemisferio, el pan exterior, está compartimentado en cuatro lóbulos: frontal, parietal, occipital y temporal. En la imagen siguiente podemos ver el aspecto de amasijo de morcillas en que se ha convertido el cerebro al final de su desarrollo ontogénico. A grandes rasgos vemos un gran “casco” superior, una especie de masa “orejera” lateral y una protuberancia posterior mucho más arrugada. El gran casco está dividido por hendiduras, destacando una más o menos vertical casi en el centro, que divide el lóbulo frontal, más

delantero y sobre la cuenca de los ojos, del parietal; y otras hendiduras posteriores, menos claras, que separan este lóbulo parietal del occipital que se sitúa en la parte trasera del cráneo. La “orejera” es el lóbulo temporal, justo por detrás y encima de nuestras orejas. Por último, la arrugada protuberancia posterior es el cerebelo.

En los lóbulos cerebrales podemos definir diversas áreas que aquí no vamos a explicar en toda su extensión. Solamente hago un apunte de lo que interesa a efectos de las percepciones sensoriales, objeto de esta serie. Y como una imagen vale más que mil palabras, podéis ver lo que digo en la anterior. Hay unas áreas primarias en donde llega por primera vez el estímulo sensorial a la corteza o parten las órdenes motoras, y alrededor de éstas unas áreas secundarias o de asociación, donde se realizan procesos más complejos de la percepción y movimiento, y en donde se almacenan datos relacionados de memoria. Es curioso el reseñar que tanto las áreas primarias motora como sensorial tienen una disposición anatómica neuronal -más pronunciada en la sensorial que en la motora- equivalente a la propia disposición anatómica del organismo, aunque no homotéticamente^[2] La localización del proceso de percepción de la sensibilidad de las manos es vecina a la de los brazos, por ejemplo, al igual que la localización del proceso de órdenes motoras de las manos es vecina a la de los brazos. Aunque hay que aclarar que en el caso motor esta localización es anatómicamente más difusa que en la distribución somatosensorial. Así, se habla del homúnculo sensorial, un personajillo imaginariamente situado en la corteza primaria sensorial, cabeza abajo, y de otro homúnculo que “reside” en el área motora. Pero de eso hablaremos en otro capítulo en donde ampliaremos nuestros conocimientos acerca de algunos núcleos cerebrales responsables de una actuación directa en los procesamientos iniciales de las señales sensoriales.

Tras esto ya sabemos lo suficiente acerca de los grandes bloques del sistema nervioso por donde se mueve la información sensorial. Completaremos la información general en el siguiente capítulo, que dedicaremos a las vías específicas de comunicación, lo que podemos agrupar como “los nervios” y su operativa.

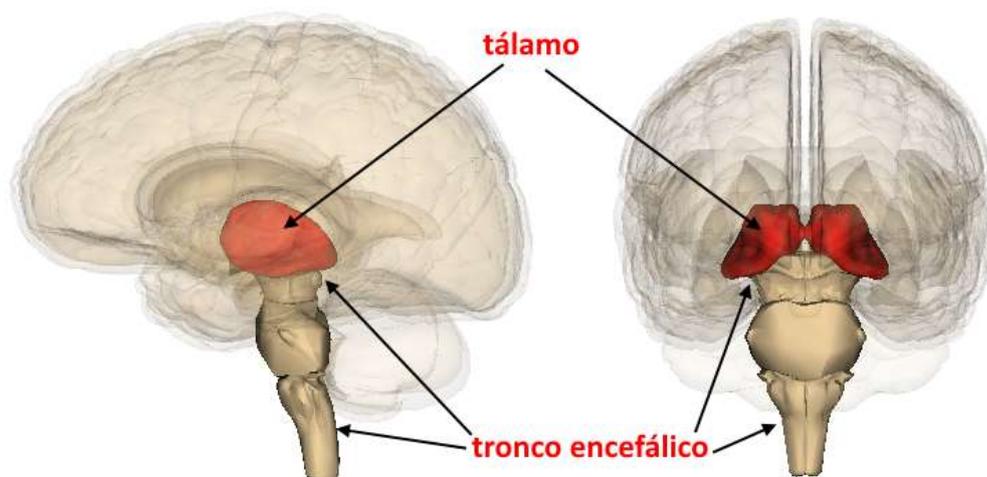
NOTAS DEL CAPÍTULO 02:

- 1.** En esta serie a veces distinguiremos anatómicamente las partes del cerebro según su posición física con respecto a un eje longitudinal. En el sentido del mismo distinguimos la parte frontal y su opuesta la caudal. La parte ventral y la dorsal tienen su explicación según el desarrollo a partir del embrión: en general lo dorsal “mira” a la parte más hacia la superficie del cerebro y la ventral lo contrario. También distinguiremos la parte lateral de la medial: lo lateral creo que es claro y lo medial será la parte interna -hacia dentro del cerebro- con respecto a lo lateral.
- 2.** Si te interesa saber qué es eso de homotéticamente te diré que la homotecia es una transformación que multiplica todas las distancias por un mismo factor.

03: Los primeros talleres en el procesamiento cerebral de las señales somatosensoriales

A lo largo de los capítulos de este libro, van a ir apareciendo con una cierta regularidad un trío de actores: el tálamo, la corteza somatosensorial y la médula espinal. Quizás sea interesante hablar sobre ellos de antemano en vez de sortear las nebulosas de unos fantasmas recurrentes a lo largo de lo que queda de serie.

Decíamos en el capítulo anterior que el **complejo talámico** es una parte muy peculiar del encéfalo. Es el punto de transición entre estructuras casi exclusivamente del sistema nervioso autónomo -con gran presencia en la médula espinal- hacia estructuras de procesamiento emocional y racional que habitan en las “plantas nobles” del encéfalo. En tal posición nos es fácil imaginar cuál pueda ser su cometido general: receptor de las señales sensoriales de entrada y administrador de las mismas, en el sentido de que realiza una criba inicial y un redireccionamiento según necesidades. Y lo mismo que envía datos hacia la corteza los recibe elaborados desde ella para hacer una nueva distribución. Como veis el complejo talámico es un poco la Oficina de Registro del cerebro.



Situación del tálamo en el interior de la masa encefálica (Imagen a partir de wikimedia, CC BY-SA 2.1 jp)

Tiene una forma como de huevo, uno en cada hemisferio, y se encuentra en lo más íntimo de la masa encefálica, rodeado de otros complejos ganglionares. Internamente está dividido en una serie de núcleos, cada uno de ellos especializado en el manejo de cierta información específica. En líneas generales, los más caudales están conectados con las estructuras corticales somatosensoriales, con las de la visión y con las de la audición, mientras que los núcleos más frontales lo están con otras zonas de la corteza, entre las que se encuentran las más frontales, que creemos dedicadas a procesos cerebrales “superiores”.

Una de las habilidades más curiosas del tálamo, resultado de los procesos evolutivos, es la forma como maneja la información sensorial que le llega. Podemos imaginar cómo esta información, por ejemplo la que viene de la retina, tras pasar por los canales del tronco encefálico, “aterriza” por primera vez justo en el tálamo. Si ha llegado esta información hasta el encéfalo es porque, de alguna manera, ha sido útil a lo largo de los tiempos para la supervivencia. Está claro que sirve para detectar la comida, o detectar a una posible pareja u orientarnos por el medio ambiente... pero también ha sido vital para evitar el peligro. Todos los animales que vivimos hoy en día somos descendientes de aquellos que así lo supieron hacer. Y ante el peligro hay que obrar con rapidez, aunque a veces realicemos una acción preventiva innecesaria. ¿Quién no se pone tenso, dispuesto para la huida, simplemente por oír un ruido inesperado? Quizás sea una tontería inocua, pero más vale prepararse para una falsa alarma que acabar nuestros días antes de tiempo. Pues bien, iniciar ese proceso es uno de los trucos del tálamo.

Al recibir la información sensorial este amasijo ganglionar talámico, de forma absolutamente inconsciente –no es un tejido neuronal cortical- la reenvía a la corteza sensorial correspondiente que es la que sí tiene capacidad de análisis y computación. Como explicamos más abajo, podríamos decir que la corteza es la parte más externa del cerebro. Las señales del nervio óptico van a la corteza visual en el lóbulo occipital, las señales auditivas, a la corteza auditiva en el lóbulo temporal o las somatosensoriales –tacto, propiocepción,

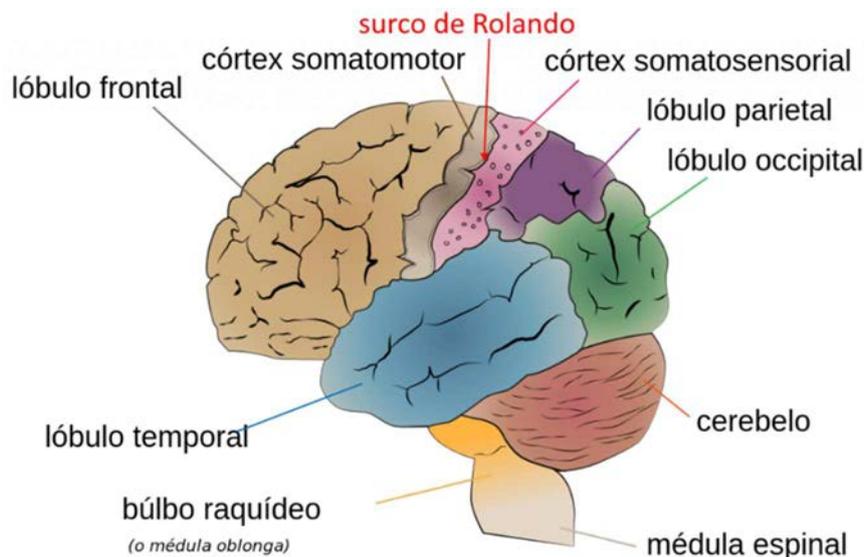
temperatura, dolor...- a la corteza somatosensorial del lóbulo parietal. A partir de ahí el encéfalo empieza a “rumiar” para decidir, por comparación con su historial de experiencias y emociones, si estamos ante una situación de peligro o no. Esta computación, aunque sea rápida, lleva su tiempo... tiempo que puede no ser lo suficiente corto como para que un depredador te arranque la yugular antes de que reacciones. Los animales, y sobre todo los que tienen menos capacidad de razonamiento consciente, los que se mueven por instintos básicos, no se podían permitir estos lujos. Una lagartija no se puede permitir el lujo de “pensar” si el ruido aquel es el batir de alas de un búho, o qué. Por fuerza tiene que reaccionar espontáneamente de forma mucho más rápida. Si no, hoy no veríamos lagartijas a nuestro lado.

De eso se encarga el tálamo, que además de enviar la información a las cortezas lo envía a la **amígdala**, gestora de emociones como puede ser la del miedo. Se trata de otro complejo neuronal que se encuentra muy próximo al tálamo y que, por tanto, recibe su eco a toda velocidad. De una forma mucho más rápida que la directa del tálamo a la corteza. La amígdala se pone en marcha y ordena, de forma absolutamente inapreciable para el animal, un determinado tipo de acciones que lo sitúan inmediatamente en posición de alerta y preparado para la acción. Sudores, taquicardias, inmovilidad, hormonas de estrés, inhibición del dolor... que ponen a punto el cuerpo para cualquiera que sea la estrategia defensiva más adecuada, sea ésta huir, ocultarse o luchar. Mientras pasa esto la corteza sigue “rumiando” su decisión, para llegar con posterioridad a la conclusión, quizás, de que “no pasa nada”, tras la que se relajaría la amígdala, o “aquí pasa algo brutal”, dando las órdenes motoras necesarias. En el fondo nos está diciendo que los pasos que oímos a nuestras espaldas no son los de un posible asesino... o sí.

¿Cómo consigue discernir el tálamo ambas vías, la lenta y la rápida? Muy fácil, lo lleva de diseño –lo veremos también en otras partes del cerebro como, por ejemplo, en las vías auditivas- materializado en dos tipos de neuronas: unas pequeñas -*parvocelulares*- pero con una sensibilidad brutal, que al estimularse son capaces de llevar mucho detalle en la información, y otras más grandes -las *magnocelulares*-

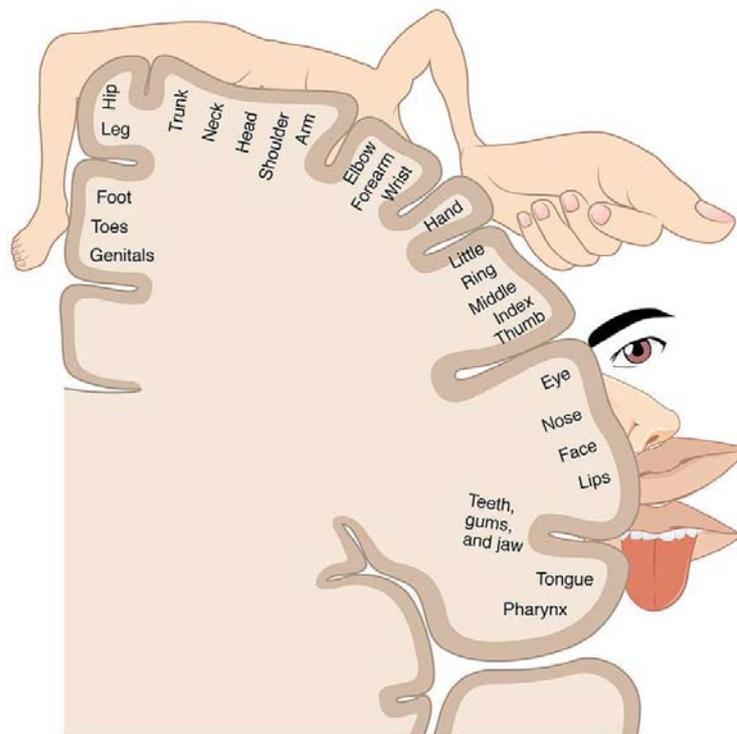
que se excitan mucho más rápidamente a cambio de llevar “poca carga”, la información justa. Las primeras abren la puerta de la información hacia los procesos complejos del córtex, que precisan saber cuánto más de lo que pasa mejor; mientras que las segundas son las que llevan la información rápida, justa pero suficiente, a la amígdala que nos va a acelerar el ritmo cardíaco dispuestos a lo que venga.

Demos unos cuantos pasos adelante en el caudal cerebral de la información. Como ya hemos comentado en el capítulo anterior, más allá del tálamo determinadas señales características –tacto, propiocepción, temperatura, dolor...- alcanzan la **corteza somatosensorial primaria**. Mirando un cerebro desde el exterior es la franja del lóbulo parietal más próxima a una fisura central vertical, que separa ese lóbulo del frontal, y que es conocida como surco de Rolando o surco central. Eso quiere decir que la corteza primaria somatosensorial se encuentra en una posición trasera con relación a este surco. Por delante se quedan las áreas primarias de gestión motora, en el lóbulo frontal, mientras que quedarían más atrás las zonas del lóbulo parietal que manejan aspectos de detalle de los objetos observados –formas, orientaciones, aceleraciones...-.



Esquema donde se puede apreciar la situación del córtex somatosensorial, parte del lóbulo parietal (imagen a partir de wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Vamos a dar un poco más detalle sobre esas áreas primarias que interesan a efectos de las percepciones sensoriales. Básicamente, nos estamos refiriendo a la somatosensorial, tras el surco de Rolando. Es curioso el reseñar que tanto el área primaria motora como la sensorial tienen anatómicamente una disposición neuronal funcional que podríamos calificar de “topográfica”, más o menos equivalente a la propia disposición anatómica del organismo. Aunque, bien es verdad, no homotéticamente equivalentes, lo cual nos parece lógico ya que, por decir algo, los labios se nos hacen mucho más sensibles que la espalda. Los labios deben tener unas áreas de procesamiento proporcionalmente mayores que las de la espalda.

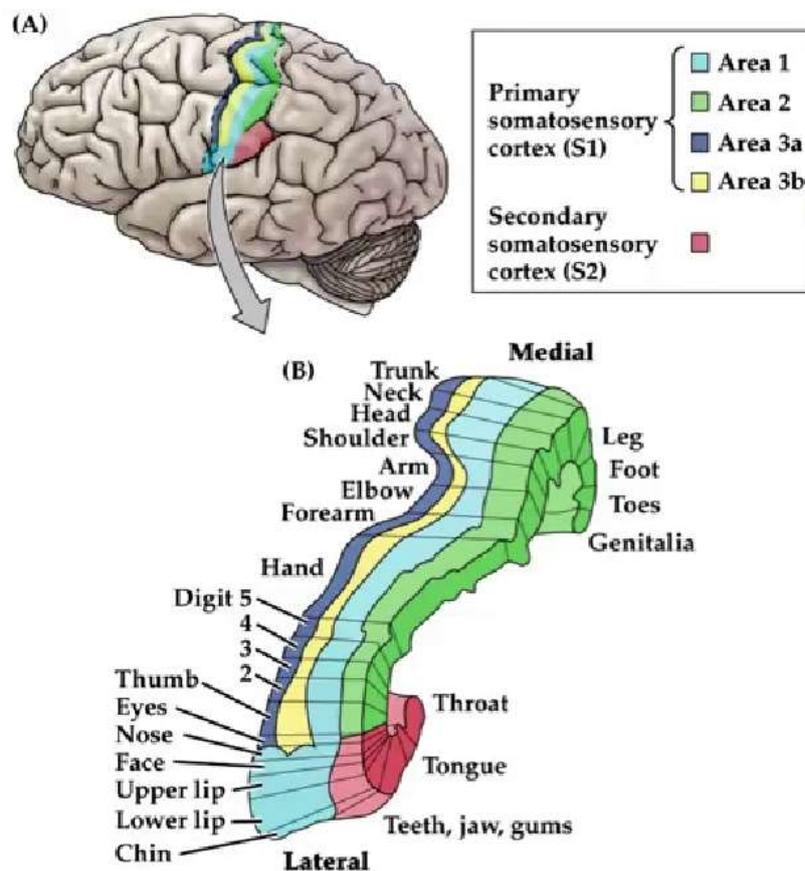


Corte transversal de un hemisferio cerebro a la altura de la corteza somatosensorial, en donde se ha dibujado el homúnculo de Penfield (Wikimedia, CC SY 3.0)

Así, se habla de un homúnculo -un pequeño hombrecito- sensorial imaginariamente situado en la corteza primaria sensorial, cabeza abajo, y del que “reside” en el área motora. La localización del proceso de percepción de la sensibilidad en las manos es vecino al de los brazos, por ejemplo; al igual que la localización del proceso de órdenes motoras de las manos en su homúnculo del lóbulo frontal, en

cierto sentido es vecina -aunque no tan específicamente como en la corteza somatosensorial- al que realiza el mismo cometido para los brazos. No apporto más información ya que una imagen, la siguiente, vale más que cien palabras.

La corteza primaria somatosensorial no sólo está estructurada de arriba/abajo según el eje longitudinal del cuerpo, sino que se segmenta en áreas, de adelante a atrás, que realizan funciones cada vez más complejas. En esta dirección la podemos imaginar como una bandera formada por la unión de franjas verticales de colores. Hasta cuatro, cada una implicada en un cometido diferente que tiene bastante que ver con el que desarrollan las neuronas de las zonas colindantes.



Distribución de funciones según regiones de la corteza somatosensorial (imagen del libro Neuroscience, D. Purves et al., 2012, fair use)

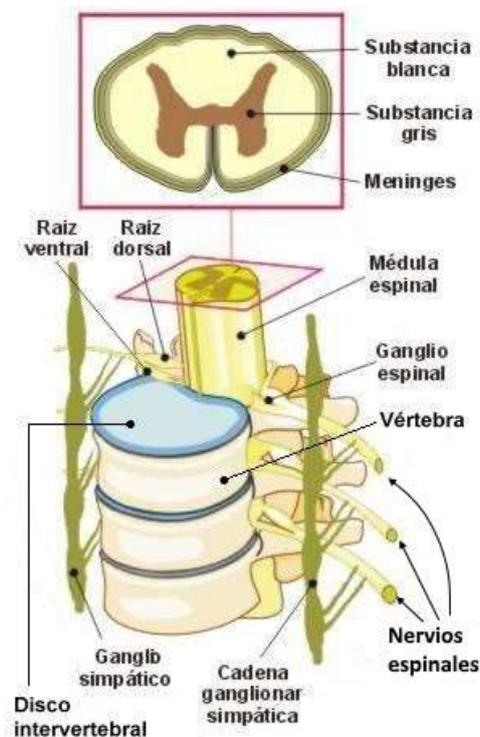
Las más frontales [3a en la figura] gestionan las señales *propioceptoras*, las que dan información sobre la *posición estructural*

y movimiento del cuerpo. La siguiente hacia atrás [3b] se dedica a la información *táctil general* que resultará más discriminada en las dos franjas siguientes: la primera [1] interpretando particulares patrones de *movimientos en las experiencias táctiles* –rozamientos, torsiones, dirección del rozamiento...-, mientras que la segunda [2] parece relacionada con la información de la forma de los objetos *que tocamos*. Todo lo cual tiene una continuidad en el área vecina del lóbulo parietal [S2] que maneja aspectos de detalle de los objetos *observados*- formas, orientaciones, aceleraciones...-. Y lo mismo sucede si volvemos a la primera franja propioceptora [3a], cuya área vecina, anterior, en el lóbulo frontal se dedica a la gestión motora del cuerpo, que a su vez se habla con esa área parietal de la vecindad [S2] que decíamos se relaciona con la información de aspectos de detalle de los objetos *observados*.

A la vista de lo anterior, es decir, las intercomunicaciones entre las distintas zonas de los córtex motor y sensorial, parece como si en la corteza primaria somatosensorial [S1] se produjera algún tipo de manejo de la información de bajo nivel –más simple-, que la transforma, por adición o realimentación con otros datos, en información de un orden más elevado –más compleja-. Con ello se comienza a construir un sentido de estructura orgánica que está presente en nuestras interacciones con el mundo exterior. Pero, ¿cómo pasamos de aquí –de la información muy específica sensorial- a la percepción subjetiva de las cualidades de lo que observamos - calor, dolor, color...-? En algún punto de los procesos que generan nuestras percepciones estos canales tan específicos de información sensorial no sólo deben unir sus mensajes -del conjunto de sentidos- sino que, en algún momento y lugar, también se reprocesarán añadiéndoles el aroma de otras experiencias, en un juego de sumas o restas neurológicas cuyo funcionamiento aún desconocemos.

Completaremos la información al añadir a tálamo y corteza somatosensorial una tercera estructura del sistema nervioso, ésta situada fuera del cráneo. Evidentemente se trata de la médula espinal. No diremos mucho de ella más allá de presentar su dibujo anatómico, ya que a lo largo de los capítulos que vienen va a salir a escena muchas veces y nos será útil tener en la mente la imagen de su

disposición espacial. La médula no deja de ser más que un amasijo ordenado de materia gris, cuerpos neuronales con sus dendritas, y materia blanca, las autopistas longitudinales y transversales de axones. Casi podríamos decir de ella que es un mazo de cables un tanto especial, ya que está segmentada de arriba a abajo, atendiendo así de manera más específica a las diversas partes del cuerpo a través de los nervios espinales que entran o salen por estos segmentos. El corte radial de esta médula asemeja a las alas de una mariposa -ver figura- en donde físicamente se llevan a cabo diversas interconexiones neuronales tanto en sentido longitudinales como transversal. Toda la médula está situada dentro de la caja ósea que conforman las vértebras de la columna. Por fuera de ella acompañan longitudinalmente una especie de escala de nódulos formados también por neuronas. Se trata de la cadena de ganglios espinales en donde se encuentran cuerpos de neuronas, básicamente las que ocupan los escalones funcionales más próximos a los sensores corporales o a los músculos.



Tramo de la columna vertebral y de la médula espinal en donde se observa el detalle de su disposición anatómica (Imagen de la red, fair use)

Tras todo esto, ya sabemos lo suficiente acerca de los grandes bloques del sistema nervioso por donde se mueve la información sensorial. Evidentemente no son los únicos, ya que dentro del cráneo se quedan muchos que hacen de interconexión funcional entre los tres comentados. Ya sabemos del tronco encefálico que une médula y tálamo, además del conjunto amigdalino, sin olvidarnos de los ganglios basales que tanto trabajan en la gestión de los patrones del movimiento... ¡y del resto del extenso tejido cortical, que no sólo de lo somatosensorial se vive! Aunque, como veremos caso por caso, sentido por sentido, todos forman un equipo en donde cada jugador es necesario e imprescindible.

En el capítulo siguiente completaremos esta información general, ya que la dedicaremos a las vías específicas de comunicación, lo que podemos agrupar como “los nervios” y su operativa.

04: Los caminos de la información

Tras haber revisado en el capítulo anterior algunos de los bloques del sistema nervioso que están implicados en la gestión de las percepciones sensoriales -tálamo, corteza somatosensorial y médula-, y antes de pasar a la descripción de los sistemas sensoriales vamos a analizar los caminos a través de los que el cerebro, asentado en su caja craneal de hueso, recibe la información sensorial y transmite sus decisiones, en gran medida motoras. Éste será el objeto del presente capítulo, también de carácter preparatoria.

Los caminos de los que hablamos son **los nervios**, desde luego. Y los nervios son un “trenzado” de axones. Pero... ahora que me lo dices... no hemos presentado aún a esos señores. Vamos a por ello.

Comenzaremos por hablar de las neuronas, las propietarias de esos axones. Estas células, principales actrices del sistema nervioso, presentan una morfología muy particular. Presentan una tipología de formas muy variada -grandes, pequeñas, ramificadas, sencillas, globulares, estrelladas...-, aunque a todas ellas, como cualquier célula de nuestro organismo, les unifica su estructura básica: un cuerpo en donde se encuentra el núcleo con la carga genética y una sopa interna de iones y moléculas complejas, el citoplasma, en donde pululan los corpúsculos encargados de sus funcionalidades. Y todo ello encerrado en una membrana. Esta membrana proyecta desde el cuerpo unas prolongaciones repletas del propio citoplasma, que son como unos microtúbulos con aspecto externo de filamentos. Pues bien, los **axones** son las prolongaciones -los filamentos- más largas de las neuronas, tan largos que ¡algunos van desde el pie hasta la cabeza! Pero además tienen otras prolongaciones más cortas, que también salen de su cuerpo celular, llamadas **dendritas**. En pocas palabras, y resumiendo de forma temeraria, los axones son funcionalmente las antenas emisoras de las neuronas, sus “cables eléctricos”, mientras las dendritas son sus antenas receptoras. La imagen siguiente ilustra cómo son las neuronas.

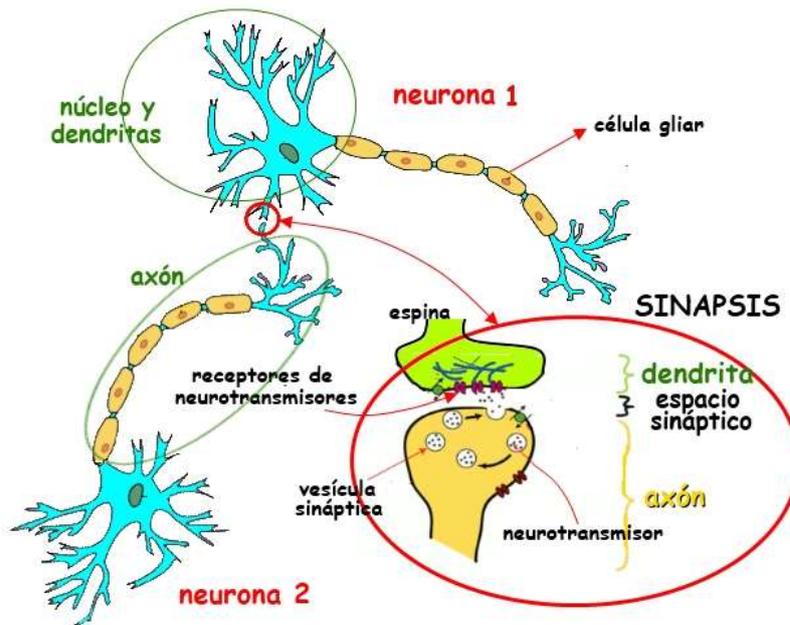


Imagen de un par de neuronas efectuando una sinapsis y detalle de esta última (figura a partir de Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

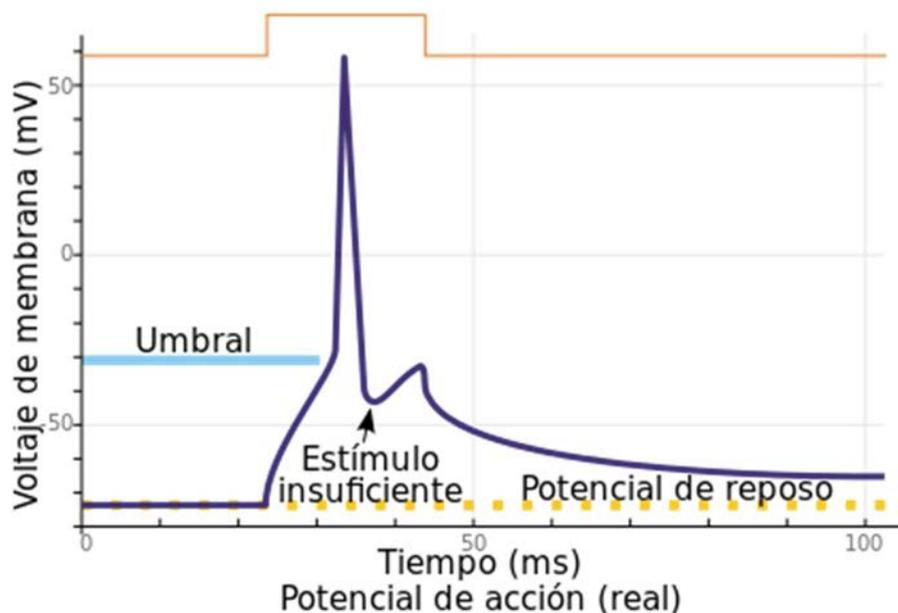
A la vista de lo dicho, exceptuando por las características prolongaciones de sus cuerpos, parece que las neuronas son muy parecidas al resto de células. Pero, evidentemente, algo tiene que tener una neurona de especial. Y ese *algo* está relacionado con su funcionalidad como transmisores de información. Tanto en los axones como en las dendritas.

Los primeros son los cables. Ya hemos comentado que en algunas neuronas -motoras- pueden ser tan largos como para conectar músculos de las extremidades con estructuras neuronales directoras del movimiento que se encuentran dentro del cráneo. Un largo camino para que discurra la información: neuronas sensoriales que detectan una quemazón en la mano y transmiten al cerebro tal descubrimiento, para que desde allí otras neuronas mensajeras, mediante la información que transcurre por sus axones, exciten los músculos correspondientes del brazo para apartar la mano de la llama de la vela.

Lo anterior es sólo un ejemplo que se puede extender a otros aspectos de la supervivencia, pero que nos sirve para entender que este transporte de información por los axones -los nervios- es vital y debe hacerse con la mayor eficiencia posible. Eficiencia en cuanto a

velocidad de transmisión y eficiencia en cuanto a consumo de energía, aunque no se nos escapa que habrá momentos más críticos que otros. El ejemplo de la quemazón debe concretarse en una respuesta rápida, desde luego que más rápida que en el caso de sentir sed cuando vamos paseando por un paseo marítimo relleno de bares, junto a la playa. Antes de ver en qué se concreta lo anterior, conviene explicar un poco más y con mayor precisión qué son esas corrientes de información.

Hemos hablado de cables, de corrientes... y eso nos suena a electricidad. Aunque no exactamente la que nosotros imaginamos que circula por dentro de un cable de cobre, en donde una diferencia de potencial entre sus extremos motiva el movimiento de los electrones libres en el metal, hacia la punta con menor voltaje. Sucede que si no cambia el potencial entre los extremos se tratará de corriente continua, es decir, los electrones van siempre hacia el mismo extremo, cosa que no sucede con la corriente alterna. Es decir, la corriente eléctrica consiste en un flujo de cargas eléctricas -la de electrones- a través de un cable. Pero éste no es exactamente el caso de las corrientes de información en las prolongaciones de las neuronas.



Esquema de la base del potencial de acción (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Lo vamos a ver a continuación, pero para mayor claridad anticipamos que lo que sucede en los axones es la generación casi instantánea -en el sentido de milisegundos- de determinados picos de diferencia de tensión en puntos de su membrana, picos que se van moviendo a lo largo del axón -ver la animación siguiente- dando la apariencia de corriente eléctrica, aunque es más bien una cadena de sobretensiones interior/exterior que se van propagando, la anterior causante de la siguiente, a lo largo del “cable axón”. Técnicamente, a estos picos de tensión se les conoce como **potenciales de acción**. Y *son todos iguales*, como vais a entender si seguís leyendo.

Contra, pero ¿cómo va a haber una diferencia de tensión en una célula, tal como la que puede haber entre los dos agujeritos de un enchufe? Pues sí señor, lo mismo. La diferencia de tensión físicamente es ni más ni menos que la manifestación del potencial eléctrico, que es ni más ni menos el trabajo que hay que hacer para mover una carga eléctrica entre dos puntos en donde hay un campo electrostático. Campo que está producido por cargas eléctricas que se influyen unas a otras.

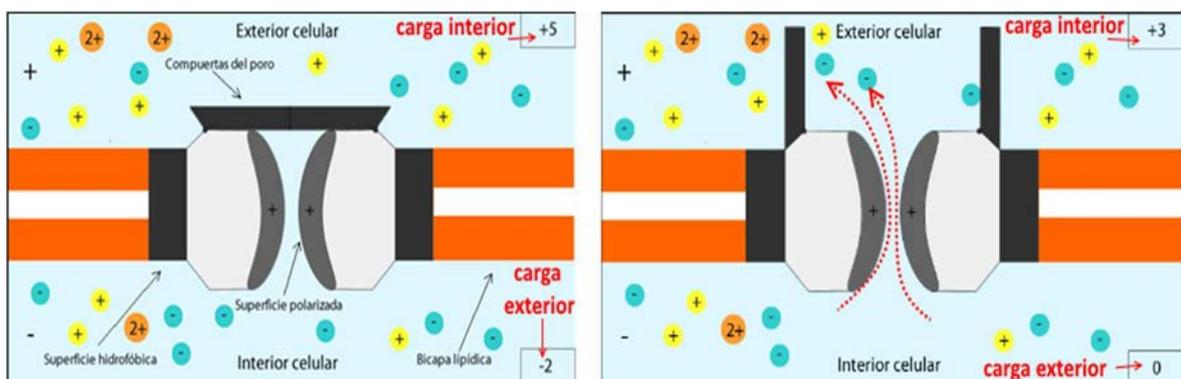
Insisto: ¿qué tiene que ver esto con una célula? Un poco de paciencia, que ahora lo explico.

La membrana de una célula -en nuestro caso la neurona- está compuesta por lípidos y separa dos medios, el interno de la célula y el externo a la misma. Es más o menos permeable, dependiendo de lo que tenga que permear. Podemos imaginar que a las moléculas más gruesas les costará más atravesar la membrana celular, e incluso algunas no lo van a conseguir nunca.

Tanto el medio externo como el interno son una disolución acuosa de moléculas variadas, algunas de las cuales están disociadas en forma de iones. Y los iones son “estructuras” con carga eléctrica. Así pues, dentro habrá una serie de iones disueltos en una determinada concentración, y fuera lo mismo, aunque otros iones, o bien del mismo tipo pero con otra concentración. Una concentración de cargas eléctricas fuera, en el medio intracelular, y otra, generalmente distinta, en el líquido citoplasmático. Así que ya tenemos un potencial eléctrico entre los dos lados de la membrana celular. No diremos más

al respecto, pero hacemos la idea de que los iones que más trabajan son los del sodio Na^+ , potasio K^+ , magnesio Mg^{2+} y calcio Ca^{2+} , al menos en lo que aquí nos trae. Y cómo no, el cloro Cl^- : a fin de cuentas hemos nacido en el mar y nuestros líquidos corporales son su reflejo.

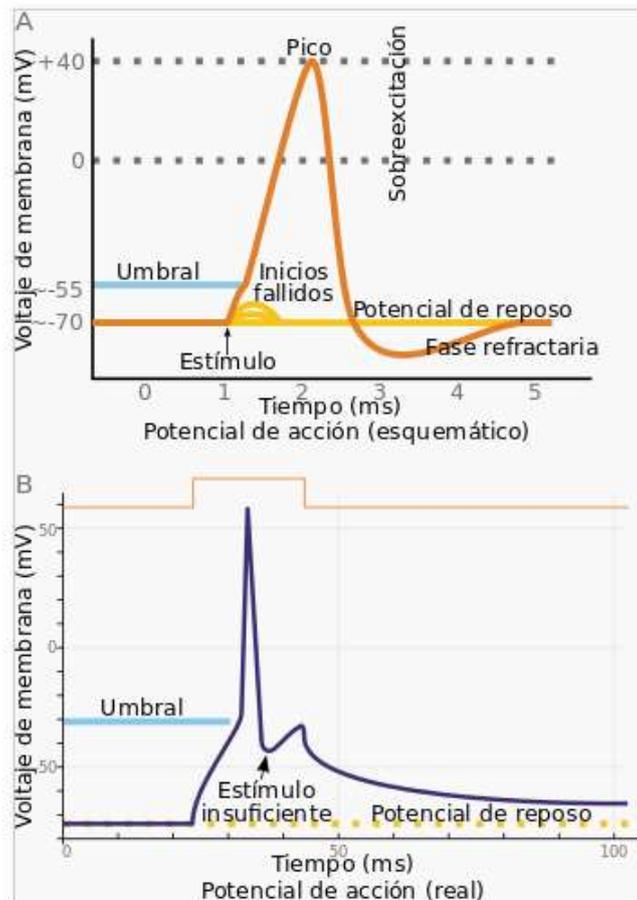
Como la membrana neuronal es permeable, podemos pensar en momentos transitorios en que por ósmosis los iones intentarán migrar hacia las zonas de menor concentración. Por otro lado, si el interior de la neurona tiene carga positiva neta también tendremos que pensar que los iones negativos del exterior tenderán a entrar por simple atracción electromagnética, y viceversa en el caso contrario. Pero son estados transitorios que llevan a momentos estables de equilibrio eléctrico en los que queda bastante bien definido un potencial de membrana: diferencia de tensión eléctrica entre su interior y su exterior, consecuencia de que hay un determinado número de iones y de un tipo fuera, diferente de los que hay dentro. Un valor muy común en el potencial de membrana es el de unos -70 mV, con un balance de carga positiva mayor fuera que dentro. Fuera hay relativamente más sodio, más magnesio, más calcio y más cloro, y dentro, más potasio.



Esquema ilustrativo del funcionamiento de un canal iónico regulado por voltaje. El canal -conjunto de proteínas- se abre ante la diferencia de potencial en la membrana. Es selectivo para cierto tipo de iones debido a que el poro está polarizado y tiene un tamaño similar al del ion (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Hemos dicho también que las membranas son permeables. Esto es así en gran medida por la existencia de canales iónicos, que no son más que determinadas proteínas incrustadas entre los lípidos de la

membrana. La estructura de estas proteínas es curiosa, porque dejan un hueco interior por el que pueden pasar determinados iones. A veces el hueco está libre y otras veces tiene que ser activado por agentes externos, como puede ser una molécula llave o por una excitación de tipo eléctrico al variar el potencial entre sus extremos.



A. Vista esquemática de un potencial de acción ideal, mostrando sus distintas fases. B. Registro real de un potencial de acción (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Veamos ahora qué es lo que pasa en un axón de una neurona. Un estímulo eléctrico, que veremos al final qué es, abre una proteína canal del Na^+ situada en un punto concreto a lo largo de este axón. Como hay menos carga positiva dentro que fuera, la consecuencia es un flujo de iones positivos sodio hacia el interior, lo que produce una variación del potencial de membrana, pasando a valores superiores - menos negativos- al de reposo que ya dijimos que está en el entorno

de -70mv -más carga positiva fuera que dentro-. Puede que el flujo sea pequeño y no pase nada más, volviendo la neurona a su estado de polarización inicial. Pero puede que sea suficientemente grande como para que se produzca un efecto en cascada sin retorno y que eleve al potencial de membrana hasta un pico que puede ser de +30mV -más carga positiva dentro-, hecho que se conoce como que *la neurona se ha despolarizado*. Este pico es muy breve en el tiempo, ya que otras proteínas, en este caso canales del potasio, se abren permitiendo un flujo de iones K^+ hacia el exterior de la membrana, que rápidamente vuelve a polarizarse hasta los valores iniciales de reposo. **Este pico local es el potencial de acción**. Pero bueno, ¿no hemos quedado que se generan corrientes de información de base eléctrica? Es cierto y fácil de entender. Cuando entra a raudales el Na^+ al interior del axón sube allí, donde está el canal iónico, el potencial. Pero no sólo allí, sino que también en las proximidades aguas abajo hasta donde ha llegado el sodio (aguas arriba ya ha entrado el canal del K^+ a devolver las aguas a su ser), en donde por ese influjo se abren los canales del Na^+ allí situados. El resultado es que un poco más aguas abajo se va a producir puntualmente otro potencial de acción, circunstancia que se repite localmente una y otra vez hasta llegar al extremo del axón. Y así es como se mueve la información por el interior de una neurona.

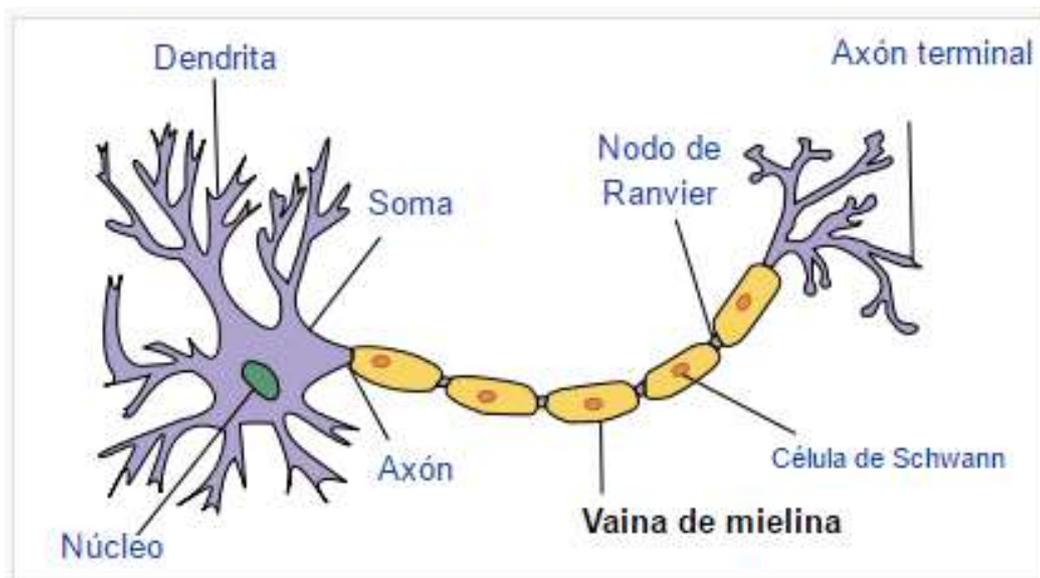
Conocido el proceso, es fácil entender que los potenciales de acción de todas las neuronas deben ser prácticamente iguales en amplitud, pudiendo variar su frecuencia dependiendo de la intensidad de la señal sensorial o motora que tienen que transmitir. De ahí la gran incógnita de la pregunta acerca de *¿qué tiene que ver lo que el cerebro nos dice qué hay ahí afuera con lo que realmente hay, si el cerebro recibe idénticos potenciales de acción de cualquiera de los sentidos que perciben este exterior?*

Pero esto es otro tema.

Antes de pasar a ver de qué manera esta información, que se encuentra en las puntas de las ramificaciones del axón de una neurona, pasa a la siguiente, vamos a ver cómo se modula físicamente la velocidad de transmisión de esta información a lo largo del axón. Tiene sentido el que se transmita la información a diversas velocidades, ya que hay eventos externos que requieren una gran

rapidez de computación y respuesta y otros que no precisan lo mismo. La velocidad consume energía y ésta cuesta conseguirla.

Eso se logra gracias a una particularidad anatómica de los axones. Las neuronas conviven en el sistema nervioso con otro tipo de células, mucho más abundantes, que se conocen como gliales. Proporcionan una especie de soporte, protección, limpieza... a las sofisticadas neuronas. Algún tipo de gliales, las células de Schwann, también se dedican a abrazar a los axones recubriéndolos de una especie de “grasilla” -un material lipoprotéico- conocida como mielina. Es como la funda plástica de un cable eléctrico, aunque no es continua: forman una serie consecutiva de anillos con huecos desmielinizados intermedios.



Estructura de una neurona clásica en donde se puede ver el tipo de recubrimiento que proporcionan las células gliales de Schwann sobre el axón (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

¿Cuál es la utilidad de esta disposición? Muy sencillo: sólo en los huecos pueden situarse los canales iónicos operativos, luego sólo en los huecos se producirán potenciales de acción locales. La incidencia en este punto de la entrada del sodio es la despolarización local del axón, influjo que se extiende a los alrededores. Pero sólo en el siguiente hueco sin mielina podrá replicarse el potencial de acción. La consecuencia es, por tanto, que se requiere producir menos

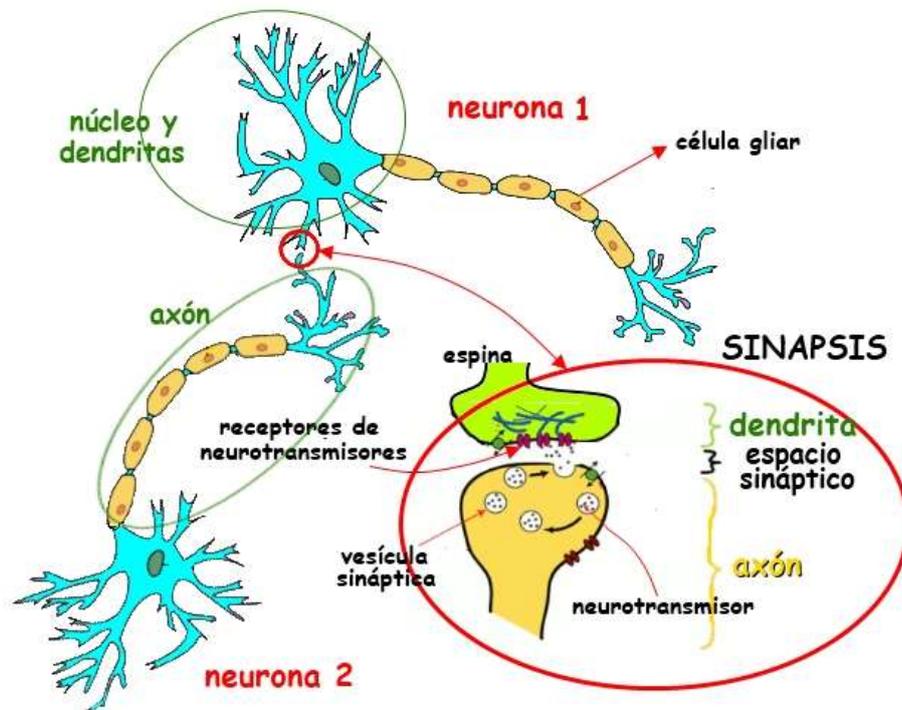
potenciales de acción locales para que “corra” la información: así se hace de forma mucho más rápida.

Esto es el caso general. Luego la biología es más rica y variada. Dentro del ámbito de los sistemas sensoriales hay varios tipos de morfologías de los axones, desde los muy gruesos y con abundante capa de mielina a los finos y desmielinizados. Entre los dos extremos, la casuística es diversa. Los que se aproximan más a la forma de los primeros transmiten la información de forma más rápida. Los que se parecen más a los segundos lo hacen más lentamente. Al ser estos últimos más pequeños, podemos imaginar que este tipo de axones se encuentran en las zonas más periféricas, en donde las áreas que detectan sensibilidad deben ser más delicadas, pequeñas y sensibles. De hecho son los que inervan la piel iniciando la transmisión al cerebro de las señales de dolor y temperatura. Sin embargo, los que participan en la transmisión inicial de las sensaciones del tacto son un poco más gruesos.

Bueno, pues ya sabemos cómo son los axones. Vamos a ver ahora la morfología de sus *partenaires*, las dendritas. Son los segundos actores, que no secundarios, de la transmisión de la información, al realizar la función de recibir los mensajes que los patrones de los potenciales de acción conforman en los axones.

Las dendritas son “filamentos” menores del cuerpo citoplasmático de las neuronas. Menores en tamaño, que no en número: baste decir que una neurona puede estar comunicada hasta con diez mil neuronas más. De todas formas, la morfología de estas células es muy variada. En las paredes externas de las dendritas se encuentran unas protuberancias en forma de hilos o cáliz, llamadas espinas, que se comportan como estaciones receptoras de los impulsos nerviosos conducidos por los axones. Son muy numerosas en cada dendrita y parece que tienen un papel fundamental en los procesos de memoria, ya que se crean un buen número de nuevas espinas cuando se trata de reforzar la memoria de un suceso codificado en el patrón de potenciales de acción. La información recibida en las dendritas pasa al cuerpo de la neurona, donde se inicia un nuevo tren de potenciales de acción desplazándose localmente por su axón hasta una nueva neurona.

Ya sólo nos queda hablar del proceso de transferencia de los mensajes entre axones y dendritas. Y será bueno que echemos una ojeada a la primera figura de este capítulo.



Repetición de imagen de la cabecera de capítulo en la que se ha dibujado un par de neuronas efectuando una sinapsis y un detalle de esta última (figura a partir de Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

El intercambio de información puede que sea tan rápido como el propio desplazamiento del tren de potenciales de acción, ya que, en determinadas ocasiones, el mensaje se transmite entre neuronas como un puro impulso eléctrico más. Sin embargo, en su gran mayoría se utilizan medios químicos para esta función. Eso quiere decir que la membrana del axón, cuando llega el potencial de acción y tras unos procesos internos más o menos complejos en los que tiene una participación decisiva el ión Ca^{2+} , exuda determinadas moléculas llamadas **neurotransmisores** al estrecho espacio entre el axón de una neurona y la espina de la dendrita de la siguiente. Quizás hayáis oído hablar de la serotonina, la acetilcolina o la dopamina. En la membrana celular de esta espina se encuentran determinadas proteínas, conceptualmente del estilo de las que funcionaban como bombas iónicas cuando se producía un potencial de acción, que están especializadas en recibir un determinado tipo de neurotransmisor.

Cuando se realiza el acoplamiento “neurotransmisor-canal iónico” se inicia en la dendrita de la neurona receptora un proceso más o menos complejo, que desembocará en un nuevo potencial de acción con el que seguirá la cadena informativa por los “cables” nerviosos.

A este conjunto de movimientos entre ambas neuronas se le llama **sinapsis**. Y no creáis que los procesos del sistema nervioso son de una complejidad tal que precisen un número muy grande de transducciones sinápticas. Realmente, y es el caso particular de la operativa sensomotora, participan dos, tres o cuatro neuronas, no más.

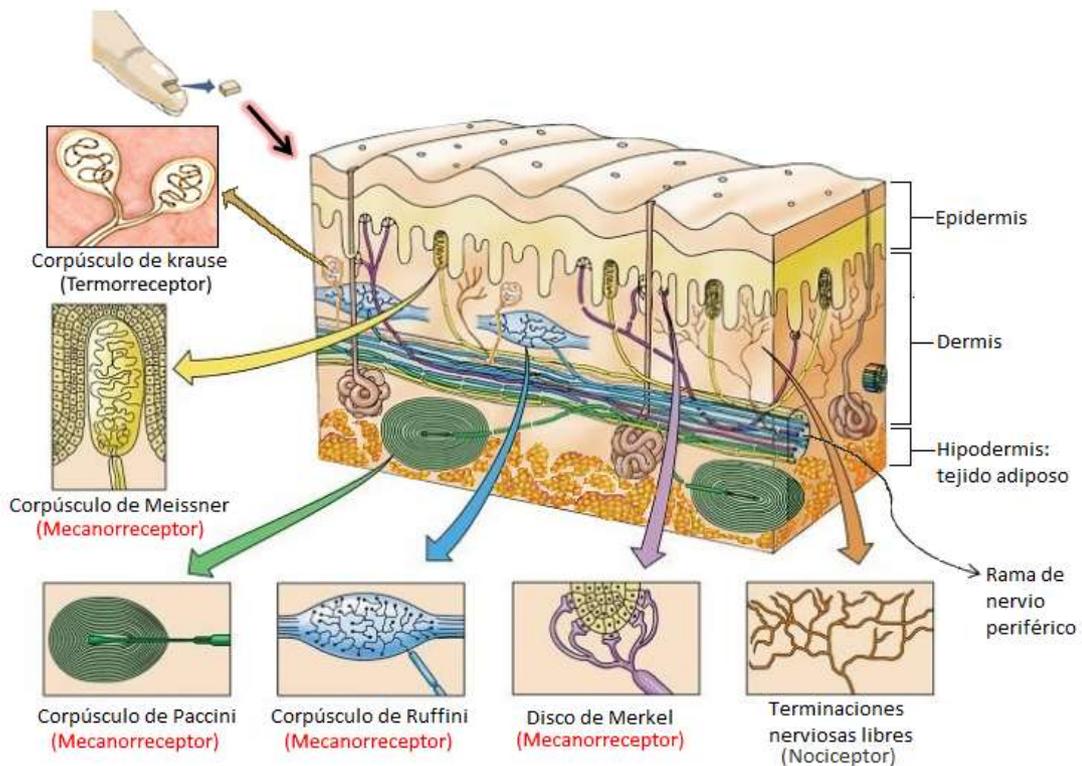
Bueno, con esto ya sabemos cómo se mueve la información sensorial por el sistema nervioso. De los capítulos anteriores llegó el conocimiento de alguno de los bloques principales de este sistema en donde se procesan las señales. Parece, pues, que estamos preparados para no perdernos en lo que sigue, que es la descripción más detallada de cada uno de los sistemas sensoriales. Comenzando en el capítulo siguiente por el sentido del tacto.

05: El tacto

En este capítulo vamos a intentar dar una idea de cómo funciona el conjunto de actores que nos proporcionan las sensaciones táctiles originadas por estímulos mecánicos sobre la piel, ya se trate de un ligero rozamiento, una presión o una violenta torsión. Podemos pensar que también en la epidermis se inician las sensaciones térmicas o dolorosas... pero esto, al ser los procesos ligeramente distintos, lo vamos a dejar para otro capítulo.

Físicamente, el origen del estímulo táctil proviene de un objeto exterior, ya sea sólido, líquido o gas, que colisiona con la superficie externa de nuestro cuerpo. La colisión está producida, ni más ni menos, por el rechazo electromagnético que experimentan los electrones de los átomos que forman nuestra piel con relación a los de los átomos del objeto que ejerce el empuje sobre nosotros. Ambas familias de electrones interactúan entre sí, intercambiando fotones que informan de que existe una fuerza electromagnética que no se puede dominar. El resultado es el inicio de un proceso que va a acabar generando la sensación de roce, torsión o empujón. Detectar estos estímulos externos se nos antoja importante en nuestro obligado esfuerzo, consciente o inconsciente, de poder mantener o favorecer el equilibrio vital. También nuestra salud y nuestras relaciones sociales. Vayamos, pues, a analizar en qué consiste el sistema de detección específico para el tacto.

Es lógico pensar que los sensores del tacto se deben encontrar en el epitelio más externo de nuestro cuerpo. Y así es. Y es lógico también el pensar que los debe haber de varios tipos, ya que el tacto es un sentido de amplio espectro que lo mismo debe detectar el roce de una pluma como el empujón en un lance del rugby; con la variación de sensibilidad suficiente como para percibir tanto una excitación táctil sobre una zona extensa como sobre un área mínima de la piel. Vayamos pues a la piel y observemos lo que vamos a encontrar.



Corte de la piel en donde se aprecian los diversos sensores mecanorreceptores en donde se inicia la sensación táctil (Imagen de la red, fair use)

Viajando desde posiciones más superficiales a las más profundas nos encontramos con cuatro tipos de detectores. Los más externos, que se encuentran en la epidermis, son de dos tipos y están dedicados a recibir las señales más débiles del tacto. En primer lugar tenemos a los **corpúsculos de Meissner** que son unas madejas de terminales de axones con una estructura de tendencia vertical, lo que les hace muy sensibles a las deformaciones más agudas y puntuales sobre un pequeño trozo de piel. Un poco más profundos encontramos a unos complejos de células agrupadas, los **discos de Merckel**, células que tienen unas vellosidades por las que segregan, bajo una presión mecánica, ciertos neurotransmisores que provocan a su vez potenciales de acción en las primeras neuronas de la cadena de detección del tacto. Ya sabemos de otro capítulo que los potenciales de acción se inician a partir de un desequilibrio de potencial eléctrico en la membrana de la neurona, generado por flujos transitorios de iones a través de unas proteínas específicas, incrustadas en estas membranas, que hacen de conductos de entrada-salida.

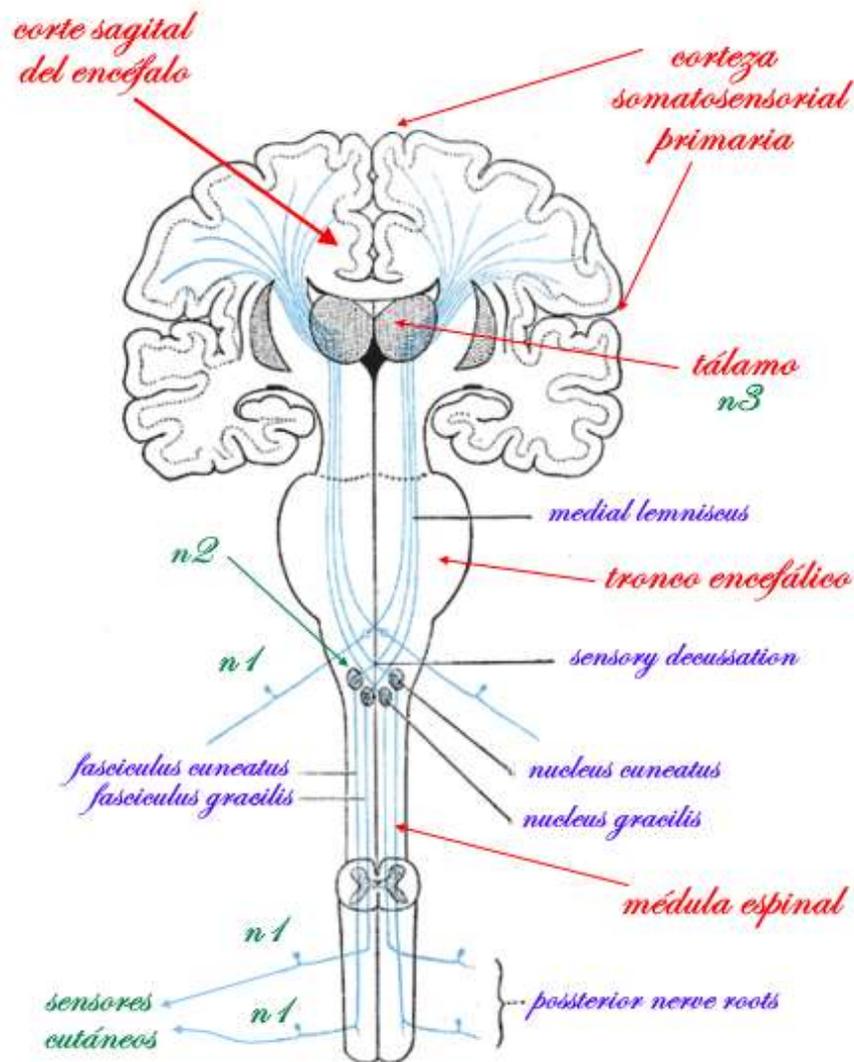
Un poco más profundas, ya en la dermis, encontramos a unos detectores especializados en excitaciones más potentes, tales como retorcimientos, tirones o estiramientos, que conocemos como los **corpúsculos de Ruffini**. Más profundas aún, por debajo de las capas de piel, se sitúan unos sensores muy especiales cuya función está relacionada con la detección de vibraciones. Tienen una estructura curiosa: consiste en una terminación de un axón recubierta por múltiples capas de mielina, como si fuera una cebolla, entre las que se mueve un fluido, generando y aliviando rápidamente la presión interna cuando la piel está sometida a excitaciones variables con el tiempo, como puede ser durante una vibración. A estos sensores se les conoce como los **corpúsculos de Pacini**.

Así que, en resumen, tenemos a un par de tipos de detectores, los superficiales, que trabajan en situaciones de toques de la piel ligeros, que tienen unos campos de recepción muy pequeños y con una densidad de inervación muy alta sobre unidad de superficie de piel, lo que les hace muy sensibles a excitaciones muy localizadas. Por otro lado, tenemos otro par de tipos de detectores más profundos relacionados con sensaciones más amplias que deben actuar sobre zonas más extensas, no en vano están presentes en la piel con una menor densidad.

Dicho esto, ya sabemos quiénes son los causantes del inicio de la cadena de potenciales de acción que van a producirnos una percepción táctil. Este potencial de acción iniciador se produce en el axón de una primera neurona de la línea sensorial que, dependiendo de dónde se haya producido la excitación en la piel, recorre luego en mayor o menor longitud el mazo de nervios y neuronas que forma la columna vertebral en el camino de la señal hacia el encéfalo. A la vista de lo dicho, nos tenemos que dar cuenta que estas *vías están especializadas en toda su extensión, exclusivamente, en la sensación del tacto*.

Vamos a ver como discurren estas autopistas. Como el cerebro está donde está con relación al conjunto del cuerpo es fácil suponer que tiene que haber diferentes vías para las sensaciones táctiles primarias. No van a tener la misma disposición las que vienen de las proximidades del encéfalo, como la cara, y las que vienen del resto

del cuerpo de cuello para abajo, siendo así que la evolución ha incluido también en este grupo a la parte posterior de la cabeza. Y así es. Desde la cara hay un camino corto y desde el resto del cuerpo unos caminos más o menos largos, todos muy parecidos, dependiendo desde donde venga la señal. Veamos estas segundas rutas, las del cuerpo.

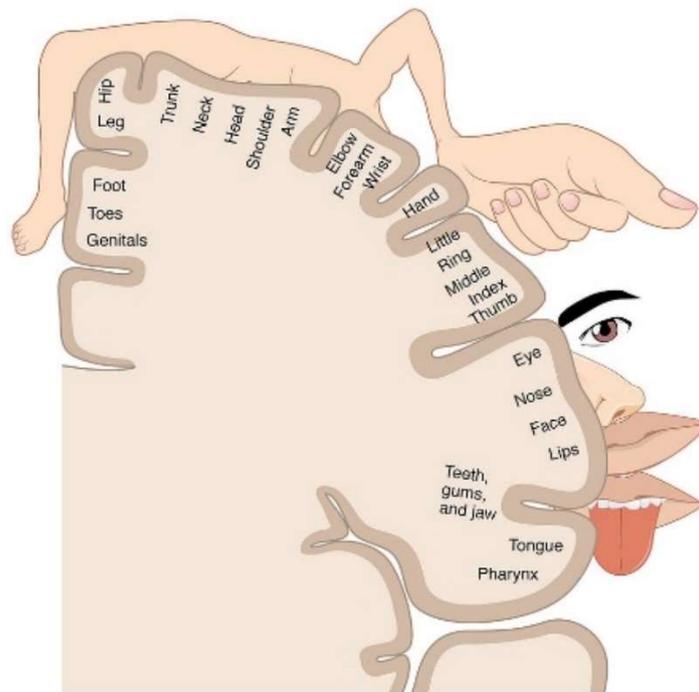


Esquema simplificado de los caminos neuronales del tacto (en azul). Las nomenclaturas n1, n2 y n3 corresponden a las primeras, segundas y terceras neuronas de la cadena de sinápsis (Imagen modificada de wikimedia, dominio público)

Habíamos dejado la punta de un axón conectada a los detectores iniciales de la piel. Es un asombroso axón, ya que el cuerpo de la neurona [n1] propietaria está junto a la columna, en un rosario de

ganglios longitudinalmente anexos a ella, mientras que el inicio puede estar en la punta del dedo gordo del pie. O en la punta del dedo mayor de la mano. Realmente un largo axón. Pero no acaba ahí su especificidad, ya que estos axones son una de las dos colas en que se divide el que sale del cuerpo de la neurona. El otro continúa el camino hasta penetrar en la columna, más o menos a la altura de donde se ha producida el tacto, para continuar llevando sorprendentemente por ella, hacia arriba, el potencial de acción hasta el bulbo raquídeo en el tronco encefálico, primer conglomerado neuronal del cerebro, ya dentro del cráneo. A medida que se van sumando axones provenientes de partes más elevadas del cuerpo, el mazo que forman en la médula se va agrandando como con las aguas de un río, que va a recoger a un segundo afluente importante, que es el que proviene de los brazos y parte superior del tronco. Todos estos axones específicos del tacto penetran en el cráneo y llegan hasta unos ganglios, también específicos del tacto, que se encuentran nada más traspasar el foramen mágnum. Allí, les esperan las segundas neuronas [n2] del relevo. Reciben el potencial de acción y continúan con la transmisión, ahora por su axón, que ha tomado una sorprendente decisión. Si la corriente subía por la derecha, el axón de la segunda neurona cambia de lado pasando a la izquierda del tronco encefálico -la realidad táctil es gestionada en el hemisferio cerebral contralateral de donde se produce-. Tras realizar este regate en el punto indicado como “*sensory decussation*” de la imagen anterior, asciende por el tronco atravesando diversas estructuras encefálicas que se dedican a otros menesteres, hasta llegar al tálamo. Recordad que el tálamo es una parte principal del diencéfalo y portero esencial de la mayor parte de la información sensorial que va a procesar el cerebro. El tálamo, hay uno en cada hemisferio, es como un huevo con una disposición antero-posterior. Pues bien, el axón de la neurona de la segunda posta se encuentra más o menos en la parte posterior del tálamo con las dendritas de las neuronas [n3] de la tercera posta, que será la última neurona que llevará el potencial de acción a través de su axón prolongado hasta la corteza somatosensorial. Recordad, como dijimos en capítulos anteriores, que esta corteza es la parte del neocórtex que se sitúa en la parte anterior del lóbulo parietal y cuya disposición neuronal representa “geográficamente” al homúnculo no homotético del cuerpo.^[1] Como estamos hablando de las rutas

seguidas por las señales táctiles del cuerpo, los axones de las neuronas del tálamo van a buscar las partes más superiores de esta corteza somatosensorial.



Homúnculo sobre la corteza somatosensorial. Las señales táctiles del cuerpo emiten sus axones a la parte más alta de esta corteza, mientras que las de la cara van a la más baja (Wikimedia, CC SY 3.0)

Lógicamente el camino de las sensaciones táctiles de la cara tiene que ser más corto. Pero es casi un reflejo de lo que hemos explicado para el cuerpo, ya que la primera neurona y la segunda de la cadena sináptica se encuentran a la altura del tronco encefálico, la primera fuera y la segunda dentro, un poco más arriba de las neuronas que gestionan las señales táctiles del cuerpo [n2]. Allí, el axón de la segunda neurona del camino de la cara también cambia de lado. Después, hasta el tálamo, en donde la tercera posta de neuronas dirigen las señales a la misma corteza somatosensorial, pero en posiciones más bajas como corresponde a la situación de nuestro homúnculo.

Así que tres estaciones neuronales de “bombeo” de la información: La que conecta los sensores locales con la médula, la que recorre la médula hasta módulos del interior del cráneo –el tálamo- y la tercera

que acerca la información a la neocorteza. Podríamos decir que estamos hablando de gestión del producto, logística y manufactura.

A partir de las señales que se han manipulado en la corteza y en el tálamo se va a iniciar un proceso que se hace más complejo, de computación; modificación; adición de otras señales; definición en la memoria; reacciones emocionales; generación de órdenes motoras... que en su conjunto van a producir la sensación consciente de haber percibido algo con el tacto y la respuesta orgánica a la excitación táctil inicial. Lo que nos permitirá pegar un salto y alejarnos de este “amigo” que nos ha pegado un alevoso pellizco.

En el siguiente capítulo vamos a tratar un sentido un tanto insólito: la propiocepción, el sentido que informa al organismo de la posición de los músculos, con lo que se alcanza la capacidad de sentir la posición relativa de distintas partes corporales. Hasta entonces.

NOTAS DEL CAPÍTULO 05:

- 1.** Una homotecia es una transformación geométrica que partiendo de un punto fijo, multiplica todas las distancias por un mismo factor. En el caso de nuestro homúnculo quiere decir que el mapa corporal que lo dibuja sobre la corteza cerebral no es perfectamente equivalente en formas y proporciones a la imagen del cuerpo real que intenta reproducir.

06: La propiocepción

En este capítulo vamos a hablar de un sentido del que nunca se nos habló, al menos a mí, en el cole. Siempre se trataba de cinco sentidos, los clásicos. Pero... eso de la *propiocepción* no existía. Y a todo esto... ¿qué es la propiocepción?

Acudimos a su etimología y encontramos que la palabreja está compuesta de varias raíces de origen latino: “*propius*” –de uno mismo-, “*capere, cepi, captum* -contener, tomar, agarrar- y el sufijo “-*cion*” –acción, efecto-. Es decir, la propiocepción es el sentido que informa al organismo de la posición de los músculos, con lo que se alcanza la capacidad de sentir la posición relativa de las distintas partes de la arquitectura corporal. Es aquello que te guía cuando te pica el codo y te lo rascas sin necesidad de mirarte a un espejo... la mano “rascadora” no falla, va directa al lugar del prurito.

Pues bien, vayamos de lleno a ver cómo se gestiona este sentido tan útil y tan poco tratado en nuestros estudios primarios, al menos en los míos de mediados del siglo pasado. Un vejete, sí señor.

Recapitemos un poco en cómo diseñaríamos nosotros el sistema de alerta posicional de nuestro cuerpo. Pensaríamos en tener un **subsistema de péndulo -equilibrio-** que nos asegurase, que nos permitiera saber que nuestro centro de gravedad está en posición vertical sobre los puntos de apoyo de los pies, y que nos avisase cuando nos desequilibrásemos de forma que pudiéramos ejercer las órdenes motoras precisas para reequilibrarnos en la nueva posición. Pero para reequilibrarnos, al sistema le deberíamos dar los datos de entrada, no sólo decirle *¡te estás saliendo de equilibrio!* sino también habría que suministrarle la posición inicial de huesos, músculos y articulaciones. Sin esto no acertaríamos con la decisión motora precisa para evitar una caída, por lo que deberíamos diseñar un segundo **subsistema de sensores** “ad hoc”, situados en músculos y articulaciones que nos dijera *¡tu cuerpo tiene tal geometría postural!* Con la gran ventaja que nos serviría también para manipularnos física

y mentalmente a nosotros mismos. Me quiero rascar detrás de la oreja derecha y, a pesar de que es imposible que vea el lugar exacto para poder guiarme con la vista, nunca fallo. Quiero subir un escalón y el subsistema, de forma automática, acierta a situar el pie con la altura precisa, ni más ni menos, para conseguir el objetivo. Me tiran una pelota y acierto a cogerla con mi mano: la he puesto en movimiento con una trayectoria y una velocidad precisas, tras lo que consigo una posición final coincidente con la trayectoria de la pelota y la tensión muscular exacta para soportar el golpe.

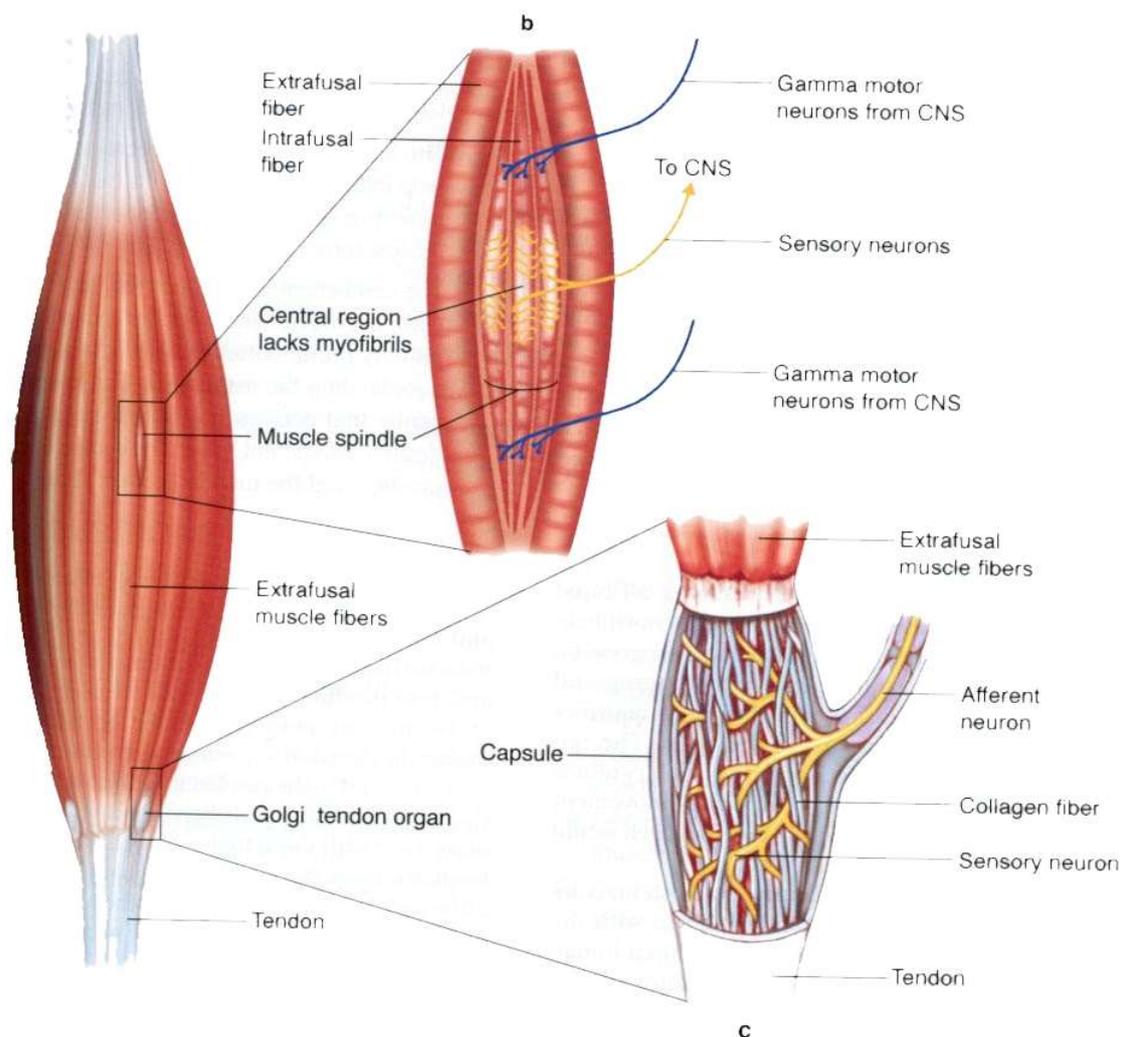
En este capítulo vamos a pasar por alto –lo dejamos para otra- el subsistema del equilibrio, centrándonos en el subsistema de sensores musculares y articulares.

En los músculos, embebidas en sus fibras estriadas, que son las que producen las contracciones del mismo, tenemos un invento sencillo y eficaz. Unas cápsulas formadas por otra serie de pequeñas fibras musculares, formando un huso –de ahí que se les llamen **husos neuromusculares**- sobre las que se abrazan terminales de axones de neuronas especializadas en dos posiciones: unas sobre la zona central de las células musculares del huso -donde están sus núcleos- y otras sobre los extremos donde se encuentran los elementos contráctiles de estas fibras musculares del huso.

Teniendo en mente esta disposición de fibras y axones que las abrazan -ver figura siguiente-, imaginemos que se está produciendo una contracción en el músculo motor principal donde está incrustado el huso. Cuando el músculo se contrae, las fibras del huso se ven arrastradas y también lo hacen produciendo una presión sobre las terminales de los axones inquilinos de la zona central del huso. En donde se generan potenciales de acción, señales que son enviadas al sistema nervioso central (CNS) **dando indicación de cuánto se ha podido comprimir el músculo y, por tanto, acortado su longitud.**

Pero al cerebro no solamente le interesa saber cuánto más pequeña es la longitud del músculo, que nos da indicios de la nueva posición de la estructura esquelética local, sino que también nos es útil saber cuánto esfuerzo está ejerciendo este músculo, lo que nos ayudará a tomar decisiones motoras posteriores dentro del complejo sistema

motor en el que participa nuestro músculo individual. Esto lo conseguimos mediante otros sensores que se sitúan en los tendones unión del músculo con el hueso preciso que tenemos que mover. En esta unión hay una zona formada por una especie de trenzado de fibras de colágeno por donde se entretrejen axones de neuronas sensoriales -ver figura anterior-. El resultado de todo ello es una madeja muy consolidada y densa que conocemos como **órgano de Golgi**. Cuando el músculo se contrae, los dos órganos de Golgi situados cada uno en sus extremos reciben una tensión que activa canales iónicos en los axones de la madeja, en donde se inicia el tren de potenciales de acción que da la **información precisa del esfuerzo que está generando el músculo**.



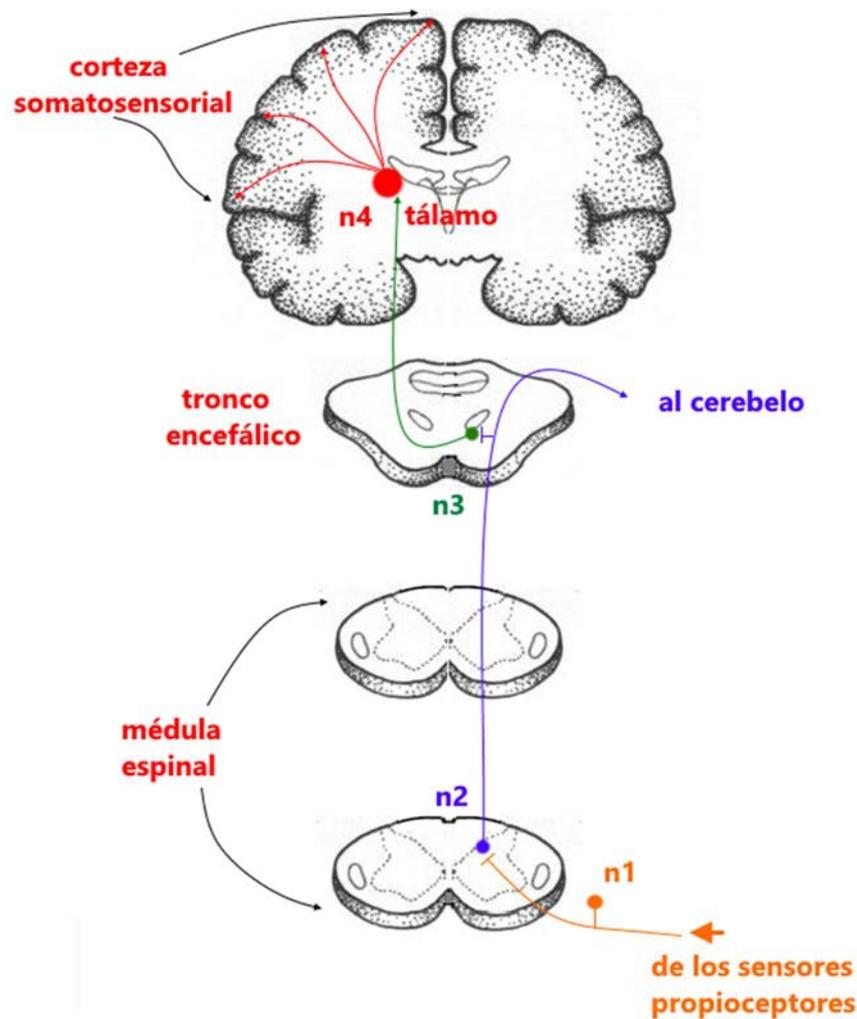
A la izquierda, la imagen de un músculo estriado. A la derecha, los tipos de sensores musculares de la propiocepción: a) El huso neuromuscular y b) Órgano de Golgi (Imagen de la red, fair use)

Toda esta información se acota y precisa en el cerebro aún más gracias a la funcionalidad de **otro tipo variado de receptores** situados en el entorno de las articulaciones del esqueleto. También van a dar al sistema nervioso central información de posición y movimiento, pero ahora la concreta y exacta -la x , y , z - de nuestro andamiaje óseo. Algunos de estos receptores se encuentran en la cápsula sinovial que rodea a la articulación, o en los tendones que la afirman, y actúan un poco como los órganos de Golgi, dando información de la tensión existente en la articulación; otros más profundos detectan los cambios bruscos en la posición de las articulaciones, es decir, informan sobre las aceleraciones de sus movimientos.

Ya tenemos nuestra información en el punto donde se genera. Y además está en manos de los extremos de unos axones en donde se ha iniciado la cadena de potenciales de acción que va a ir aproximándola hacia los centros de proceso del encéfalo, conformando el inicio de una **primera vía propioceptiva**. Al igual que pasaba en el caso del sentido del tacto que tratamos en el capítulo anterior, estos axones son de unas neuronas, la primera estación de relevo **[n1]**, cuyos cuerpos se encuentran en la cadena de ganglios junto a la columna vertebral. También se tratan de axones de “doble cola”, una, la que viene del sensor, y otra, la que penetra en la médula espinal en dirección hacia la cabeza. En la médula encuentra a la segunda neurona **[n2]** que recoge el relevo y lo lleva a través de su axón hasta dentro del cráneo, hasta el cerebelo, donde se usará para hacer una *calibración fina entre las órdenes motoras que genera el encéfalo y la exactitud de su cumplimiento* por músculos y articulaciones, a través de un mecanismo de realimentación que se lleva a cabo por el mismo cerebelo.

Pero no acaba todo ahí. Hay que suponer que existe una **segunda vía subsidiaria propioceptiva** necesaria para generar la *sensación interna de la imagen de nuestro cuerpo*. En un punto del tronco encefálico, próximo a donde se inicia el nacimiento del cerebelo, los axones de la segunda posta **[n2]**, que dijimos que van hacia este último complejo neuronal, deben generar una proyección -anatómicamente hay aún una cierta discusión- con la que hacer

sinapsis con una tercera neurona [n3], vecina a las que realizan la segunda posta del tacto, cosa que explicamos en el capítulo anterior. A partir del tronco encefálico el axón de [n3] cambia de lado y se une a la corriente ascendente de axones específicos de la vía del tacto dirigiéndose, en paralelo a estas vías, hasta el tálamo. Allí se encuentra con una cuarta neurona [n4] del relevo que llevará definitivamente la información propioceptora hasta las regiones somatosensoriales corticales –una vez más las mismas que en el tacto–, donde dicha información se va a procesar hasta confeccionar el esquema neuronal implícito de la imagen de nuestro cuerpo.



Vías neuronales del sentido de la propiocepción

Así que en la propiocepción encontramos de dos a cuatro relevos sinápticos, en cierto sentido muy parecidos a los que se producen en el tacto: Uno, que acerca la señal desde el sensor hasta la médula espinal, y otro segundo que lo lleva hasta el interior del cráneo, al

cerebelo, o mediante otra neurona interpuesta al tálamo. En este último una cuarta neurona, a partir de una sinapsis con la tercera, “rebota” la información hacia las zonas de procesamiento cortical más complejo. Como decíamos en el tacto: Gestión del producto, logística –dos transportistas- y manufactura.

No quiero acabar este capítulo acerca de la propiocepción sin hablar de lo que parece ser una de sus funciones más trascendentes, más allá de la necesidad de saber las coordenadas de nuestro cuerpo para movernos por el medio ambiente. El cuerpo es el traductor entre estos dos mundos, el interno y el externo, y sabemos que los procesos mentales superiores de los humanos surgen en la interacción entre ellos. De ahí la importancia del cuerpo, ya que el cerebro es capaz de interpretar y dar diferente respuesta mental a los distintos objetos según su posición relativa con respecto al cuerpo, ya estén lejos, a nuestro alcance o bien en contacto, incluso integrándolos en los esquemas cerebrales corporales, tan pronto como la mano los coge, como si fuese parte del mismo cuerpo. Como dice el doctor en biología Emiliano Bruner: *“El sistema ojo-mano [con su ajuste propioceptivo]... adquiere entonces un peso muy relevante, pasando de ser un sencillo medio de mantenimiento mecánico para no chocar con la mesa o para no dejar caer el vaso, a un sistema crucial de nuestros procesos cognitivos”*.^[1]

Y como lo prometido es deuda, tal como dijimos al inicio de este capítulo, en la siguiente vamos a tratar el segundo subsistema de la propiocepción, que es, ni más ni menos, el sentido vestibular, que por su importancia también se le conoce como el sentido de equilibriooceptión.

NOTAS DEL CAPÍTULO 06:

1. Para una mayor información podéis consultar en particular este interesante artículo del doctor Bruner, *“Cuerpo a cuerpo”*, publicado en el blog *“Jot Down”*.

[<http://www.jotdown.es/2017/02/cuerpo-a-cuerpo/>]

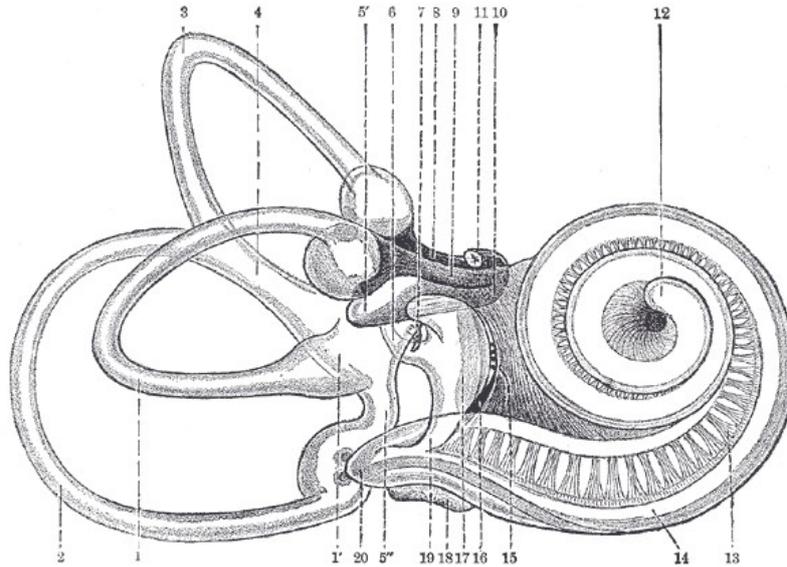
07: Sistema vestibular I. Los sensores.

En el capítulo anterior profundizamos en los sensores que nos proporcionan la propiocepción o, lo que es lo mismo, la percepción de la posición de nuestro cuerpo. En este capítulo y siguiente vamos a analizar un sentido que podemos considerar complementario, el sentido vestibular o de equilibrio, que nos proporciona la información que necesitamos en situaciones dinámicas de movimiento y aceleraciones para mantenernos en equilibrio. Por eso también se le llama sentido de equilibrio o percepción. Hoy solamente hablaremos de los sensores equilibrioceptivos.

Los sensores primarios de este sistema se encuentran en el oído interno. Como veremos cuando hablemos del sentido de la audición, la parte más externa del oído está formada por los pabellones auditivos, la membrana del tímpano y los huesecillos amplificadores de las vibraciones sonoras. Pero no creamos que, por el hecho de estar ahí instalados sus sensores, el sentido vestibular que hoy vamos a estudiar tenga que ver con estas ondas de presión que vienen por el aire y que van a fabricarnos, tras el procesamiento encefálico, las percepciones sonoras. El punto en común de estos subsistemas, vestibular y auditivo, además de ser vecinos dentro del hueso temporal, es que son más que orgánicamente vecinos, ya que estructuralmente son muy similares: tubos membranosos que comparte un mismo líquido en su interior, aunque ambos se dedican a funciones muy distintas.

Al otro lado de donde golpea el último huesecillo, llamado estribo - lo veremos con más detalle en capítulo correspondiente al oído-, se encuentra un conjunto de tubos membranosos. Uno en forma de caracol, que da servicio a la audición, y otros tres en forma de semicircunferencias -el **laberinto**-, con disposición perpendicular unos a otros y una base común en donde se producen unos ensanchamientos globulares -los **órganos otolíticos**-, que participan en el sentido vestibular del equilibrio. En éste [a] los *conductos circulares* perpendiculares nos ayudan a *detectar las aceleraciones*

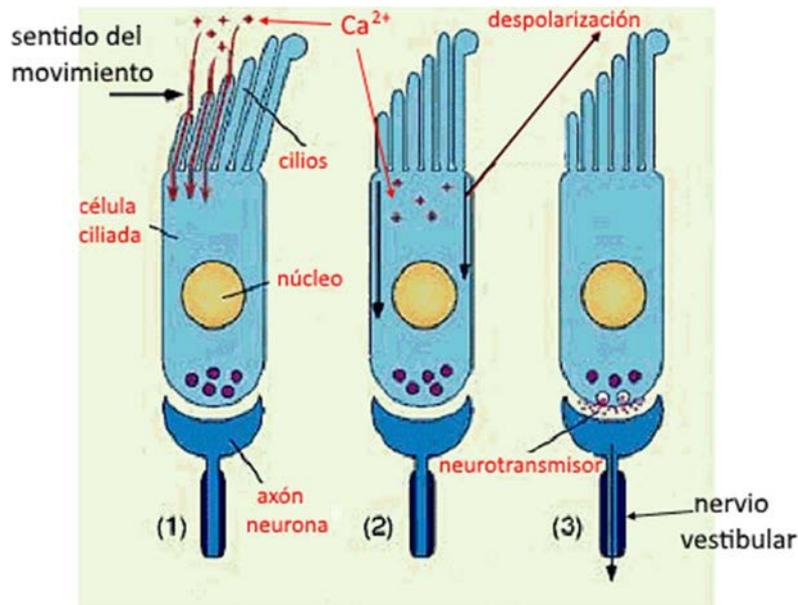
en las rotaciones de la cabeza, mientras que [b] los *sacos* en el entronque común detectan la sensación de la posición estática de la cabeza, así como los *movimientos lineales* de la misma.



Una preciosa imagen en donde se distinguen claramente los canales perpendiculares del laberinto -1,2 y 3- y el caracol del oído. Los números 5' y 7 corresponden a los órganos otolíticos (Wikimedia, dominio público)

En el interior de estas estructuras los sensores primeros, los que inducen los primeros potenciales de acción, son unas células que tienen un cabezal piloso -**células ciliadas**- y que se encuentran en sus paredes bañadas en un líquido linfático. En cada célula, los pelos suelen estar dispuestos en línea recta de mayor a menor, por lo que cualquier movimiento inercial del líquido linfático, al moverse la cabeza, se traduce en un desplazamiento de la línea de pelos. Cuando el desplazamiento es en el sentido del pelo más largo se abren determinados canales iónicos en la membrana de estas células, produciéndose al final la emisión de neurotransmisores y una sinapsis con las dendritas de las **primeras células nerviosas**, cuyos cuerpos se encuentran en un ganglio muy próximo a estas estructuras. Tras el hecho de la sinapsis en las membranas de estas neuronas se produce su despolarización y, consecuentemente, la inducción de un potencial de acción. Los axones de estas primeras neuronas se proyectan hacia el interior del cráneo, transportando la cadena de potenciales de

acción, formando el **nervio vestibular** que discurre parejo al nervio auditivo, que es el que realmente da servicio al sentido del oído.



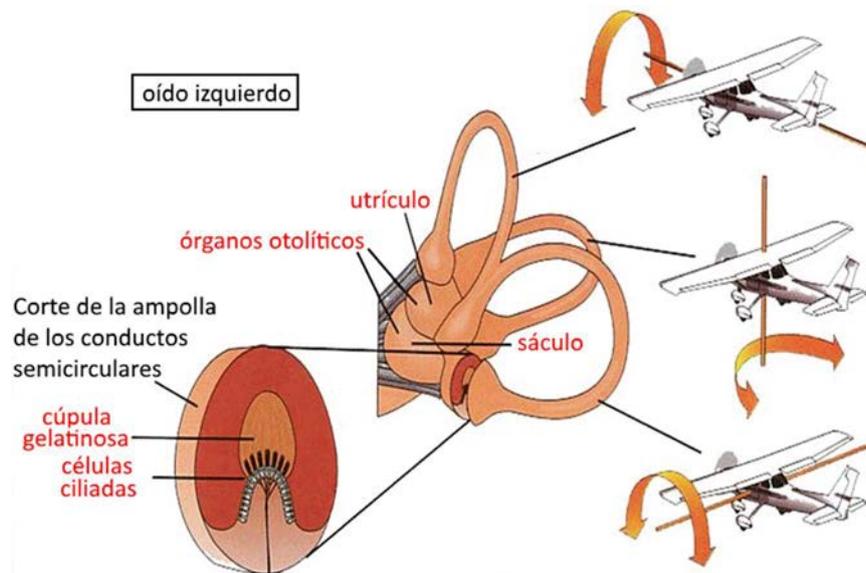
Esquema de funcionamiento en una célula ciliada. Si el movimiento mueve los cilios hacia el de mayor longitud se despolariza la célula, entran iones calcio que provocarán la apertura de las vesículas con neurotransmisores derramándolos en la hendidura sináptica (Imagen: National Academies, fair use)

Pero vamos a ver cómo se organizan este tipo de células con “cabellera”, empezando por los ensanchamientos en la base del laberinto. Hay dos a los que les hemos puesto los originales nombres de **sáculo** y **utrículo**, ya que ambos nombres significan “pequeño saco”. Son lo que hemos llamado los órganos otolíticos que podemos ver en la primera figura etiquetados con los números 5' y 7 respectivamente. Estos saquitos, en cuyas paredes están nuestras células ciliadas sensoriales, están rellenos de líquido linfático en el que “nadan” los otolitos, las “piedras del oído”, que son arenillas de carbonato cálcico con proteínas. Ya podemos imaginar cómo al moverse la cabeza esta arenilla se moverá por inercia dentro de la linfa, y que consecuentemente rozará los pelos de las células ciliadas produciendo su respuesta. Como en el sáculo estas células están dispuestas siguiendo un eje de simetría situado en un *plano vertical paralelo al de simetría de la cabeza* -recordad que hay uno en cada oído-, y en el utrículo según un eje de simetría contenido básicamente

en un *plano horizontal*, la disposición de los cilios abarca un amplio espectro espacial. Así, podemos imaginar que pueden discriminar cualquier tipo de movimiento en cualquier dirección. La disposición del sáculo la podemos imaginar ideal para detectar movimientos de balanceo de la cabeza adelante y atrás, mientras que la del utrículo lo es para cabeceos hacia los lados.

Y ¿qué sucede con los **conductos semicirculares** del laberinto?

Cada uno de estos conductos se inicia en unos ensanchamientos, llamados **ampollas**, en cuyas paredes se encuentran las células ciliadas. Todo el conjunto, canales y ampollas, están también llenos de linfa, como en el sáculo y el utrículo –no en vano están físicamente unidos-. La particularidad funcional es que en cada una de estas tres ampollas todas sus células ciliadas se orientan en una determinada dirección sin seguir ningún eje de simetría, teniendo sus pelos embebidos en una masa gelatinosa que se va a mover, arrastrando a los cilios, cuando la cabeza se mueve de forma acelerada en los sentidos definidos por los planos perpendiculares de los canales semicirculares del laberinto.



Corte de la ampolla de los conductos semicirculares en donde se aprecia la bola gelatinosa que empujará a los cilios según el tipo de movimiento acelerado que se produzca en la cabeza. En el caso del corte de la figura, atenderá a aceleraciones en movimientos de cabeceo (Imagen a partir de la red, fair use)

Al mover la cabeza aceleradamente adelante o atrás, o a los lados, o arriba y abajo, según estas direcciones, la endolinfa de los conductos tiende por inercia a quedarse rezagada, haciendo presión sobre la masa gelatinosa de los pelos, que se ven forzados a moverse también adelante o atrás, provocando el inicio del proceso fisiológico que acabará con la generación de un potencial de acción. Cuando giramos nuestra cabeza se activan -producen potenciales de acción- las células de un canal semicircular de un lado y a la par se desactivan -inhiben potenciales de acción- en el par funcionalmente “gemelo” del otro lado de la cabeza. La imagen de arriba nos puede orientar a la hora de imaginar este proceso. Por ejemplo, al girar la cabeza alejando la oreja izquierda hacia atrás, se produce una situación asimilable a la del avioncito del centro, que va a indicar un giro acelerado en un sentido. Si imaginamos ahora los laberintos contralaterales, los del lado derecho especulares del izquierdo, debemos pensar que también se producirá en el correspondiente avioncito un giro, pero éste hacia el otro lado ya que la oreja derecha ha efectuado un movimiento acelerado pero hacia adelante. Los avioncitos son nuestras ampollas de los conductos semicirculares, con sus células ciliadas activando potenciales de acción de distintas características en un lado y en otro.

Esta diferente información generada en las células ciliadas es transmitida por el nervio vestibular hasta el tronco encefálico, en donde se balancea los pares de datos homólogos contralaterales. Con esto, las estructuras encefálicas superiores reciben una información importantísima que, integrada con otra que le venga de otros sistemas, le permite tomar las decisiones motoras adecuadas que necesitamos para mantener el equilibrio corporal y no caernos. Pero esto lo veremos en el siguiente capítulo

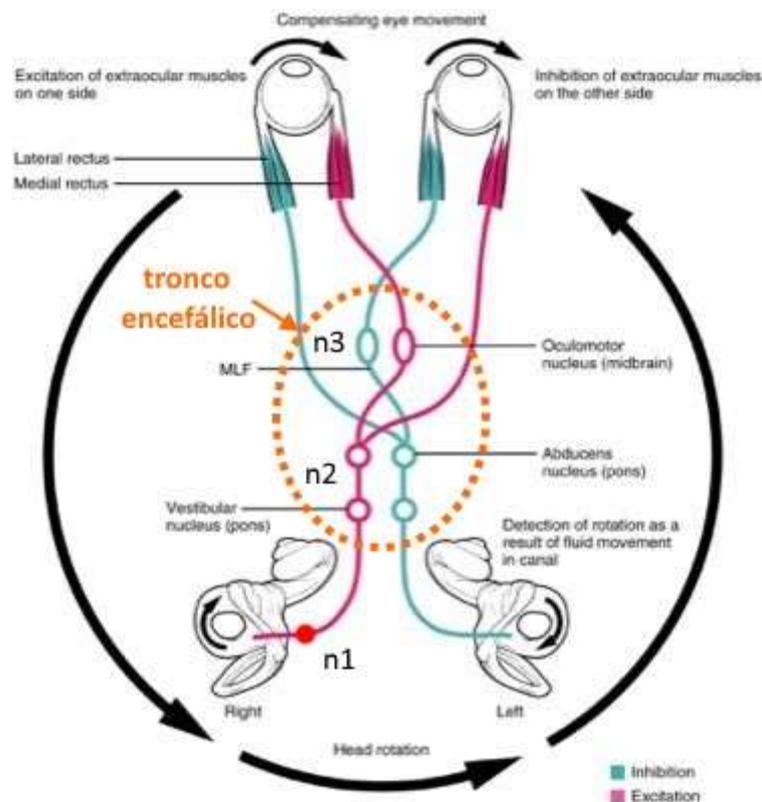
08: Sistema vestibular II. Procesos.

En este capítulo vamos a completar la información acerca del sentido que nos proporciona los datos necesarios para poder mantener el equilibrio de nuestro cuerpo. En el anterior vimos cómo eran los sensores de la información y en qué lugar del cuerpo se encontraban: el oído interno. En los siguientes párrafos acompañaremos a los potenciales de acción, generados por la actividad de estos sensores, en su camino hacia estructuras neuronales más profundas en donde se verán sometidos a procesos cerebrales más complejos. Volvamos, pues, al **nervio vestibular**, uno de los dos que componen el nervio craneal VIII. Y como ya comenté en otros capítulos, antes de entrar definitivamente en harina os recomiendo que repaséis las tres primeras de esta serie si no las habéis leído ya.

En las ampollas del laberinto y en los sacos donde flotan los otolitos se habían generado potenciales de acción, todos ellos semejantes, como no puede ser de otra manera dada la común fisiología de todos los tipos de neuronas. Ante esta realidad que parece contraria a una buena operativa posterior, hay algo que viene en ayuda del cerebro, y es que estos potenciales van por unas vías exclusivas, que en el caso que nos trae es el manojo de axones de nuestro nervio vestibular. Cuando lleguen a la profundidad del encéfalo éste “sabrán” qué es lo que le dicen, porque proceden de donde proceden, y también “sabrán” que tiene inequívocamente que ver con las estructuras cerebrales a donde van a llegar. Estructuras en donde se va a utilizar la información para trabajar diversas funciones propioceptivas y de equilibrio que nos pueden resultar elementales y evidentes de puro automáticas y reiterativas que son.

Como, por ejemplo, la de estabilizar los movimientos de los ojos cuando la cabeza, por sí sola o arrastrada por el movimiento del cuerpo, cambia de posición. Lo que es lo mismo que decir que su eje de proyección hacia delante, hacia el campo de visión, ha cambiado,

cosa que a lo mejor no le interesa a los ojos, que deben seguir fijos en el punto hacia donde miraban. Imaginad que vais en el tren mirando por la ventanilla a un árbol espectacular. El tren debe seguir por la vía, que gira hacia la derecha... y sin embargo nuestros ojos no acompañan el giro inducido en nuestro cuerpo y por tanto en la cabeza, sino que siguen fijos en el árbol que captó nuestra atención. Lo más sorprendente es que el movimiento de corrección que han realizado los ojos coincide exactamente con el movimiento experimentado por nuestra cabeza, tanto en amplitud como en velocidad. Y además lo han hecho de forma automática con una perfección que nunca hubiéramos conseguido si lo hubiéramos querido hacer de forma voluntaria.



Esquema de la operativa del reflejo vestibulo-ocular con una indicación de la estructura neuronal que lo soporta (Imagen modificada de la red, fair use)

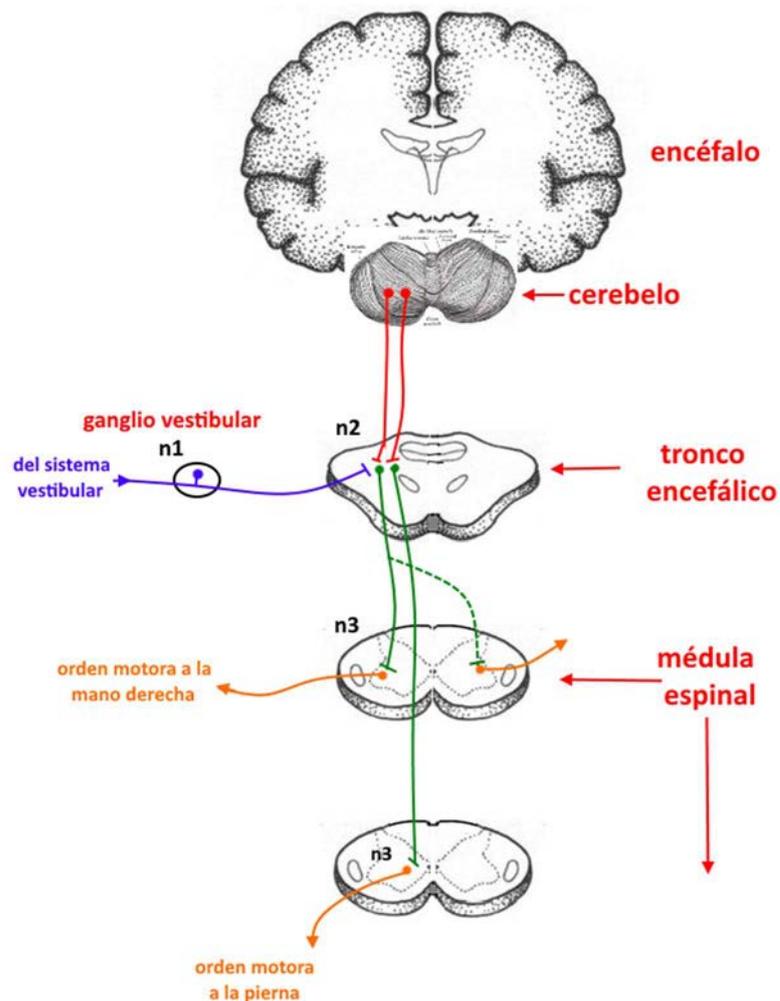
Este movimiento reflejo de los ojos, conocido como **reflejo vestibulo-ocular**, es inducido por la señal que se inició en el vestíbulo del oído y que recogió una primera neurona [n1] de la cadena de sinapsis situada en un ganglio específico dentro del hueso

temporal de la cabeza. La señal inicial circula a través del axón de esta primera neurona, como parte del nervio vestibular, y va a hacer un primer relevo sináptico con una segunda neurona [n2] que se encuentra ya en el tronco encefálico, muy cerca de las primeras neuronas que gestionan las señales del sonido -que veremos más adelante en el correspondiente capítulo-. Las segundas neuronas extienden sus axones hacia las terceras neuronas [n3] de la cadena de sinapsis, que se encuentran en los núcleos neuronales motores de los músculos que mueven los ojos, situados también en el tronco encefálico. En estos núcleos se gestiona este reflejo ocular que estamos analizando.

Una segunda importante función que se gestiona en este sistema vestibular es la de **controlar la postura corporal**, es decir, mantener el equilibrio del cuerpo como respuesta a movimientos de la cabeza. Será responsable del control de la postura de nuestra estructura de soporte. Si tropezamos la cabeza se nos va para adelante, o hacia los lados... lo cual aprovecha el cuerpo para generar una señal en el sistema vestibular -recordad los avioncitos del capítulo anterior- que le avisa de que el cuerpo se cae y hacia dónde lo hace. Con ello adquiere la información precisa y necesaria como para poder emitir las órdenes motoras necesarias para que la cosa no vaya a mayores. La respuesta suele pasar por intentar contrabalancear el origen, echando la cabeza hacia atrás y adelantando de forma rápida e inconsciente los brazos en la dirección de la posible caída, a la vez que colocar una pierna en la posición más idónea para alinear el centro de gravedad corporal con la base de apoyo. Una respuesta funcional muy parecida nos nace cuando intentamos viajar de pie en el bamboleante autobús, lo cual nos obliga a un continuo ajuste de la posición para compensar los movimientos del vehículo mediante órdenes motoras a los músculos correctores de nuestras piernas.

En este proceso intervienen las neuronas del cerebelo que dan la instrucción motora refleja precisa a los brazos, por una vía neuronal doble derecha-izquierda, o a las piernas por una vía ipsilateral. Es bastante coherente con lo que pensamos que pueda haber hecho un proceso evolutivo por el cual nos parece más eficaz el poder extender ambos brazos, en vez de uno solo, para prevenir los resultados de un

traspiés, a la vez de que sea también más eficaz el hecho de poder afianzar el cuerpo sobre un punto de apoyo que alinee el centro de gravedad con dicho punto de apoyo, una pierna. Es sorprendente lo que puede hacer un mero líquido linfático y unos otolitos cuando se ven sometidos a unas aceleraciones bruscas.

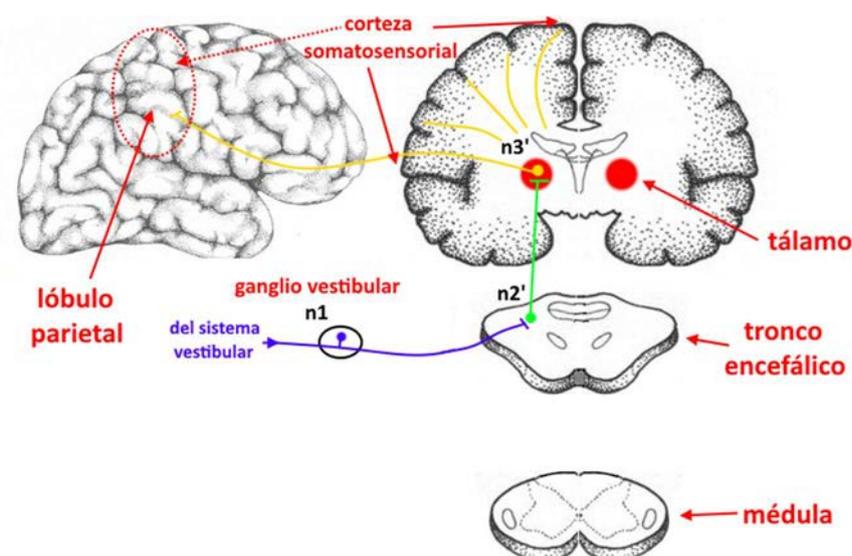


Circuitería neuronal del sistema vestibular referente al control de la postura corporal

Pero aún podemos imaginar algo más elaborado. Nuestro sistema vestibular nos proporciona la sensación de movimiento y de posición de nuestra cabeza en relación al medio exterior. Es decir, proporciona una **interconexión sensorial medioambiental**. Pero este medioambiente lo percibimos con mucha fuerza gracias a lo que vemos, oímos o percibimos con otros detectores del exterior. Así que

las señales vestibulares deben seguir además unos caminos parejos a estos últimos sentidos. Es decir, deben ir al tálamo, como portero introductor y modulador de las entradas sensoriales hacia los procesos complejos del encéfalo. Y así es.

Desde los núcleos neuronales del borde del tronco encefálico donde se realizan las primeras sinapsis de los nervios auditivo y vestibular [**neuronas n2'**], se proyectan axones hacia el tálamo, que entran por su parte posterior, muy cerca de donde también lo hacen los axones que transportan información visual o auditiva. Las neuronas del tálamo [**n3'**] toman el relevo y lanzan sus axones hacia la corteza parietal, se cree que hacia dos zonas. La primera de ellas se encuentra en la corteza somatosensorial primaria, de la que ya hablamos al tratar del sentido del tacto, y que bien pudiera ser donde obtenemos representación de nuestra propiocepción. Otros axones del tálamo vestibular acaban en la corteza parietal colindante de la somatosensorial primaria, una corteza sensorial secundaria en la que, en consecuencia, se llevan a cabo integraciones con señales de otros procesos encefálicos -visual, auditivo, somatosensorial- que al final nos van a ayudar a definir la imagen del cuerpo y sus movimientos en relación a nuestro entorno.



Esquema de la cadena sináptica del sistema vestibular en su función de interconexión sensorial medioambiental

Por último diré que hay también una correlación entre el sistema vestibular y un conglomerado de células que recorren el interior del tronco encefálico, la **formación reticular ascendente**, el cual se encarga, entre otras cosas, de desencadenar el espasmo del vómito. Hay una clara relación entre las reacciones somatosensoriales y las viscerales, lo cual nos explica lo mal que nos podemos sentir tras una travesía marítima o, incluso sin movernos, en una situación de vértigo incontrolado. Estas sensaciones son aspectos parciales de una experiencia más general de malestar visceral que puede aparecer como subproducto de los procesos en los que se integra aguas arriba la información de la formación reticular con las realimentaciones habituales –de las que algo sabemos ya- entre el propio sistema vestibular, el tálamo y las cortezas.

Con esto damos por finalizada la visita panorámica del sistema sensorial vestibular, cuyo origen lo encontramos en unas pequeñas estructuras enterradas en el hueso temporal y que participan con sus datos en el equilibrio estático y dinámico del cuerpo, así como colabora también con los sensores de la propiocepción en dar a la corteza somatosensorial la posibilidad de ajustar la posición de nuestro cuerpo. Hemos visto también cómo parte de su información es manejada también en el propio tronco encefálico, sin necesidad de acudir a instancias cerebrales superiores -estamos hablando de la coordinación entre el movimiento de cabeza y ojos-, lo cual nos hace pensar en que quizás fuera éste el primer y más antiguo centro gestor del equilibrio entre el cuerpo y su entorno, que pasaría más tarde a estancias encefálicas superiores. Por último, hemos visto también el cómo de la correlación entre los movimientos corporales y su respuesta visceral.

En el capítulo siguiente hablaremos de un nuevo sentido muy emparejado con el del tacto: el sentido del dolor y la temperatura.

09: Dolor y temperatura

En este capítulo vamos a analizar el **sentido nociceptivo**, etimológicamente *noci-*, daño, *capere*, coger. Es decir, el que nos va a dar al final la percepción del dolor. Y de la temperatura, que a veces se percibe también como dolorosa. En cualquier caso, nos vamos a quedar exclusivamente en la descripción de la captación de las señales que se van a sentir como dolorosas y en el transporte de esta información hasta el cerebro. No vamos a profundizar en el detalle de la evidente influencia de las emociones en la percepción del dolor, aunque daremos alguna pincelada del momento del proceso en donde se mueven y los sistemas neuronales que intervienen. Y, como ya os comenté en otros capítulos, antes de entrar definitivamente en harina os recomiendo que repaséis las tres primeras de esta serie si no las habéis leído ya.

Quién puede dudar acerca de la importancia vital de “sentir” el dolor. Lo podemos imaginar en esta situación hipotética: Estoy tratando de sobrevivir lo mejor que puedo en una cabaña perdida entre las nieves de la montaña, tras una larga jornada de esfuerzo. El frío es aterrador, pero me da igual, tengo encendida una gran fogata que me proporciona por delante las calorías que voy perdiendo por la fría espalda. Estoy participando de una interesante charla con mis colegas, tan interesante que casi no me doy cuenta de que he acercado demasiado el pie hacia el fuego. De repente huelo a carne asada, miro a todos los lados, hasta que me fijo en que mis pantorrillas lucen un agradable colorido de un churrasco de morcillo, mientras destilan unos olorosos vapores que han excitado mi pituitaria. ¡Dios mío, no he notado el calor, no me ha funcionado mi sentido de la temperatura y del dolor! Me he puesto en riesgo de perder la pierna. Realmente acabo de apreciar el valor vital del sentido de la nocicepción.

Por lo general ese sentido actúa avisándonos en todo momento de la potencial amenaza que incorpora un variado abanico de circunstancias con las que nos podemos encontrar en el día a día. Nos va a alertar de un daño que podría recibir nuestro cuerpo, por lo que

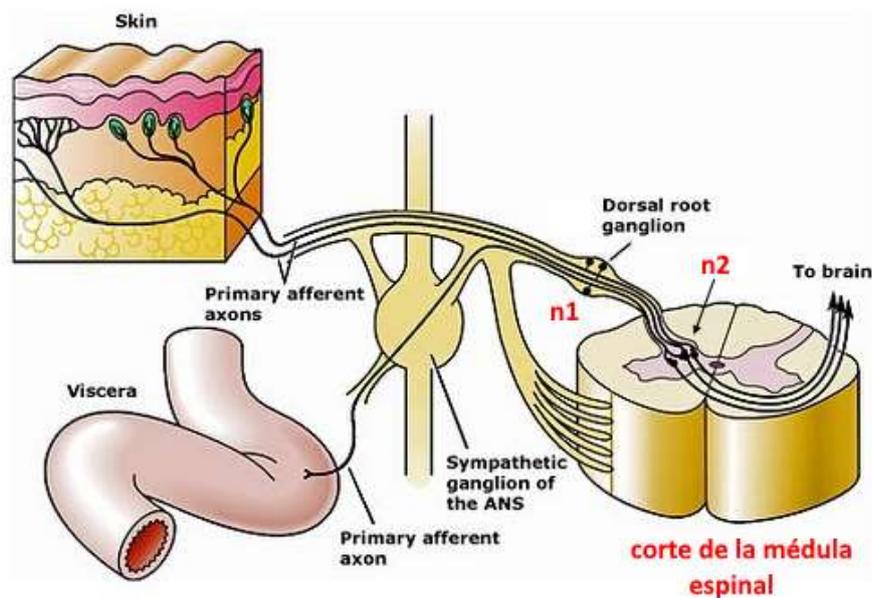
es fácil hacernos idea acerca de la importancia de esta herramienta en nuestro continuo navegar por el mundo que nos rodea. Y no sólo nos ayuda en este aspecto, sino que también colabora con nuestro sistema de propiocepción –el conocimiento en cada momento del estado de la arquitectura física de nuestro cuerpo-, con quien comparte estructuras y de cuya importancia hemos hablado en un capítulo anterior.

Entremos ya en la descripción de las estructuras sensoras de aquellos estímulos externos que a la fin nos van a producir percepciones de dolor o de temperatura. Los **nociceptores** varían según su localización en el organismo o según el tipo de estímulo lesivo que los excita –químico, mecánico o térmico-. La mayoría se encuentran en la piel, pero también los hay en el interior del cuerpo, como puede ser la superficie de las articulaciones y de los huesos, o en algunos órganos.

Se suele percibir el dolor cuando se produce una agresión que trascienda un cierto umbral en cualquier parte del organismo. En un primer momento, en la zona afectada, se liberan sustancias químicas orgánicas que son protectoras de las células dañadas, pero que por contra vuelven hiperestésicos a los nociceptores, que disminuyen así su umbral de activación, es decir, se han vuelto más sensibles. Bastantes de estos nociceptores no solamente son sensibles a agresiones que puedan ser dolorosas, sino que también inician el proceso de percepción del calor-frío, al tener unos canales iónicos que se activan, además, por altas o bajas temperaturas. No en vano hay un espectro de temperaturas en el que nuestro organismo se encuentra cómodo, mientras que fuera de él el frío o el calor lo percibimos como doloroso. Es curioso cómo hay determinadas sustancias, como la “quemadora” capsaicina picante o el “frío” mentol, que nadie diría que tienen que ver con el frío o el calor, pero que su “agresión” realmente nos produce este tipo de percepciones. Y es así porque tales sustancias activan esos canales termocéptores paralelos a las vías del dolor.

Al igual que lo que en un capítulo anterior decíamos para las sensaciones del tacto, y es lógico el pensar que sea así, la detección primera se encuentra en las primeras capas del tejido dérmico. Pero

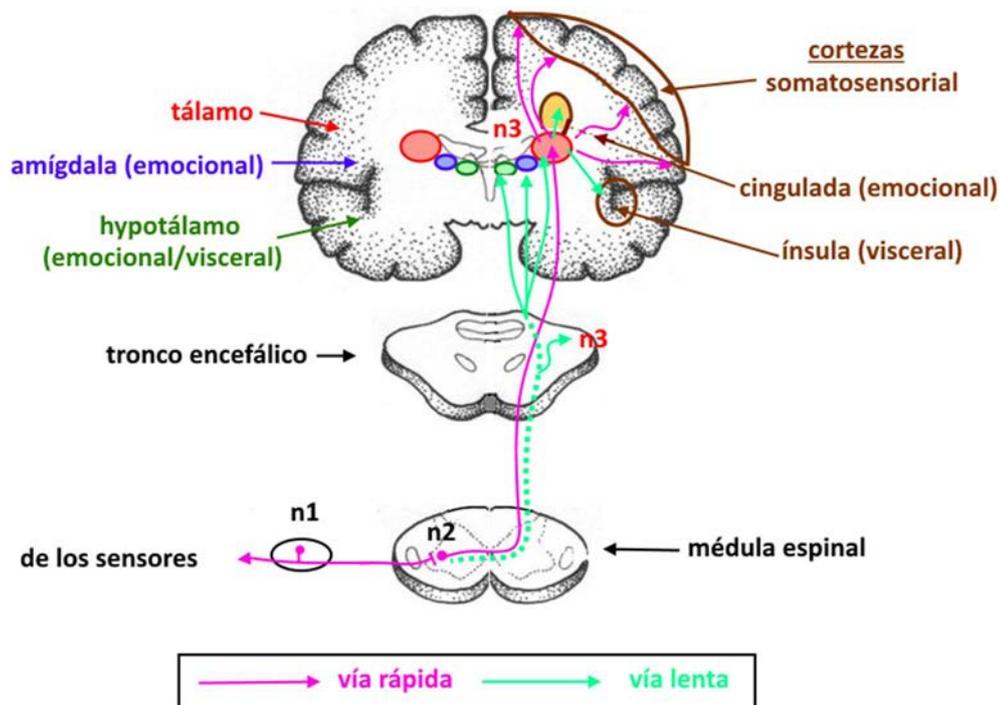
en este caso no encontramos unos corpúsculos especiales, sino que, directamente, la epidermis está inervada por las terminaciones de los axones de unas primeras neuronas [n1] en la cadena de transmisión de la información dolorosa. Adelantamos que estas neuronas tienen su cuerpo en los mismos ganglios, junto a la columna vertebral, donde comentábamos que también se encuentran las primeras neuronas del tacto. En las membranas celulares de los terminales de esos axones hay incrustadas unas proteínas especiales que se comportan como canales iónicos, sensibles a variadas moléculas iniciadoras, por donde se desestabilizará el equilibrio iónico entre el interior y el exterior de la célula neuronal, provocando así el inicio de la cadena de potenciales de acción. Todos los potenciales son iguales en amplitud, pero será su frecuencia la que determine la intensidad dolorosa.



Primeros elementos de la cadena sináptica del dolor o la temperatura (Imagen de la red, fair use)

Las rutas del dolor y la temperatura que estamos iniciando con estas neuronas presentan una doble versión: la **autopista rápida** y la **lenta**. Que seguirán independientes, cada una con su cometido, hasta el final del proceso. En (a), *la rápida*, los axones están bastante mielinizados, lo que, recordad lo que decíamos en el capítulo 04, supone velocidad en la transmisión del potencial de acción. En (b), *las lentas*, los axones están escasamente mielinizados, por lo que la velocidad de transferencia de la información es baja. Evidentemente, si

disponemos de estas dos alternativas paralelas es por algo, la evolución las ha puesto ahí porque ambas prestan su servicio en las labores de la supervivencia. Las primeras van a transportar, a la vez, información mecanosensorial y térmica; mientras que las segundas, más rápidas, vehicularán estímulos más variados: además de los mecanosensoriales y térmicos también se atreven con las reacciones producidas por agresivos químicos, como puede ser el cloro con el que nos hemos salpicado cuando estamos limpiando la piscina, la capsaicina tras frotar una guindilla en la piel o la histamina que el propio cuerpo lleva a la zona donde nos ha picado un mosquito.



Esquema simplificado de las dos vías de la percepción del dolor/temperatura. La rosa se encarga de la localización del dolor, mientras que la verde se encarga de los aspectos emocionales y sus repercusiones viscerales.

Parece ser que la vía rápida va relacionada con la primera fase de la sensación del dolor, la de la percepción aguda de una agresión en un lugar muy localizado, mientras que la vía lenta es la encargada de llevar la información que produce la percepción emocional del dolor, la que servirá para el futuro. Algunos conciben esa diferencia como la manifestación de un dolor con carácter primario diferenciado de otro tipo de dolor, secundario.

¿Por qué estas dos rutas, la rápida y la lenta? Imaginemos que estamos a punto de sufrir un pisotón. Nos pisan y... ¡ay! un dolor agudo insoportable que desaparece rápidamente para dejar posiblemente otra sensación, la de un vaivén doloroso, una pulsación de “se me va, se me viene”, mucho más duradera. La primera sensación dolorosa se asocia a la percepción sensitiva relacionada con el lugar del daño, todo muy racional, mientras que la segunda fase correspondería a la impronta emocional de la agresión, todo muy inconsciente: ¡algo horroroso sucede al comer pimientos jalapeños! ¡lo recordaré para el futuro!

La **vía rápida**, por tanto, trabajaría para dar información “*de lugar*” al encéfalo, información muy necesaria para, junto con la propioceptiva, tomar decisiones motoras para paliar los efectos de la fuente del dolor. Ya sabemos, por lo que dijimos al hablar del tacto, que la “localización”, el mapa topográfico sensorial de nuestro organismo, se encuentra en la corteza primaria somatosensorial, en el lóbulo parietal, justo detrás de la cisura central que lo separa del lóbulo frontal. Así que esta primera carretera informativa, la rápida, lleva un camino muy semejante a la del tacto. Una primera neurona [n1] gestora del producto, que como hemos dicho tiene su cuerpo en un ganglio adosado a la columna vertebral, llega con su axón y la información sensorial hasta una segunda neurona [n2] localizada en la médula espinal. Ésta, que se comporta como la encargada de la logística del producto, recoge el testigo, lo cambia de lado y lo lleva hasta el tálamo, en el interior del encéfalo. Desde allí, una tercera neurona [n3], la encargada inicial de la manufactura, lleva la señal hasta nuestra conocida corteza somatosensorial, a partir de la cual se integrará con otros procesos que determinan la percepción dolorosa y lo que consiguientemente haya que hacer. Esa es la vía rápida.

La **vía lenta** lleva otros caminos que podemos imaginar más complejos, ya que sus objetivos parecen que también lo son: poner la “*matrícula emocional y afectiva*” al suceso y actuar según esta información hasta cierto punto abstracta. Pensemos lo importante de esta gestión, ya que en el futuro esta experiencia emotivamente dolorosa llevará esta matrícula: *emotivamente dolorosa*. Con ello, el

cerebro almacenará en su memoria una información valiosísima para tomar decisiones futuras.

Ya podemos imaginar que las fibras lentas llevarán la información por derroteros distintos a los de las rápidas. Tal como entran en el cráneo comienzan a establecer sinapsis con diversas zonas ganglionares [n3] que se encuentran en el tronco encefálico, mucho antes de donde se encuentra el núcleo talámico. En ellas se facilita y modula el tránsito de las señales del dolor y temperatura –en la *formación reticular ascendente*-, o se ponen en guardia los niveles de atención o el estado de vigilia –en la *sustancia gris periacueductal*-. Pasadas estas estaciones del tronco, la vía lenta alcanza núcleos de neuronas [diversas n3] directamente relacionados con el sistema emocional. Estamos hablando de la *amígdala* -núcleo duro de la gestión de ciertas respuestas emocionales, en particular la del miedo- y del *hipotálamo* -núcleo duro de la gestión hormonal durante la respuesta emocional-.

Tras estas “derivaciones” sinápticas, el axón de la neurona de la vía lenta ya llega al tálamo, en donde en unos núcleos no relacionados directamente con la corteza somatosensorial, pero sí con otras cortezas que podemos llamar emocionales, le esperan las terceras neuronas [n3] de la cadena de sinápsis, unas nuevas iniciadoras de la manufactura del producto. A partir de estas neuronas n3 sigue la cadena, proyectándose a zonas corticales del encéfalo que están más relacionadas, como ya hemos comentado, con la cognición que con la localización de los estímulos somatosensoriales. Estas últimas cortezas -la *cingulada anterior* y la *ínsula*- consideradas parte del sistema límbico, están situadas en la parte interna anterior del cerebro, protegidas por los lóbulos frontal y temporal (ver el esquema de la figura anterior).

Lo que hemos descrito hasta aquí corresponde a una visión general del dolor que se inicia en algún punto de nuestro cuerpo. Pero también la excitación dolorosa o de temperatura puede tener origen en la cara. El sistema neuronal que gestiona este tipo de percepciones de la cara está canalizado inicialmente por el *nervio trigémino*. La fisiología de la excitación y los caminos de los relevos de los potenciales de acción -y los resultados percibidos- son muy similares a lo visto para el resto

del cuerpo aunque, lógicamente, la mayoría del proceso sucede a la altura del tronco encefálico, pero también con una vía que va desde el tálamo hasta la corteza somatosensorial, que será la que defina el lugar de la agresión en la cara, y una segunda vía, más particular, formada por los axones de las segundas neuronas [n2] situadas en el tronco encefálico. Estas neuronas, a la par que envían sus axones hacia el tálamo, emiten unas ramificaciones que establecen sinapsis con otras neuronas situadas en núcleos particulares de dicho tronco, que son muy antiguos desde un punto de vista evolutivo. Comprenderéis el porqué si os digo que en ellos se gestionan las funciones más básicas de la vida –sueño, vigilia, ritmo cardíaco y respiratorio, pulsos reflejos como el hipo, la tos, el vómito...-. Así que el camino doloroso del trigémino establece comunicación con los núcleos de la *formación reticular* del tronco, la cual genera una rápida respuesta motora refleja -que es lo mismo que inconsciente- de defensa frente a las agresiones. Y así toseremos si nos atragantamos o lloraremos si nos entra una mota en el ojo. Es como si inconscientemente nos hubiéramos anticipado al dolor y hubiéramos colocado un parche por adelantado frente al potencial daño que este dolor hubiera avisado.

En resumen, la información que llega desde la dermis y que conformará la percepción subjetiva de dolor o temperatura, tras una serie de relevos, tendrá un triple tipo de procesamiento final cada uno con un propósito específico. Uno, en la corteza primaria somatosensorial, en donde sabemos que cada punto representa otro gemelo del cuerpo, complejo neuronal en el que “**interpretamos el lugar**” donde se está produciendo la posible agresión. Hay un segundo procesamiento en las estructuras encefálicas precisas -emocional/visceral- que consigue tres resultados que, resumidos, podemos imaginarlos como el “**qué hacer con el cuerpo**”: a) poner al cuerpo en una situación fisiológica vital de acuerdo a las señales dolorosas del momento; b) tintarlas de sentido emocional; y c) someterlas a un procesamiento cognitivo de análisis y decisión más elevado. Todo ello nos servirá para determinar qué hacer, que actitudes tomar, que movimientos realizar... ante la magnitud de la amenaza dolorosa exterior. Además, a todo lo anterior hay que añadir un último procesamiento inconsciente, que afecta principalmente a

las agresiones en la zona frontal de la cabeza, que provoca “**reflejos defensivos motores**”.

El haber descubierto la realidad de esta maraña de procesos que se realimentan quizás nos lleve a considerar una vez más ¿qué es lo que sentimos como percibido?, ¿qué es la sensación de dolor, a veces tan intensa que nos cuesta creer que pueda haber personas con patologías que les lleven a no sentirlo? Sorprendentemente, parece como si una cosa fuera el sentir que una cosa duele -la percepción, el hecho en sí- y otra el sentir que realmente es doloroso -la sensación, la cualia-. Hay enfermos que así lo experimentan, enfermos que tienen dañada la vía emocional del dolor y dicen que experimentan esta impresión, “*hay dolor*” en tal sitio, pero “*no duele*”. Parece como si el dolor, al esconderse velado por la nebulosa de la actividad cerebral, fuera simplemente el resultado de unos desconocidos caminos por los que este director de orquesta se saca un conejo de la manga para proponer a nuestro cuerpo la ilusión de “experiencias” -por consiguiente absolutamente subjetivas- con el único propósito de que no desentonemos dentro del escenario que nos toca vivir en cada momento. Si es así, ¿existe realmente el dolor? Podríamos decir lo mismo que decía el filósofo francés Nicolás Malebranche ya en el siglo XVII acerca de la percepción del calor -que ahora sabemos que podemos extrapolar al dolor-: “*Cuando uno siente calor, no se engaña en absoluto por creer que lo siente... pero uno se engaña si juzga que el calor que siente está fuera del alma que lo siente*”... En definitiva: ¿Existe el dolor?

No sé la respuesta... pero ahí queda la *profunda* pregunta -el adjetivo lo propongo yo-. En el capítulo siguiente comenzaremos a hablar de otro sentido, el de la visión, sobre el que descansa gran parte de nuestra guía de navegación por el mundo. Y quizás por esta importancia subjetiva, o por su continua presencia en nuestras vidas, me parece aún más misterioso lo que me propone. Pero no adelantemos pensamientos, que a la postre deben ser de cada uno.

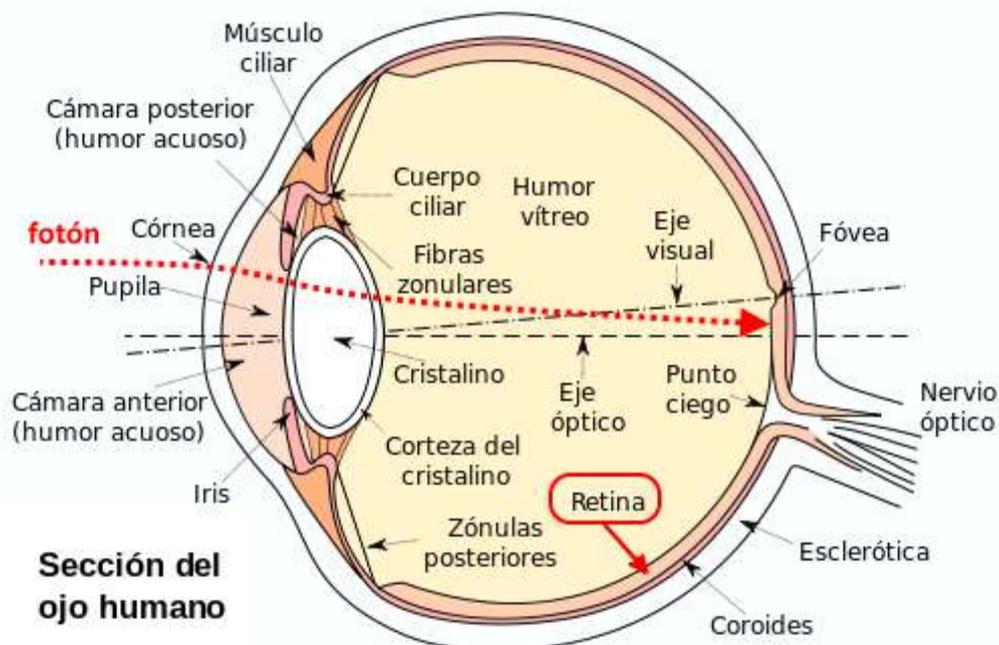
10: La visión I. Detección.

Este capítulo vamos a dedicarlo a explorar el sistema de la percepción visual. A los que no tenemos problemas irresolubles con el sistema de percepción de la visión, como pudieran ser la ceguera u otras minusvalías importantes, nos parece que éste es el sentido “por excelencia”. *¡Ver para creer! ¡Si no lo veo no lo creo! ¡De lo que no veas ni la mitad te creas!* dice el sabio refranero popular: ¿qué haríamos sin poder ver nada de lo que pueda haber por ahí afuera? ¿Si lo primero que se nos viene a la mente son imágenes de lo recordado o de lo que estamos planificando para el futuro! No obstante, no me atrevo a decir que si me faltara la vista iba a ser incapaz de vivir, puesto que hay mucha gente que nos demuestra lo contrario al manejarse perfectamente sin este sentido. Pero... la verdad es que yo veo bien y no me gustaría dejar de hacerlo. Es mi percepción, como también la tiene cualquier otro animal mamífero de la especie humana. Posiblemente sería distinta si yo fuera un topo. Y con toda seguridad lo sería si fuera una libélula, con sus magníficos ojos compuestos.

¿Por qué esta sensación de sentido preeminente? Quizás -posiblemente- sea una mera impresión subjetiva de los humanos. O quizás su importancia resida en el inconsciente de la complejidad estructural de las cortezas dedicadas a la visión, indicio de la complejidad de los procesamientos cerebrales implicados. O tal vez quizás sea porque la retina es realmente parte de la masa encefálica y, aunque se hable de un *nervio óptico*, no lo es como una estructura independiente del cerebro. Si estudiamos el desarrollo de un embrión veremos que casi a la par de que en su tubo neuronal aparece el tálamo, a su lado, y casi en el mismo momento, aparece otra prolongación, la vesícula óptica, que dará lugar más tarde a la retina y a la capa celular pigmentada que la recubre. Sea lo que sea, la información que presenta al cerebro es fundamental para sus procesos mentales y de percepción. Ahí afuera hay cosas que se interrelacionan electromagnéticamente, que emiten y reciben continuamente fotones. Algunos de estos llegan a nuestros ojos e incluso, de entre ellos, hay

algunos que al ser detectados pueden generar en nosotros percepciones de cosas sólidas y de colores.

La **retina** es el gran sensor de la vista^[1]. Sus raíces evolutivas se hunden en ciertos pigmentos que poseían alguna de las primitivas bacterias -y aún hoy en día sigue siendo un procedimiento vigente-. Cuando eran excitados por la luz provocaban una serie de procesos fisiológicos en la célula que desembocaban en un movimiento condicionado por la posición del foco luminoso. Hoy estos pigmentos, o sus descendientes químicamente mutados, los encontramos en las neuronas de la retina de nuestros ojos.



Sección anteroposterior del ojo humano. Se ha resaltado la posición de la retina y dibujado la posible trayectoria de un fotón exterior a medida que va penetrando en el ojo, siendo refractado por los diversos medios que encuentra en su trayectoria hasta la retina (Wikimedia, dominio público)

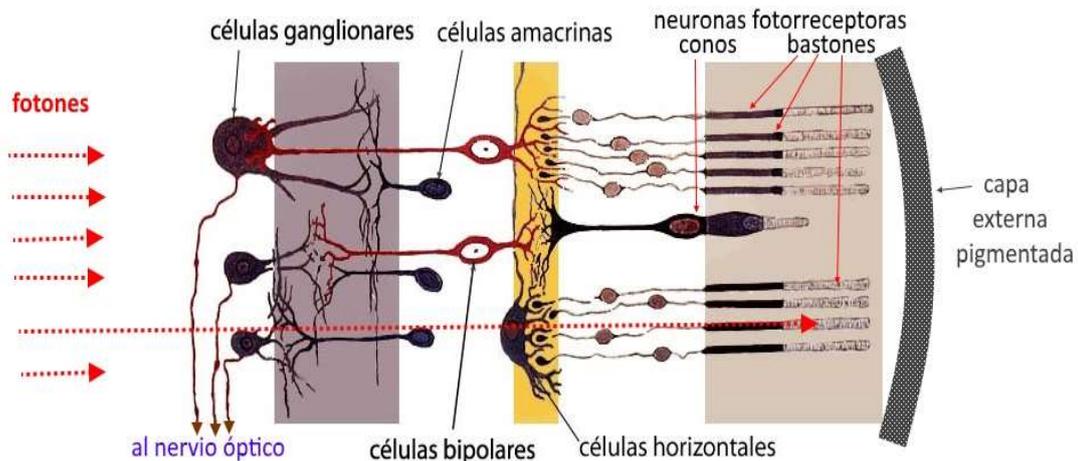
Lo que hay por delante de la retina, el ojo, no es más que una cámara de ajuste fotográfico, de forma que la “imagen” transportada por los fotones, tras atravesar los diferentes medios oculares y ser refractada en ellos, consiga “caer” perfectamente y con definición sobre la retina. Ni un poco por delante, ni un poco por detrás. Ésa es la teoría, que no siempre se cumple con tal exactitud como muy bien saben

miopes e hipermétropes. ¿Cuál será entonces el mapa del exterior que queda “dibujado” sobre nuestra retina? Es fácil imaginarlo por nosotros mismos, y para ello propongo que prestes un segundo de atención al caso real de este momento en que lees estas letras. Lógicamente, lo que ves a la derecha de tu campo visual, tras entrar por el orificio de la pupila, tiene que reflejarse en la parte izquierda del fondo de ojo, en los dos. Lo mismo pasará con todos los objetos que se encuentran a la izquierda de tu **campo visual**, que tendrán su reflejo sobre la parte derecha del fondo de ambos ojos. Y al igual deberemos pensar con el abajo y el arriba. Total, que el ojo le está dando la vuelta a la realidad exterior, cosa que, como veremos en el capítulo siguiente, no le produce ninguna preocupación al cerebro. No en vano vemos, o creemos ver según nuestros criterios, lo de arriba, arriba, lo de abajo, abajo, y las cosas en el lado que les corresponde. Hechas estas consideraciones geométricas vayamos ya a los sensores de la retina.

La retina está compuesta por capas de hasta cinco tipos de neuronas. Lo más curioso es que las que realmente son sensibles a la luz, formando la capa más externa, están “tapadas” por las otras cuatro capas. Es una curiosidad anatómica que no se da en los ojos de los cefalópodos, tan complejos como los nuestros, en los que la luz incide directamente sobre los fotorreceptores. Quizás esto sea así en los humanos porque la capa externa pigmentada realiza una función principal en la regeneración de los pigmentos de las **neuronas fotorreceptoras**. Las neuronas de la capa más interna, llamadas *ganglionares*, son las que van a formar con sus axones el nervio óptico que transmitirán hasta el cerebro los potenciales de acción con la información visual recogida en el receptor “retina”. Entre ambos tipos funcionales de neuronas existen otras de comunicación horizontal y vertical. Estas últimas se llaman *bipolares*, precisamente por tener un doble axón entre las fotorreceptoras y las ganglionares, pudiendo conectar cada una de ellas con una o varias de éstas últimas.

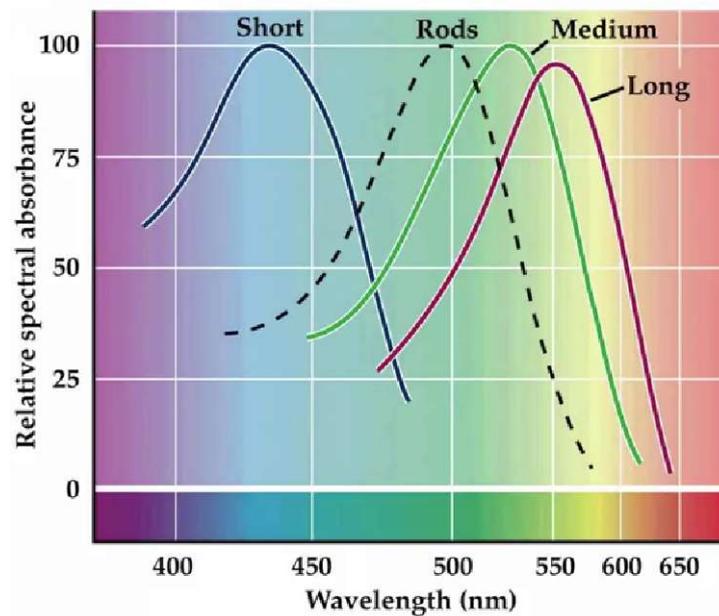
Pasemos ahora a las fotorreceptoras. Hay dos tipos de estas neuronas: los *conos* y los *bastones* -llamados así por la forma de sus cabezas, como podemos apreciar en el dibujo de arriba-, cada una con sus particularidades que luego comentaremos. Y hay muchísimos más de

los últimos que de los primeros en una proporción de 20/1. En sus cabezas se encuentran unas proteínas específicas de la familia de las opsinas, las cuales son factor principal en la transducción de la energía del fotón luminoso que incide sobre la neurona fotorreceptora, por el que se generará en su membrana una variación de potencial.



Organización simplificada de la retina (modificado de un dibujo de Santiago Ramón y Cajal). La luz entra por la izquierda y debe atravesar todas las capas celulares hasta llegar a los conos y bastones que se encuentran a la derecha del esquema (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Al final, y tras un proceso fisiológico más o menos complejo, esta variación de potencial va a ser el origen de un potencial de acción en la neurona ganglionar del nervio óptico, “proporcional” a la excitación luminosa inicial. En la familia de los conos encontramos tres tipos de opsinas, mientras que en la de los bastones sólo una, la rodopsina (de *rod* -bastón en inglés- y *opsina*). Cada uno de los tres tipos de opsinas de los conos está modulada para responder a un espectro concreto de frecuencias de los fotones que le lleguen: una opsina centrada en la frecuencia del azul, otra en la del rojo y otra en el verde. No es que “vean” azul, rojo o verde, sino que se excitan y producen *preferentemente* potenciales de acción ante la presencia de fotones con una longitud de onda centrada en el pico de su espectro de respuesta. Más tarde, aguas abajo del proceso visual, el cerebro lo interpretará a su manera proponiéndonos la variedad de percepciones cromáticas.



Especialización en un pico determinado del espectro luminoso de cada uno de los tres tipos de conos. También se ha dibujado el de los bastones (rods) (imagen del libro Neuroscience, D. Purves et al., 2012, fair use)

Cada cono está especializado en un tipo de opsina y, además, al estar conectado a una sola neurona ganglionar del nervio óptico podemos darnos cuenta de que cada potencial de acción, en un axón del mismo, estará perfectamente etiquetado por un espectro energético determinado de luz. Pero ¿no eran todos los potenciales de acción iguales? ¿Cómo interpreta luego el color el cerebro? No nos pongamos nerviosos, ya que hablaremos de ello un poco más tarde. Aunque ya podéis imaginar que la percepción cromática es un total constructo de nuestro encéfalo. Eso, hablando de los conos. Y los bastones ¿qué hacen? Según la curva anterior, ¿captan un cromatismo intermedio? La verdad es que captan lo que captan, e inducen sus potenciales de acción en condiciones inesperadas... trabajan mejor en la oscuridad.

La distribución de conos y bastones en la retina no es azarosa o aleatoria: sigue un patrón topográfico muy definido. En el centro conocido como la *mácula lútea*, que en la imagen que inicia este capítulo corresponde al lugar de la *fóvea*, hay una abundancia de conos y pocos o ningún bastón. Llamo *centro de la retina* a la zona enfrentada al orificio de la pupila por donde entran los estímulos

luminosos al ojo, por lo que la mácula es la zona de la retina donde llegan más fotones. A medida que nos vamos alejando de este centro se va invirtiendo la densidad de las poblaciones de los fotorreceptores, encontrándose cada vez más bastones que conos, para desaparecer casi ambos tipos de fotorreceptores en la zona más periférica. Esta distribución encaja bien con lo que podemos esperar como un funcionamiento eficiente de la retina. De día hay más luz que de noche y en el centro es donde llega más, por lo que allí deberemos concentrar los detectores cromáticos, los conos. Como de día hay mucho que ver dada la abundante, variable y heterogénea información luminosa del entorno, son muy sensibles en la detección de los fotones, no sólo por la abundante intensidad lumínica sino también porque ésta varía muy rápidamente, lo que les hace ser “espasmódicamente” excitables. De forma que cada cono requerirá la asistencia de una sola neurona bipolar para su interconexión con las neuronas ganglionares que conforman con sus axones el nervio óptico.

Me diréis, pues: ¡vaya *fake* con eso de la potencia en la captación de fotones de los conos! ¡No es capaz de “rellenar” los canales de información de varias neuronas! Pero es que todo es relativo y aquí podemos aplicar aquello de que el tuerto es el rey en el mundo de los ciegos, ya que sus vecinos bastones deben agruparse unos cuantos para dar de “comer” a una sola neurona bipolar. Y es lógico, son buenos trabajadores de la noche cuando la luminosidad es mínima, muy estática y homogénea, por lo que interesa poder apreciar el máximo de lo poco que haya en el campo visual sin perder información, ni siquiera la que les pueda llevar un triste fotón nocturno. Por eso los bastones están repartidos preferentemente en la periferia de la retina -mirar de reojo puede ser trascendental para sobrevivir, y ese campo no lo cubren los conos- y deben sumar toda la escasa información individual para poder estimular a las neuronas de la base de la retina. En compensación, cualquier excitación perdura en ellos mucho más que en los conos, lo cual también parece coherente con la intensidad lumínica del momento particular en que cada tipo de fotorreceptor trabaja. La poca luz de la noche necesita en el ojo, al igual que en una cámara fotográfica, una mayor apertura de diafragma –mayor número de fotorreceptores a la vez- y un mayor

tiempo de exposición -mayor permanencia en el tiempo de la señal-. En fin, eso de *bastones* es un buen nombre... parece jocoso, pero sí... los bastones son mejores para ver de noche así como otro tipo de bastones son útiles para andar de noche sin tropezar.

En resumen, tanto los conos como los bastones, según circunstancias lumínicas particulares, van a provocar en una neurona ganglionar de la retina el inicio de una cadena de potenciales de acción. Todos iguales en amplitud pero con mayor o menor frecuencia según sea la intensidad de la luz excitadora. Y cada uno, dependiendo del axón por donde vayan, con un cartel que avisa de la calidad cromática que posee. Una buena información que llega al cerebro: él sabrá lo que hacer con ella. Fin.

Pues no, no es el fin. La retina no es tan marginal como un simple camión de transporte. También es una oficina de logística en donde se realiza la organización previa de la información luminosa, de forma que le llegue “precocinada” y matizada al cerebro. Cada neurona ganglionar, a través de las bipolares, recibe datos de varios fotorreceptores. Realmente de todos los que están dentro de, más o menos, un círculo que conforma lo que llamamos el “**campo receptivo**” de la célula ganglionar. Podemos imaginar que los “precisos” conos disponen de campos más pequeños que los “precarios” bastones. Si extrapolamos el concepto de “campo receptivo” a algo más real, habrá que decir que el círculo de fotorreceptores no es más que la concreción en la retina de un haz circular de fotones que corresponde a un conjunto circular tangible de algo que hay en el exterior. Como intentamos hacer más claro en la imagen siguiente, la respuesta de la neurona ganglionar a los estímulos que le vienen desde su “campo receptivo” circular no es homogénea, ya que no generan la misma respuesta cuando los fotones luminosos han atacado el centro que cuando lo han hecho en su periferia. Parece como si las ganglionares estuvieran preparadas para *dar una respuesta mayor cuando, habiendo luz en el centro, se da un mayor contraste de luminosidad entre este centro y los alrededores* de su campo de sensibilidad. Todo ello nos hace pensar que las unidades primeras de información visual no son los conos o los

bastones individuales, sino que son pequeñas áreas circulares sobre la retina.



Análisis de la respuesta neuronal ganglionar frente a diversos casos de incidencia de la luz sobre las células fotorreceptoras de la retina (Modificado a partir de imágenes de la red, fair use)

Ya tenemos a la célula ganglionar excitada, habiéndose observado que, dependiendo del tipo de fotorreceptor que inerve, su respuesta va a ser muy diferente. Lo cual no debe sorprendernos una vez que ya sabemos a lo que se dedican conos y bastones. Las ganglionares que dan servicio a los primeros, los conos, son células pequeñas que vehiculan información muy detallada, principalmente de tipo cromática, con una sensibilidad frente al contraste no tan acusada como en los bastones y una capacidad de respuesta más lenta. Mientras que las que atienden a los nocturnos bastones son todo al revés, grandes y rápidas. Recordad lo que dijimos en el capítulo 03 cuando hablábamos del tálamo: “...unas -neuronas- pequeñas -parvocelulares- pero con una sensibilidad brutal, que al estimularse son capaces de llevar mucho detalle en la información, y otras más grandes -las magnocelulares- que se excitan mucho más rápidamente a cambio de llevar “poca carga”, la información justa”. Seguro que os suena parecido a lo que hemos dicho de las neuronas ganglionares de la retina, ¿no? Por eso las clasificamos como grandes -o células M magnocelulares-, medianas -células koniocelulares- y pequeñas -células P parvocelulares-, asociadas a su vez a diferentes propiedades fisiológicas -que ya podéis intuir- como veremos en el siguiente capítulo al ir avanzando en la descripción de los caminos sensoriales de la vista.

Así que la estresada y laboriosa retina transmite al encéfalo una gran riqueza de información muy poco integrada: datos de la posición espacial del foco emisor de luz, de su intensidad luminosa y de los matices cromáticos y de contraste lumínico. Paquetes pequeños que van muy rápidos y paquetes muy ricos en datos, pero que van más despacio. Vayamos, entonces, a ver qué pasa más allá del ojo, qué es lo que sabe hacer el cerebro con este material en bruto.

NOTAS DEL CAPÍTULO 10:

- 1.** El que quiera saber más acerca de las características ópticas de la retina, puede leer el artículo: “*What is the resolution of the human eye in megapixels?*” de Paul King, publicado en la red social digital “*Quora*”.

11: La visión II. Procesos intermedios.

En el capítulo anterior estudiamos *el cómo* del proceso visual, por el que la entrada de un fotón luminoso al ojo genera en el fondo de la retina un potencial de acción, potencial que va a discurrir por los axones que conforman el nervio óptico hacia el interior del encéfalo. Se trata de los de las neuronas que hacen el primer relevo en el conjunto de las autopistas visuales. El espectáculo, por tanto, lo habíamos dejado en marcha. Veamos ahora como continúa.

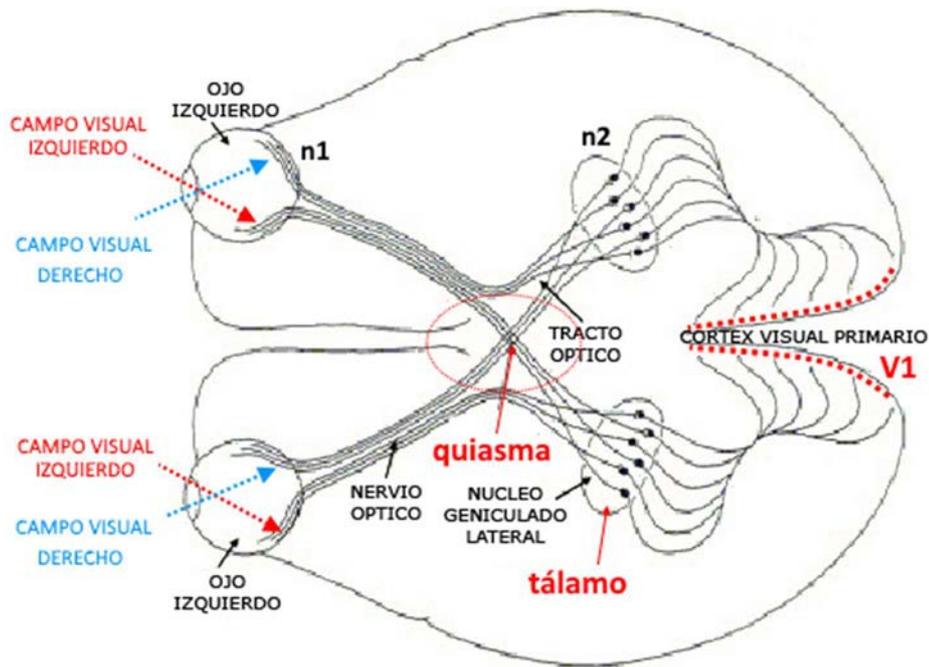
El mundo que apreciamos es tridimensional, esto es evidente. Pero a la hora de ver lo que sea que haya ahí afuera, el cerebro ha preferido dividirlo en dos espacios, el derecho y el izquierdo. Cada uno de ellos se procesa en uno de los hemisferios cerebrales, aunque con la sutileza de que aplica una contralateralidad: el hemisferio derecho “contempla” el mundo exterior izquierdo, mientras que el hemisferio izquierdo hace lo propio con el mundo externo derecho. Ambos hemisferios están conectados por un haz poderoso de “autopistas” nerviosas, por lo que esta división del mundo en *derecho e izquierdo* no es al final un problema, ya que nuestra gran masa encefálica se encarga de integrar los dos aspectos y así proponernos una realidad unitaria útil.

Sin embargo, si hablamos de la información inicial a nivel del ojo, observamos que en la **retina** de cada uno de ellos se reciben datos del total del escenario por delante de ellos. En los dos ojos las mitades derechas de sus retinas reciben los fotones que provienen de la izquierda del escenario, ya que la luz que viene de la izquierda tras cruzar las estructuras ópticas del ojo se proyecta sobre el lado derecho de su interior, y lo contrario sucede en las mitades izquierdas de las retinas, sobre las que se proyectan los fotones que provienen de la derecha del escenario. Luego, toda esta información de la derecha o la izquierda del campo visual se canaliza, aunque aún de forma separada, por el nervio óptico de cada ojo hacia las siguientes

estructuras de procesamiento visual en el sistema nervioso. Pero si esto es así, ¿cómo es que he dicho que cada hemisferio cerebral procesa contralateralmente sólo la mitad del escenario? ¿en qué momento se disciernen ambas informaciones?

Recordemos brevemente lo que aprendimos en el capítulo anterior. Las células ganglionares de la retina [n1] son las que con sus axones conforman el **nervio óptico** por el que se transmiten los potenciales de acción originados al incidir un fotón exterior sobre alguna de las opsinas de un fotorreceptor de la retina. Cada célula ganglionar lleva una información muy etiquetada, que habla de sobre qué parte del campo visual externo está orientada; de si proviene de conos o bastones; y de las características de la luz que incidió sobre sus campos receptivos en la retina. Cada célula ganglionar, pues, lleva su propio lema en su camiseta, aunque se nos ocurre que entre los campos de su ficha personal debe haber una clasificación muy clara: la de derecha e izquierda. En cada ojo, un mazo de axones del correspondiente nervio óptico transporta datos de un hemiescenario, el de la derecha, mientras que otro los llevará del contrario. Un nervio para cada ojo, pero con un doble flujo en la corriente que circula por ellos.

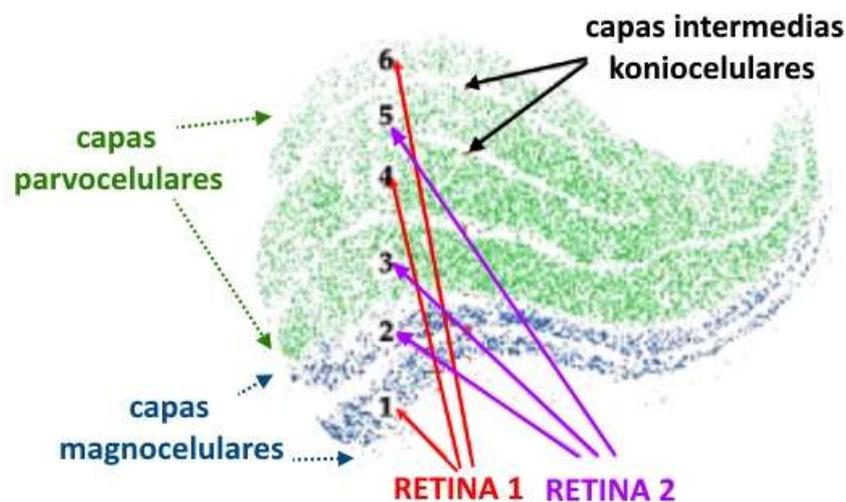
Al salir los nervios ópticos de cada uno de los ojos, convergen y se dirigen uno al encuentro del otro. Cosa que sucede en un punto que podemos imaginarlo como situado más o menos coincidente con el centro de la cabeza, aproximadamente en la línea imaginaria que une el inicio de ambas orejas y un poco por encima de la cavidad nasal. En este punto ambos nervios dividen sus dos flujos izquierda-derecha cruzando de lado a uno de ellos, de forma que se emparejan según la parte del campo visual a la que están asignados: toda la información de la derecha irá ya junta y se dirigirá en su camino hacia estructuras cerebrales contralaterales, en este caso hacia zonas del hemisferio izquierdo. Lo mismo pasará con los axones que “ven” la izquierda del mundo que, tras cruzarse uno de ellos, juntos acabarán en el hemisferio derecho. Al punto de cruce se le conoce como el *quiasma óptico* cuyo nombre, que viene de la palabra griega χίασμα, precisamente significa esto: “*cruce*”, “*disposición cruzada*”.



Corte esquemático del cerebro, visto desde abajo, en donde se aprecian los dos canales del campo visual en ambos ojos. Divergen justo en el punto conocido como quiasma óptico en donde se emparejan los del mismo hemicampo visual dirigiéndose con posterioridad al hemisferio cerebral contralateral (Imagen a partir de la red, fair use)

Si avanzamos un poco más adelante veremos que cada uno de este par de “subnervios” ópticos llegarán a un núcleo neuronal del **tálamo** de su lado, llamado *núcleo geniculado lateral*, que se encuentra en la parte lateral de su cola. Ya sabemos de otros capítulos cuál es la labor que realiza el tálamo: podemos considerarlo como el “portero” de entrada de la información sensorial al cerebro, manteniendo unas intensas conversaciones con la corteza y el sistema emocional. Han entrado en cada tálamo, por tanto, un par de “subnervios” llevando a cuentas sus etiquetas según sea de qué ojo provengan y de qué lado del escenario lleven la información. Podríamos pensar que éste es el punto donde se va a iniciar la homogeneización de la información que transportaban todos estos axones, que en el tálamo se les va a poner una única etiqueta. Pero no es así, necesitamos aún que se mantengan los matices, pues los hay de segundo orden, de los que aún no hemos hablado y que más tarde entenderemos el porqué.

El *núcleo geniculado lateral* está formado por capas de neuronas, hasta seis, repartiéndose de forma alternada: una mitad para los axones de un ojo y la segunda mitad para los del otro. De las tres de cada ojo, una recibe los datos de las células ganglionares M de la retina -recordad lo que habíamos dicho de ellas en el capítulo anterior- y otras dos a las ganglionares P. Las primeras se llaman en consonancia las capas *Magnocelulares* y las segundas *Parvocelulares*. En la retina hay además un tercer tipo de neuronas ganglionares, las K, que también tienen en el tálamo sus propias capas, las *Koniocelulares*, de las que no hablaremos, pues sus funciones no son hoy por hoy muy bien conocidas.

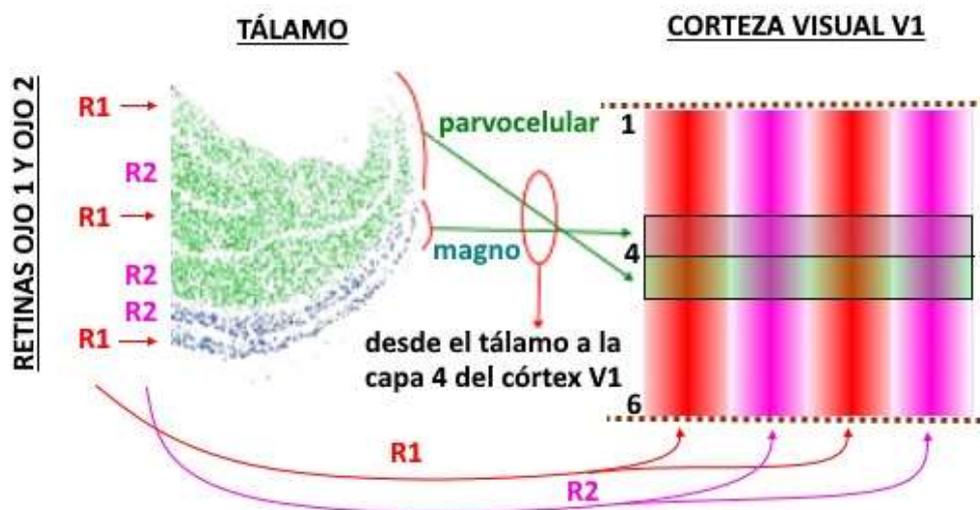


Esquema de la disposición de las capas de neuronas n2 en el núcleo geniculado lateral del tálamo

En estas capas talámicas se encuentran las segundas neuronas [n2] del relevo con las que las ganglionares hacen sinapsis. Para luego continuar los potenciales de acción por los axones de estas neuronas del tálamo y, como podéis imaginar por lo que estáis leyendo, aún llevando la etiqueta específica del ojo del que proceden. Estos axones salen formando un abanico de proyecciones (ver la última imagen de este capítulo) que se dirigen a la *corteza visual primaria -V1-* en la parte posterior del lóbulo occipital. Casi la podríamos tocar cuando nos rascamos la protuberancia trasera de nuestro cráneo.

La corteza visual primaria V1 es una estructura que, como la mayoría de las del neocórtex, está ordenada formando lo que se puede

imaginar como un bosque de columnas, unas junto a otras y todas ellas con seis capas “apiladas” de neuronas, que se extienden por toda la corteza. Cada columna está especializada en la información específica de uno sólo de los ojos, alternándose espacialmente más o menos las del derecho con las del izquierdo. A una de las capas centrales de estas columnas “mono-oculares” se dirigen los axones del abanico que emerge del tálamo, con la particularidad de que aún aquí, en esta capa, se mantiene diferenciada y sin mezclarse la información magnocelular y parvocelular de cada uno de los dos ojos. Esta disposición comienza a ser importante para los más complejos procesos de visión que se van a llevar a cabo aguas abajo. El camino Parvo está especialmente dedicado a la forma y el color de la información visual, mientras que el camino Magno no quiere saber nada de lo anterior, dedicándose a procesar patrones de movimiento de forma más general. La imagen siguiente pretende aclarar este galimatías.



Interconexiones neuronales entre las n2 del tálamo y las n3 de la corteza visual V1, en donde aún no se ha homogeneizado la información. De esta corteza se han dibujado cuatro de las múltiples “columnas” en que está estructurada.

Llegados a este punto, vamos a detenernos un poco sin avanzar más allá de este “momento” del proceso neuronal visual. Nos quedamos a la espera en la más primaria corteza visual V1, mientras damos unos pasos hacia atrás en el camino ya visto para hacer un necesario apunte acerca de otros tres procesos inducidos por las estructuras de la visión

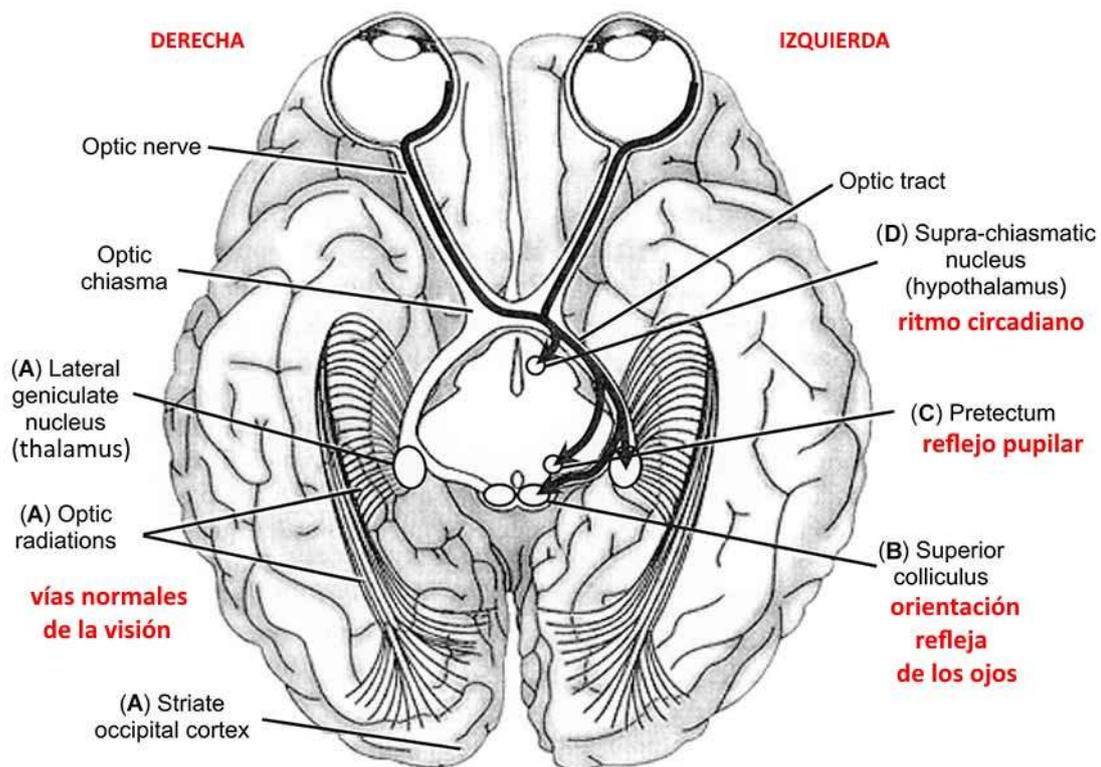
que hemos ya analizado. Realmente no tienen una implicación directa sobre el hecho último de la percepción visual, aunque seguramente dos de ellos deben incidir también al introducir ciertos matices en el tipo de información que la crea. De cualquier forma completan nuestros conocimientos de lo que hacen las vías neuronales dedicadas a este sentido.

El **primero** de ellos -(D) en la imagen siguiente- se trata del “**ritmo circadiano**”, verdadero reloj interno que dirige a muchos de nuestros procesos fisiológicos de ritmo diario y a los patrones del sueño. No vamos a hablar de ello, pero sí decir que en el ojo hay también un subsistema “fotorreceptor-ganglionar” especializado, que comienza en una célula ganglionar de la retina la cual actúa como un fotómetro de una cámara óptica. No influye directamente en la visión pero sí detecta la luz y proyecta esta información a través de su axón, el cual es parte también del nervio óptico aunque deriva hacia el *núcleo supraquiasmático* del hipotálamo, estructura neuronal que junto con su vecino, el tálamo, forman la mayor parte del mesencéfalo.^[1] Como podéis imaginar, este núcleo supraquiasmático está situado.... sobre el quiasma óptico, como no podía ser de otra manera.

Algunos neurólogos ven a esta especie de fotómetro orgánico como una reminiscencia de los sistemas sensores corporales más antiguos y menos elaborados, preocupados sólo en detectar las condiciones generales luminosas del ambiente exterior más que en “redibujar” este exterior. Su función primitiva habría sido el detectar luces y sombras que sirviesen para orientar direccionalmente a favor o en contra al organismo que lo poseyera. Un “ojo” realmente primitivo del que aún no nos hemos desprendido, utilizándolo para unas labores para las que posiblemente no había emergido en el camino evolutivo de los animales.^[2]

El **segundo proceso** -(B) en la imagen- es el que se pone en funcionamiento cuando en nuestro campo visual, en cualquier lugar, aparece una excitación luminosa suficientemente potente como para captar inconscientemente nuestra atención y producir el **acto reflejo de giro de la cabeza**, el necesario y preciso como para proyectar nuestro eje de visión exactamente hacia lo que nos ha sorprendido. Esta orden interna la dan los *colículos superiores*, dos pequeñas

masas ganglionares situadas por debajo del conjunto talámico, aún en la parte superior del tronco encefálico. Unas ramificaciones de los axones de los nervios ópticos proyectan sinapsis con las neuronas de estos colículos, las cuales, tras una nueva etapa sináptica, transmiten la información a las *cortezas motoras* que imparten la orden del movimiento adecuado.



Vista inferior del cerebro mostrando las cuatro vías de los procesos visuales mencionados en este capítulo (Imagen modificada de O.A. Coubard, CC BY 4.0)

Al igual que lo que dijimos para el subsistema circadiano, la función cubierta por este segundo proceso parece que también podría ser evolutivamente muy antigua y que, incluso, *los colículos pudieron haber sido, en animales menos complejos del árbol evolutivo, la principal "corteza" visual*. Circunstancia que aún podemos intuirlo en algunas reminiscencias funcionales que podemos observar hoy en día: en animales como peces y anfibios si se les extirpan los colículos se quedan ciegos; las ranas cazan moscas al vuelo gracias a la sensibilidad espacial que le proporciona sus colículos. En animales "superiores" como los primates –entre los que estamos nosotros- si se nos daña la corteza visual primaria V1 quedamos ciegos

“cromáticos” por así decirlo. Nuestro cerebro no consigue generar la percepción de la visión en formas, colores o movimientos. Pero misteriosamente se conserva la habilidad de detectar la posición exacta de objetos que están delante, lo que se conoce como visión ciega, que está dirigida precisamente por este antiguo procesador que se encuentra en los colículos superiores. Procesador que en otros capítulos posteriores aún nos va a sorprender con otras habilidades.

Pasemos al **tercer proceso** prometido -(C) en la imagen-, que está íntimamente ligado con las **prestaciones que necesita nuestra “máquina de fotos” que es el ojo**. Me refiero a que esta delicada máquina en algún momento necesita ajustar la cantidad de luz que entra en el ojo y necesita también ajustar su proyección exactamente sobre la retina. Y esta acomodación se consigue precisamente mediante el ajuste de la apertura de la pupila y de la curvatura del cristalino. La gestión de estos ajustes se centra en un lugar muy próximo a los colículos, en una zona que se conoce como *pretectum*, que reciben también prolongaciones específicas de los axones del nervio óptico para hacer sinapsis en neuronas situadas en ellos y así iniciar la precisa orden de ajuste ocular.

Con eso queda explicada la anatomía y procesos visuales que se llevan a cabo entre los ojos y la corteza visual primaria V1. Profundizar en lo qué pasa más allá será objeto del siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 11:

1. Podéis refrescar esto último releendo el segundo capítulo de este libro, en donde hablábamos de anatomía.
2. Es curioso como poseemos un gadget biológico para la fotometría que es sensible a la cantidad de luz pero no a las frecuencias luminosas. Como podemos leer en la Wikipedia, “*El núcleo supraquiasmático...es un centro primario de regulación de los ritmos circadianos mediante la estimulación de la secreción de melatonina por la glándula pineal*”. Esta glándula es una pequeña glándula situada junto al tálamo en el cerebro de los vertebrados. En la entrada número XXI [enlace (a)] al final de

la nota] de la serie del blog “El Cedazo” dedicada a “Lo que se preguntan sus alumnos de 3º de la ESO”, ya se hablaba de estos ritmos circadianos. Pero es más curioso, aunque si lo observas en “modo evolutivo” no tanto, el analizar a las proteínas que activan a nuestra célula fotorreceptora. Se tratan de algunas de la familia de las opsinas y en particular de las rodopsinas, de las que [como ya se decía en la entrada 27 [enlace (b) al final de la nota]de la serie de El Cedazo "La Biografía de la Vida"] “... se sabe que las hay de dos tipos, a las que para diferenciar llamaremos de tipos A y B. Las dos se encuentran tanto en los vertebrados como en los invertebrados. Curiosamente, los vertebrados utilizan las del tipo A para ver mientras que los invertebrados lo hacen con las del tipo B. Pero los vertebrados utilizan las del tipo B como base para fijar las pautas temporales biológicas, el reloj circadiano, mientras que los invertebrados utilizan para ello la otra rodopsina. Hay que reconocer que no es sorprendente que una misma proteína desarrolle ambas funciones en principio tan distintas, ya que para ello las dos tienen que tener una habilidad común, y es que deben ser sensibles a la luz. Parece como que ambas rodopsinas existían ya en un antiguo ancestro común con células fotorreceptoras, y que con el paso del tiempo adoptaron distintas especializaciones”.

- (a) [<http://eltamiz.com/elcedazo/2016/09/04/lo-que-se-preguntan-sus-alumnos-de-3o-de-la-eso-xxi-como-es-posible-que-cuando-vamos-a-acostarnos-y-pensamos-mucho-en-una-hora-determinada-despues-me-despierte-a-esa-misma-hora-sin-necesidad/>]
- (b) [<http://eltamiz.com/elcedazo/2014/03/29/la-biografia-de-la-vida-27-evolucion-del-ojo/>]

12: La visión III. Procesos superiores.

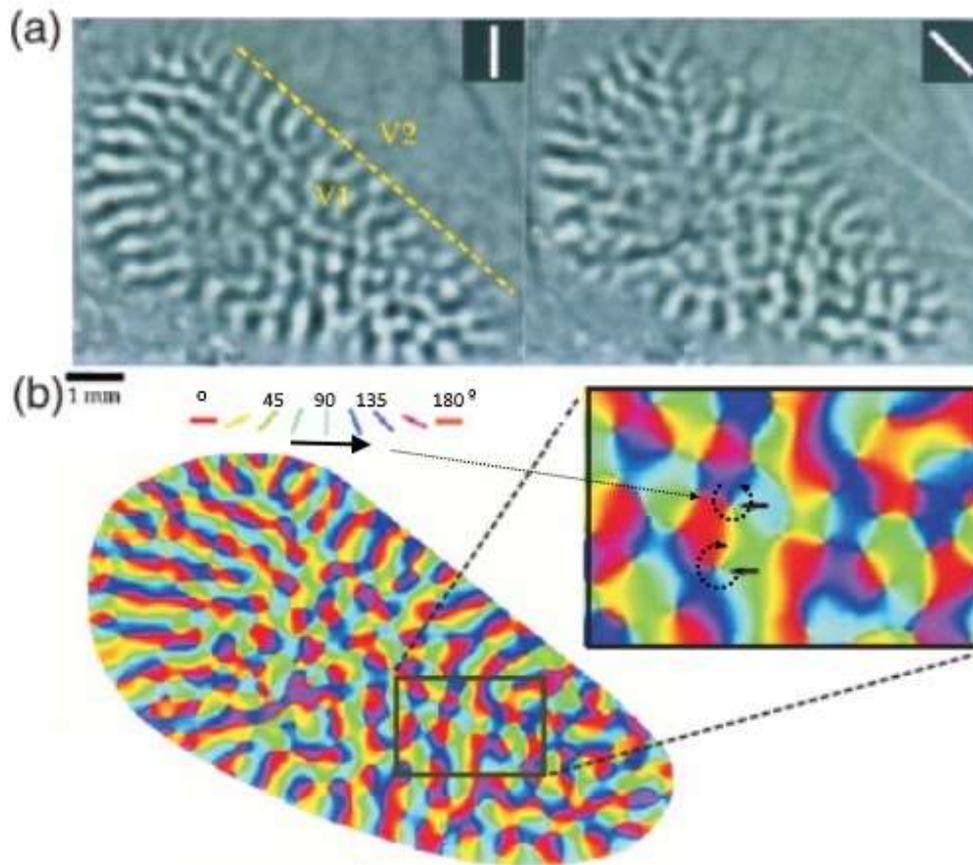
Nos habíamos quedado en el capítulo anterior en el momento en que la señal visual, que se había iniciado en una célula fotorreceptora de la retina, había conseguido llegar en forma de potencial de acción, a través de una cadena formada por dos neuronas consecutivas, una [n1] en la misma retina y la segunda [n2] en el tálamo, hasta la corteza visual primaria V1, situada en la parte trasera del lóbulo occipital del neocórtex.

Es curioso el constatar que las proyecciones de estos axones que salen del tálamo y llegan a la corteza visual V1 lo hacen físicamente de tal forma que dibujan sobre esta corteza un mapa invertido –arriba/abajo, derecha/izquierda- de la realidad exterior que impresionó la retina. No en vano el ojo, y lo que hay inmediatamente detrás, trabaja como una “cámara fotográfica”. El resultado es algo similar al homúnculo representado sobre la corteza somatosensorial -del que ya hablamos en otro capítulo, el número 03- o sobre la corteza motora, aunque en este caso no es espacialmente figurativo, sino de asignación espacial de propiedades de la señal. Pero sigamos adelante.

Habíamos determinado que llegaba una información muy definida de acuerdo a determinadas etiquetas: lado del escenario visto, ojo de procedencia, color e intensidad luminosa, detalle de la vía *Parvo* frente a generalidad de la vía *Magno* y todo ello de acuerdo a un mapa retiniano de puntos o pequeños círculos, que llamamos campos receptivos, manifiestamente sensibles a los contrastes luminosos más que a la intensidad puntual en sí.

Toda esta información llega a las columnas que conforman la corteza visual primaria V1, en donde se lleva a cabo un procesamiento de un nivel superior. Numerosos experimentos demuestran que el matiz de pequeñas áreas circulares de sensibilidad que comenzamos a ver en la retina se enriquece en la corteza. Todo sugiere que en el circuito visual cortical hay una organización por columnas, donde *todas las neuronas de la misma columna tienden a responder uniformemente*

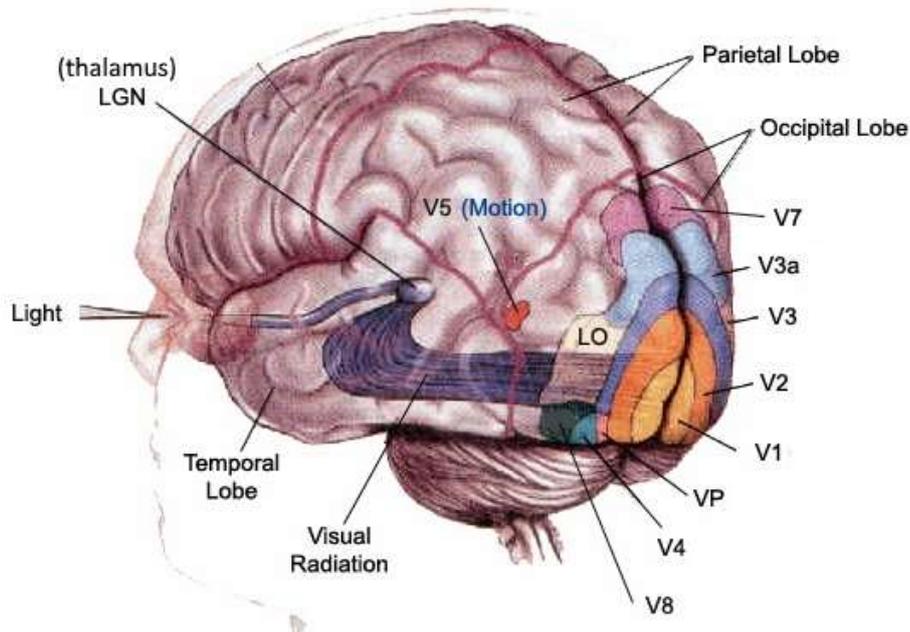
al mismo estímulo, y que el conjunto de las columnas parece también estar organizado de una forma parecida, de manera que *zonas vecinas de la corteza visual tienen tendencia a responder a características similares del estímulo visual*, conformándose así una especie de archipiélago neuronal de intereses funcionales.



Imágenes reales de la distribución neuronal en la corteza visual V1 por preferencias en la respuesta a la orientación. Arriba, resultado de un par de experiencias en las que las partes más oscuras corresponden a las neuronas que se activan ante un estímulo “barra” con la orientación indicada. Abajo composición cromática obtenida a partir de las experiencias anteriores. Cada color representa una orientación según el código inclinación/color situado en el centro de la figura. En la ampliación de la derecha las flechas apuntan al centro de lo que hemos visualizado en el texto como una “margarita”. En una la variación en la percepción de la orientación sigue un giro en un sentido, mientras que en la otra lo hace en sentido contrario (Imagen, fair use)

Aún más: el patrón de tal como están dispuestas físicamente en la corteza visual estas zonas coordinadas hace que el matiz particular que gestiona cada una se vaya modificando gradualmente si nos movemos de una zona a la vecina. De forma que, al final, la corteza visual presenta un patrón semejante a una conjunción de columnas dispuestas más o menos de forma circular como las hojas de una margarita, en la que se van repartiendo por sectores grupos de neuronas que responden al mismo estímulo, respuesta que va variando suavemente a medida que vamos dando la vuelta alrededor del conjunto. Y lo más curioso es que los estímulos de los que estamos hablando no reproducen como podríamos imaginar aquellos contrastes *puntuales* que vienen de la retina, sino que reproducen *estímulos lineales*, cada uno con sus preferencias de *orientación* -se entiende ahora la disposición circular, que permite jugar por sectores especializados con los 360°- y de *dirección y sentido de movimiento* de la “barra” estímulo –dentro de cada sector especializado en una orientación hay neuronas que prefieren procesar el movimiento del estímulo en un sentido y vecinas de ellas que prefieren el sentido contrario-.

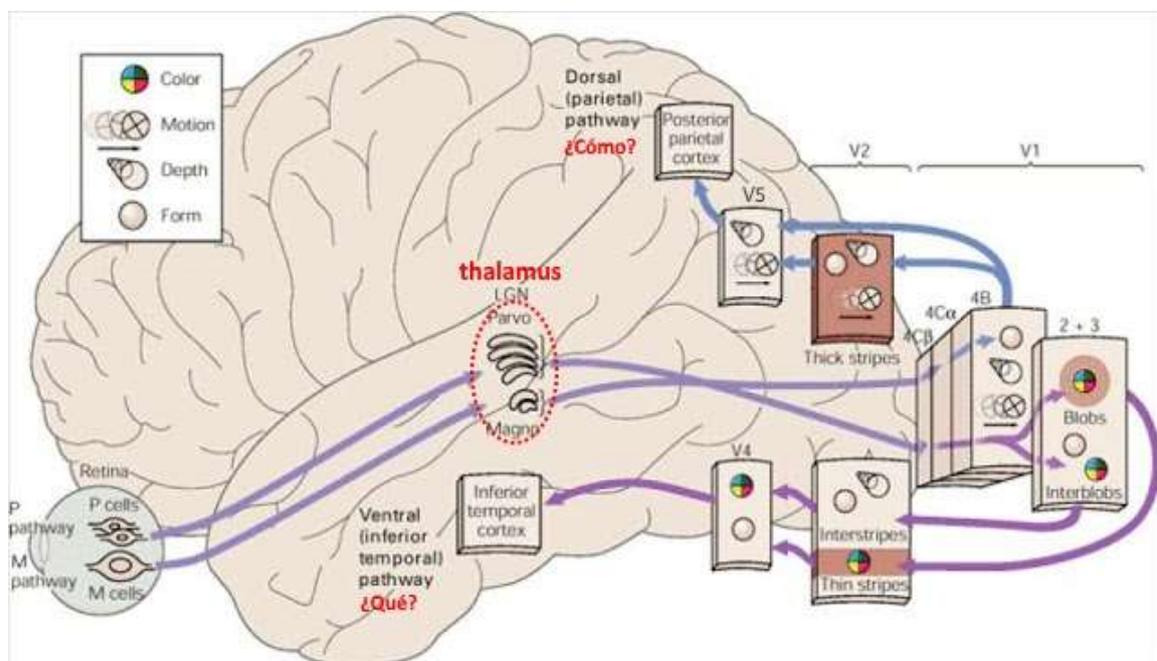
Esta información más rica que se está procesando en la corteza visual primaria V1 va a seguir su camino hacia circuitos más complejos y más profundos en el corazón de las funciones cerebrales. Efectivamente, a través del tejido cortical la corteza primaria V1 se proyecta a las cortezas visuales de asociación vecinas, que podemos imaginar como dispuestas prácticamente en anillos concéntricos alrededor de V1. Se están realizando estudios intentando definir exactamente cuántas de estas áreas hay, pero aún no están las cosas claras, aunque sin lugar a dudas encontramos a medida que nos movemos por ellas una representación cada vez más integrada acerca de particulares aspectos del mundo visual. Cada una de estas nuevas cortezas visuales parece que están encargadas de un aspecto concreto de la percepción visual: las formas y figuras, tal como se mueven o varían, el color, la velocidad, la dirección del movimiento... aspectos que tenemos marcados de forma gráfica en la última imagen de este capítulo.



Distribución jerárquica de las cortezas visuales. V1 es la corteza que primero recibe las señales “brutas” que provienen de la retina (Imagen de la red, fair use)

El primer paso tras el amasado en “barras” se realiza en la corteza V1, y la información así preparada pasa a la corteza V2, la cual está organizada por áreas especializadas, cada una de ellas en una característica concreta del campo visual, como lo son el color, la forma, el movimiento, la orientación... Es decir, se pasa del manejo integrado y unitario de los diversos aspectos que incorpora la información del campo visual -lugar, lateralidad, contraste lumínico...- que se realizaba en las “columnas” de la corteza V1, a otro manejo en el que se disgregan e integran los datos anteriores de otra manera, según matices, para convertirlos en cualidades específicas de la visión que se gestionan como realidades independientes. A partir de este mundo tan variado de aspectos parciales de la percepción de la visión, parecen conformarse dos grandes vías a medida que se van integrando procesos en las cortezas asociativas. La primera, que se dirige hacia el lóbulo parietal, se conoce como la **vía del “cómo”**, y la segunda, que se dirige al lóbulo temporal, conocida como la **vía del “qué”**. El “cómo” responde a dónde se encuentran los objetos y cuáles son las características de sus movimientos. Originada en la corteza visual V5, hace un mapa del mundo exterior mediante el que puede realizar un análisis de los

patrones de movimiento vistos: en qué posición está el coche, a qué velocidad se acerca, el posible punto de colisión conmigo.... El “qué”, originado en la corteza especializada V4, se refiere a ¿qué es lo que estoy viendo? Tamaño, color y forma. A la identidad de una fruta, su color es amarillo, tiene una textura lisa y brillante, es alargado y no muy grande, se trata de un plátano... quizás conceptos relacionados casi con la semántica -función cerebral que parece se procesa también en el lóbulo temporal-. En los humanos esta vía nos ayuda también a reconocer las caras y la identidad de las personas a las que estamos viendo. Podemos apreciar mejor lo dicho acerca de los caminos de ambas vías -procesos especializados- en la imagen siguiente.



Esquema general de las vías de la percepción de la vista, desde la retina hasta las cortezas más profundas, con indicación de la característica visual que se gestiona en cada zona. Se han representado las dos vías parvo y magno equivalentes a las del “qué” y el “cómo”. En las cortezas V1 y V2 se ha dado el detalle gestionado en sus capas neuronales. Los “blobs” son lo que hemos figurado en el texto como “margaritas” (Imagen de la red, fair use)

Como conclusión general podríamos decir que las áreas de la corteza visual gestionan un aspecto específico de la imagen captada en la retina, contribuyendo de forma directa, aunque incompleta, al hecho

último de la percepción visual. Es evidente que entre todos estos módulos debe haber una red potente de conexiones que permita integrar los distintos aspectos gestionados, que no sólo se llevan a cabo en lugares físicos distintos, sino que también a lo largo de periodos temporales distintos. Por ejemplo, percibimos el color 40 mseg antes que la forma, y ésta 80 mseg antes de que percibamos el movimiento. Y parece que el cerebro lo hace en base a datos muy elementales, como pueden ser las barras luminosas con una determinada orientación, que luego integra sin que sepamos muy bien como lo hace. Incluso este software integrador puede ser distinto en cada una de las cortezas visuales. Aunque sí estamos seguros de que en ello no sólo interviene la máquina que hemos heredado durante nuestro desarrollo ontológico, producto de nuestra carga genética, sino también que su respuesta está también muy influida por la experiencia real, por factores epigenéticos. Es significativo que si privamos de la visión a algunos mamíferos -y nosotros lo somos- durante las primeras semanas de vida, este animal adquirirá con seguridad algún tipo de ceguera funcional. La verdad es que desconocemos cuál pueda ser el módulo integrador unitario del cerebro dedicado a la vista, si es que existe uno solo.

Las opiniones^[1] del prestigioso neurobiólogo turco Semir Zeki ayudan a dar un poco de luz a este nudo gordiano. Él fue el que descubrió la funcionalidad de algunas de las cortezas visuales secundarias como la V4. De entrada, el cerebro, aunque es un órgano muy potente, es también limitado. Y por tanto deberá aliviar su capacidad de memoria y computación trabajando selectivamente en base a ciertas características constantes y generales que existen en el mundo externo. Y esto quizás lo hace en base a su capacidad de generar abstracciones -seleccionar de lo general lo más simple, propiedades y relaciones que se repiten-, para luego, basado en estas abstracciones sencillas y universales, inducir lo que Zeki llama *ideales*, que no dejan de ser más que esquemas generales de gestión de información, como pueden ser “*esto es un perro*” o “*esto es bello*“. En sus propias palabras: “*Yo defino el ideal... de un objeto como el registro que el cerebro hace de todos los objetos que ha visualizado [color, forma, tamaño, temporalidad...], siendo éste dependiente de una multiplicidad de percepciones concretas, y a partir del cual el*

cerebro es capaz de sintetizar un ideal". Y sigue: "...la abstracción y el idealismo implican -mediante un proceso neural que nos es desconocido- la selección de rasgos o características (aquellas más importantes para el sujeto), el rechazo de otros y la síntesis de los que son seleccionados en una nueva entidad ligada a las experiencias individuales al tiempo que indiferente a cualquier experiencia concreta". El cerebro llegaría a producirnos la percepción visual -y podemos generalizar a cualquier percepción- en base a encontrar en lo que ve las abstracciones e ideales implícitos -cosa que se haría en las diversas cortezas V-, para luego, en proceso asociativo, compararlas con sus patrones de abstracciones e ideales internos, conseguidos a través de la experiencia, y así determinar lo que debe proponernos como mejor opción de percepción de lo que vemos.

Con eso damos por terminado nuestro propósito, que no era otro que describir cuales eran los caminos de entrada de la información visual exterior y seguirlos hasta las zonas de procesamiento complejo cerebral. Hemos visto cómo la información que al final nos produce la percepción de "ver", entra a través de una cadena de potenciales de acción todos muy semejantes y, lo que es más importante, a través de dos vías paralelas, cada una de ellas conductora de matices particulares y esenciales, que desembocan también en zonas corticales, en consonancia, muy específicas. Son los grupos de neuronas que las forman, trabajando en conjunto, los que hacen posible los variados y ricos matices que creemos apreciar en nuestras percepciones visuales. Es, pues, el cerebro el que inventa lo que creemos y sentimos ver. ¿Homotético de lo que hay afuera? ¡Quién lo sabe! Realmente debe representar a lo que hay fuera, pero ¿qué es lo que hay fuera sino unas interacciones de los campos electromagnéticos que al excitarse transmutan su energía en lo que creemos partículas, que llamamos fotones? Ya en el siglo XVIII el filósofo napolitano Giambattista Vico escribía: "*Si los sentidos son capacidades activas, de ahí se deduce que nosotros creamos los colores al ver, los gustos al gustar y los tonos al oír, así como el frío y el calor al tocar*".

En el capítulo que sigue nos adentraremos en los caminos neuronales sensitivos de otro viejo sentido: el oído.

NOTAS DEL CAPÍTULO 12:

- 1.** En el enlace adjunto podéis leer el texto del prestigioso neurobiólogo turco Semir Zeki.

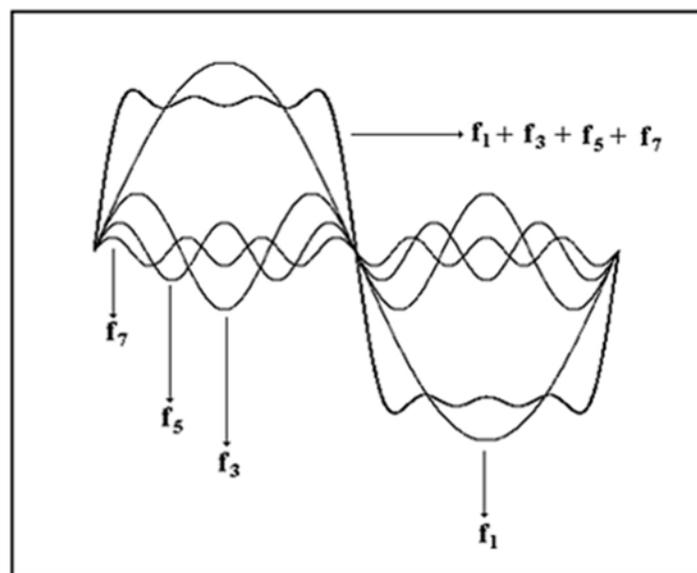
[http://www.vislab.ucl.ac.uk/pdf/splendours_and_miseries_of_the_brain-es.pdf]

13: La audición I. Detección.

En este capítulo, una vez acabado en el que le precede el recorrido por el sentido de la visión, vamos a iniciar nuestro paseo por las rutas neuronales relacionadas con el sentido del oído. Una vez más, antes de empezar, la pregunta que me surge es: ¿qué hay ahí afuera?, ¿cuáles son las causas que me generan la experiencia subjetiva del sonido? Es una antigua pregunta que excitaba la imaginación lógica de los filósofos, que en el siglo XVIII discutían cosas tan abstractas como que si cuando caía un árbol en el bosque, y no había nadie para escucharlo, haría algún ruido o no. “*Sólo conocemos lo que percibimos*” decía el irlandés George Berkeley. Lo que un siglo antes ya era la opinión de filósofo francés René Descartes cuando en su libro “*Principios de filosofía*”, generalizando, opinaba que las cualidades secundarias de las cosas -colores, sonidos, gustos, olores y sensaciones táctiles- no existían fuera de nosotros sino en nosotros como sujetos “sintientes”. Nosotros nos vamos a hacer las mismas preguntas para al final descubrir, ahora para otra experiencia sensorial, que el ruido no existe: sólo existen ondas de presión que se transmiten por la materia.

Cualquier alteración de este tipo en el medio que nos rodea, ya sea éste el aire al andar, el agua al nadar, la pared al pegar la oreja... tiene en él un reflejo semejante a cuando lanzamos una piedra a la superficie de un líquido: se altera formando ondas, que no son más que la expresión material de las variaciones de presión que experimentan sus moléculas. La piedra iniciadora de la excitación, al entrar en el agua ejerce una fuerza -un empujón electromagnético entre los electrones de moléculas contiguas- sobre la primera capa del líquido, que se deforma disipando esta fuerza y que a su vez la transmite a la siguiente capa, que a su vez la transmite a la siguiente.... generando una cadena de ondas de presión. En el aire también se pueden generar estas ondas a partir de cualquier excitación iniciadora: un movimiento rápido de un cuerpo o un chorro de aire que penetre en el medio.

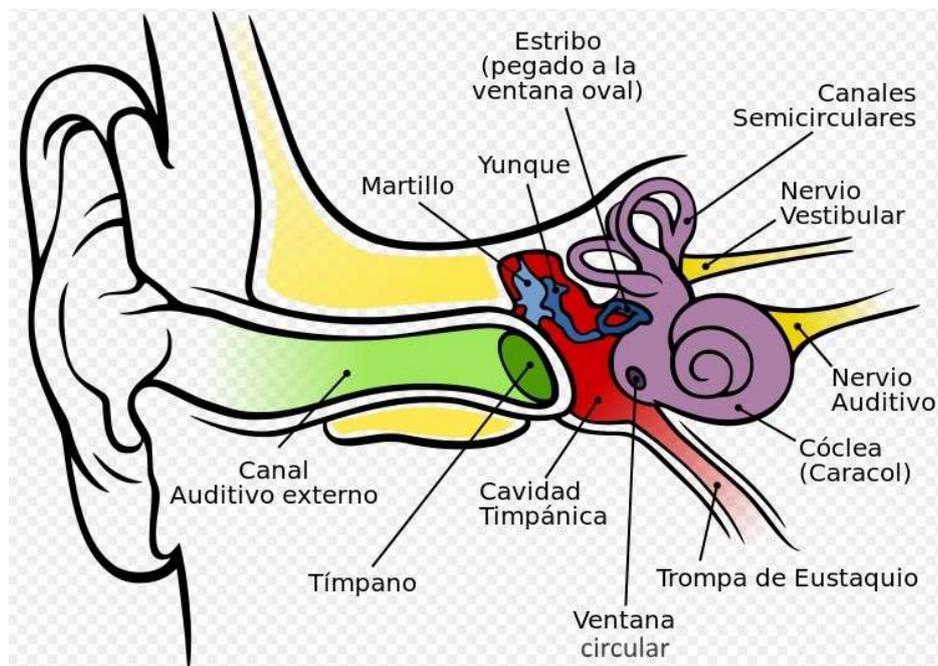
Cada una de estas cadenas de ondas de presión, que como vemos en la imagen anterior no son más que movimientos de las partículas que componen el medio transmisor, tienen unas características mecánicas y energéticas específicas, dependiendo del tipo de perturbación y el medio cuyas partículas se mueven oscilando. Vamos a suponer que la onda de presión se transmite por el aire según un patrón cíclico, patrón que hemos conseguido descomponer matemáticamente sobre un papel en una suma de sinusoides, cada una con una amplitud y longitud de onda distinta. No es complejo... se trata de desarrollar la forma de la onda según lo que llamamos su serie de Fourier. Cada longitud de onda del grupo resultante de la descomposición, al llegar a nuestro oído, equivale a una frecuencia auditiva. Así que, inmersas en el tren de ondas de presión, se encuentra un abanico de sonidos de variadas frecuencias. El tipo de sonido y su color dependerá de todas estas variables.



*Descomposición de una onda periódica en sus cuatro componentes armónicos primeros: f_1 , f_2 , f_3 y f_4 . La frecuencia fundamental sería f_1
(Imagen de la red, fair use)*

Vamos a ver qué ocurre físicamente. Podemos imaginar cómo en el aire, con este movimiento, sus componentes -átomos variados, polvo o lo que sea- se van empujando unos a otros según una dirección de propagación, hasta que topan con un medio más cohesionado -con fuerzas de unión intermolecular más fuertes- con capacidad para absorber la energía del tren de ondas. Este medio puede tratarse de

las estructuras externas de nuestro sentido del oído. Ahí y en ese momento empieza a generarse, por ejemplo, nuestra percepción desagradable al chirriar una tiza en la pizarra, o nuestra percepción armoniosa de una sinfonía musical o nuestra percepción impactante de una explosión inesperada.



Anatomía del oído (Wikimedia, CC BY 2.5)

En el caso de la audición, las estructuras receptoras primeras se encuentran en el **oído externo** y su función es recoger y amplificar el sonido. El *pabellón de la oreja* (ver imagen de arriba) tiene una configuración especial, de forma que recoge muy bien aquellas frecuencias sonoras que son habituales en nuestros ambientes y en nuestras comunicaciones. La onda de presión captada por los pabellones auditivos pasa por el *conducto auditivo*, en donde se filtran determinadas frecuencias, e impacta en una membrana que lo cierra por la parte trasera: el *tímpano*. Éste resuena como el parche de un tambor, vibración que es transportada y amplificada por una cadena articulada de *huesecillos* -el martillo, el yunque, el estribo y el lenticular- al estar el primero de ellos en contacto directo con la membrana del tímpano. El último de ellos lo está con otra especie de membrana, la *ventana oval*, que se encargará de transmitir las vibraciones de presión a los líquidos del oído interno. La actuación de los huesecillos es fundamental, ya que son los responsables de que

la señal en el tímpano sea amplificada por un factor de 200 cuando llega a la ventana oval.

Al otro lado de esta ventana se encuentra el **oído interno**, que no es más que un complejo conjunto de conductos membranosos incrustados en el hueso temporal del cráneo. Básicamente podemos encontrar un *vestíbulo* general y dos conjuntos funcionales: el caracol de la *cóclea*, auténtico diapasón del oído, y el *laberinto*, formado por tres anillos perpendiculares entre ellos y cuya función está más orientada al sentido del equilibrio, del que ya hemos hablado en el capítulo 07. Por eso en ésta, dedicada al sentido auditivo, los vamos a dejar de lado para centrarnos en la cóclea.

Acabamos de bautizar a esta última estructura, la cóclea, como un caracol, ya que realmente su forma es muy parecida a la de una concha de este molusco: un tubo cónico interno retorcido en espiral. La diferencia es que en la cóclea hay un segundo conducto central que hace de tabique y separa al tubo interno en dos, de forma que este último va y viene por el caracol, primero desde la base al vértice para después continuar, tras el giro en el vértice, de nuevo hacia su base.

Seguramente entenderemos mejor esta disposición en espiral tridimensional si la abrimos un poco como se ve en la imagen siguiente. Se aprecia bien el tubo que va y viene, comenzando en la *ventana oval* y acabando en la *ventana circular*, y separado por otro intermedio ¿qué pasa cuando el huesecillo estribo transmite la vibración de una onda de presión sonora que ha recogido la oreja? El estribo hace de pistón que va y viene sobre la *ventana oval*, la cual vibra en consonancia como el parche de un tambor, transmitiendo esta vibración al interior de la mitad superior del tubo del caracol. Como las dos mitades están comunicadas y rellenas del mismo líquido, esta vibración se transmite a lo largo del brazo de ida y del de vuelta, para al final llegar a la membrana de la *ventana circular*, que actúa como amortiguador de todo este fenómeno.

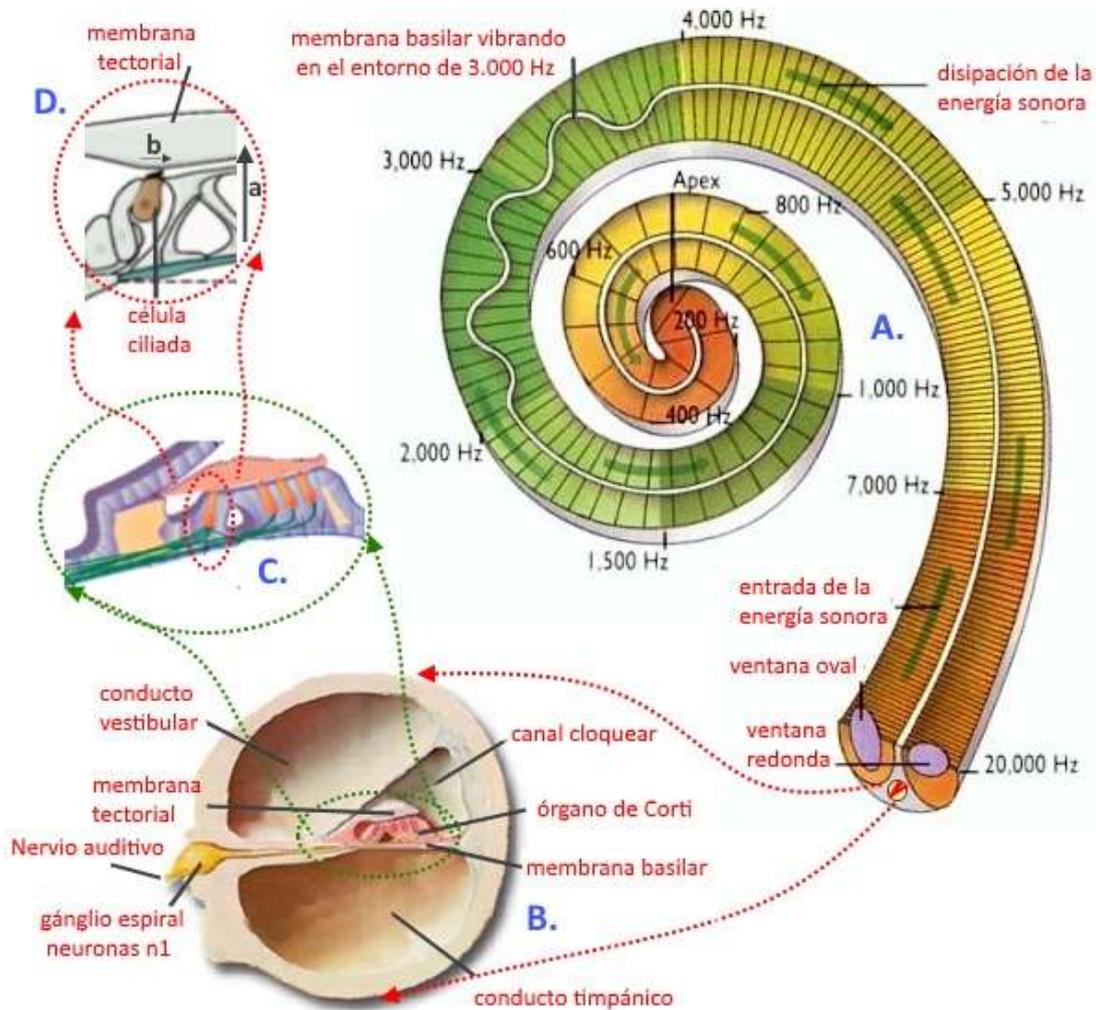
Podéis imaginar que las vibraciones de presión en el fluido interno se transmiten también a lo largo de sus paredes. En especial nos interesa fijarnos en las inducidas en el tubo separador intermedio, el *canal cóclea*r... ¿por qué? Porque allí se encuentran los sensores auditivos,

una cadena de *células ciliadas* con pelillos en su cabeza, como indica su nombre, que se apoyan en la base del tubo intermedio o *membrana basilar*, y tiene sus pelos unidos al techo de la misma membrana *tectorial*. Estas células son semejantes a las que veíamos en el sistema vestibular, capítulo 07. Al vibrar la membrana basilar en un punto determinado de su longitud como consecuencia de la excitación que le produce la onda de presión en una frecuencia específica, mueve todo el conjunto de células ciliadas contra el techo, por lo que se desplazan los pelos de las células audioreceptoras iniciándose el proceso fisiológico que va a producir el primer potencial de acción auditivo en unas neuronas n1 situadas en los *ganglios espirales* que acompañan el lateral de este tubo a lo largo de toda la espiral.

Parece todo muy sencillo... pero el sistema es más sorprendente. Por un lado, la membrana donde reposan las células audioreceptoras va variando su espesor desde la base del caracol, en donde es más gruesa, al vértice del caracol, donde es más fina. La consecuencia es que las zonas de estructura más gruesa vibran preferentemente ante el estímulo de frecuencias altas, mientras que las zonas más finas y flexibles lo hacen ante frecuencias bajas. Así, con esta arquitectura, la cóclea actúa como un xilófono, un diapasón longitudinal discriminador de frecuencias, de forma que la onda de presión unitaria de entrada se ha descompuesto por arte de magia estructural en sus elementos fundamentales, que son esenciales para que el cerebro pueda producir la riqueza de percepciones sonoras que somos capaces de disfrutar. En este sentido, al cerebro le llega la información muy discriminada, cosa que no sucedía con la vista, como vimos en el capítulo anterior.

Y aún hace más. El cerebro mantiene una realimentación motora con otro tipo de células ciliadas vecinas a las que generan el potencial de acción inicial. Son las tres que podemos ver en la parte C de la imagen de la página siguiente, a la derecha de la única célula ciliada. Actúan como amortiguadores entre el techo y la base del tubo coclear central, de forma que, según le interese al cerebro, manda la orden precisa para que realmente la vibración primaria detectada esté perfectamente sintonizada con la frecuencia local que le corresponde.

Una maravilla de la electrónica del siglo... muy atrás en la historia evolutiva.



A. Esquema de la cóclea humana con la distribución longitudinal de sensibilidad a las frecuencias sonoras. B. Detalle del conjunto del órgano de Corti en donde se producen los primeros potenciales de acción. C. Ampliación del órgano de Corti en donde se aprecian las células ciliadas soportadas en la membrana basilar, con las cabezas apoyadas en la membrana tectorial. D. Detalle de las células ciliadas en una posición en la que debido a la vibración se ha elevado (a) la membrana basilar con la consecuencia de traslación hacia la derecha (b) de los cilios. (Imagen modificada a partir de varias de la red, fair use)

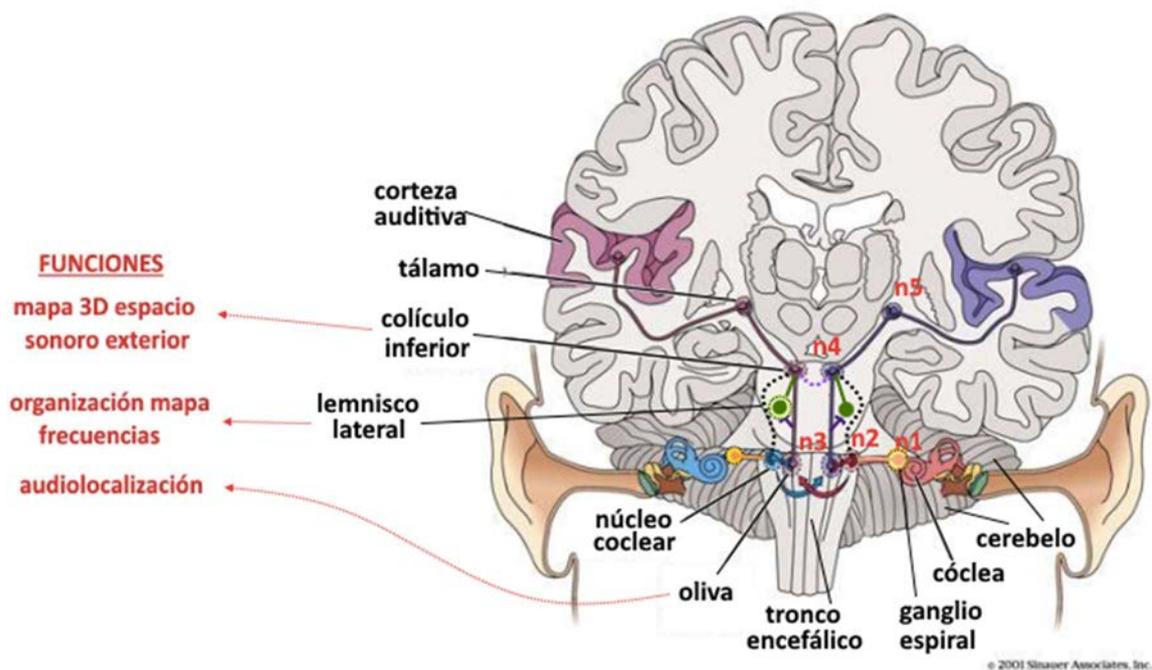
Tenemos ya a los potenciales de acción en marcha por los axones de las neuronas del gánglio espiral del caracol, que forman el *nervio auditivo*, camino del encéfalo. Todos son prácticamente iguales, *cada*

uno transmitiendo en consonancia a una estrecha banda de frecuencias del estímulo sonoro exterior, alrededor de la frecuencia favorita determinada por su posición de influencia en la cóclea. En los humanos el rango de frecuencias que detectamos se mueve entre 20 Hz y 20 KHz. Como podemos deducir de lo anterior, el cerebro percibe a las frecuencias sonoras no por datos característicos de esta cualidad del sonido -por ejemplo, no sabe nada de vibraciones por unidad de tiempo-, sino por el tipo de axón que transmite el dato -él sí sabe de tipos de axones-. Sorprendente.

En el siguiente capítulo vamos a seguir el camino neuronal que llevará a estos potenciales de acción hasta las zonas corticales auditivas de procesamiento complejo, las cuales participarán con otras zonas encefálicas corticales y emocionales con el resultado de la generación de nuestra percepción subjetiva de los sonidos.

14: La audición II. Procesos superiores.

En el capítulo anterior habíamos dejado a los potenciales de acción circulando por los axones del nervio auditivo, cada uno con su etiqueta específica que dice “*por aquí llevo la información de una frecuencia sonora determinada, pero no sé ni cómo ni cuál es*”. Este nervio, que conjuntamente con el vestibular que vimos en el capítulo 07, se le conoce como **nervio craneal número VIII**, tiene un corto recorrido ya que sale de la cóclea y termina en el tronco encefálico, a la altura de la unión entre el bulbo raquídeo y el cerebelo, más o menos junto a la misma cóclea.



Esquema de las vías neuronales auditivas. Los puntos de colores corresponden a las neuronas que intervienen. Podemos observar cómo entre los núcleos cocleares y las olivas hay una comunicación directa y otra cruzada contralateral que permitirá la audiocalización. Lo mismo sucede en los colículos e incluso entre los tálamos (Imagen modificada de la red, ©Sinauer Associates, Inc, fair use)

Allí, en el *tronco*, les esperan la segunda línea de neuronas [n2] situadas en un *núcleo* llamado *coclear* de las que podríamos esperar, a la vista de lo que ya sabemos que sucede en otros sentidos, que enviaran sus axones directamente hasta el tálamo en donde se situaría una nueva posta de la ruta auditiva. Sin embargo, aún siendo así en parte, en este caso es un poco más complejo. Las segundas neuronas formarán una serie de subnervios que ascienden por el tronco encefálico -unos mantendrán su lado y otros se cruzarán al contrario- que darán no sólo servicio al tálamo, sino también a pares -izquierdo y derecho- de núcleos neuronales situados en el propio tronco encefálico, por debajo del tálamo.

El primer par de núcleos que nos encontramos en el sentido natural de avance de los potenciales de acción es conocido como las *olivas*, ya que bien pudieran, al ver su forma exterior, darnos a entender la imagen de este fruto. Se encuentra prácticamente a la altura de las neuronas de segunda línea, de las que reciben información proveniente de ambas cócleas. Las olivas se encargan de ***dos procesos*** relacionados con la audición, con una finalidad muy similar que tiene que ver con aspectos de ***audiolocalización***, una especie de GPS sonoro. El *(a) primero* está basado en la distribución física de ciertas neuronas especializadas en frecuencias sonoras, distribución que puede ser asimilada a una regla medidora de distancias. Para una frecuencia X se excitarán las correspondientes neuronas especializadas en X en cada oliva, derecha e izquierda. Vemos en la figura anterior como el axón rojo de la n2 que transporta la señal va directamente a una oliva y también, tras cruzarse de lado, a la otra. Esto implica que la detección de la señal por las neuronas especializadas en la frecuencia X de una oliva con relación a la de la otra, por ser los circuitos neuronales de distinta longitud, lleve un pequeño desfase temporal entre los dos lados. Dependiendo del lado del escenario exterior y lo alejado del lugar de donde provenga el sonido, se excitarán unas a derecha u otras a izquierda a distinto tiempo, pudiendo así determinar el cerebro la distancia y posición a la que se encuentra el foco del sonido. Este sistema de audiolocalización tiene un *(b) apoyo secundario*, basado en la diferencia temporal sonora percibida por un segundo grupo de neuronas de las olivas, simplemente porque el sonido que se ha

emitido desde un punto físico del exterior llega a una oreja antes que a la otra. Como podemos imaginar, este segundo proceso también sirve para obtener información de la localización del foco emisor.

Como podemos ver en la figura anterior, a partir de los núcleos cocleares y los núcleos de las olivas en el tronco, ascienden unos mazos de axones que se dirigen tronco arriba. Lo primero que encuentran algunos de estos axones ascendentes es un nuevo par de núcleos, situados también en el tronco, más o menos a la altura del cerebelo, con cuyas neuronas hacen sinapsis, y de los que aún no conocemos muy bien su cometido. Se trata de los *lemniscos laterales* y se cree que participan en la **organización del mapa de frecuencias de los sonidos**.

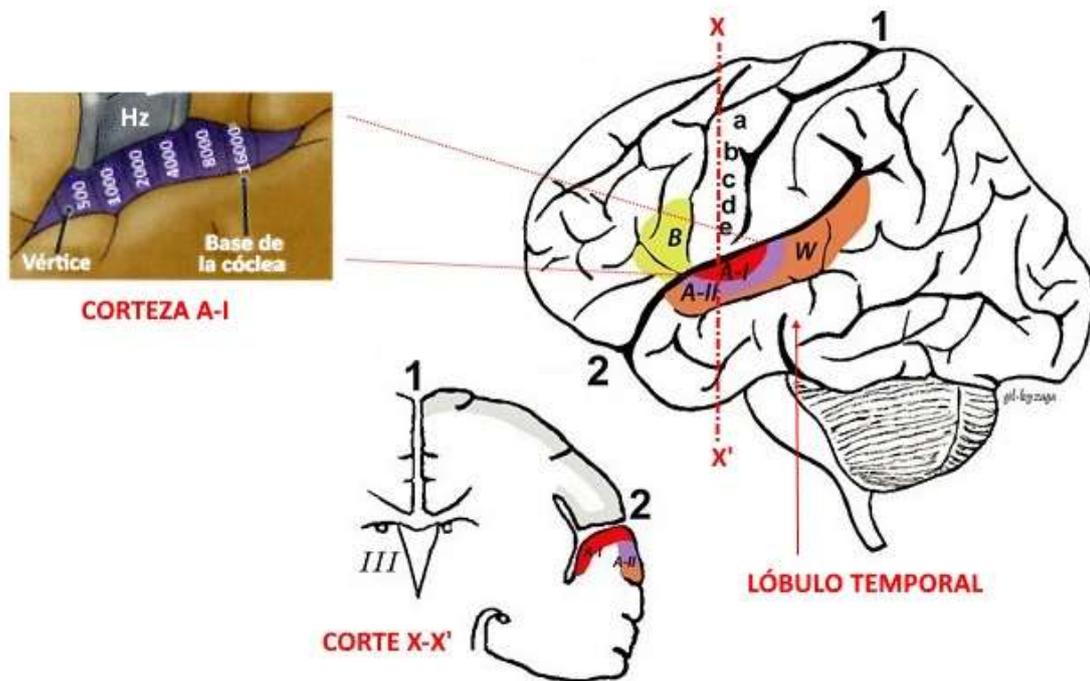
Si avanzamos más arriba por el tronco llegamos prácticamente a su techo, en donde encontramos a los *colículos inferiores*. Pues bien, es en estos colículos inferiores donde tienen el punto final todos los axones de los haces auditivos que hemos estado siguiendo hasta ahora. Allí hacen sinapsis con las neuronas [n4] situadas en estos núcleos, que añaden así un nuevo eslabón en la cadena. Recordad lo que decíamos en el capítulo 11 cómo sus compañeros, los colículos superiores, tenían una función destacada en los movimientos de los ojos, por lo que podemos imaginar que en los inferiores también se debe llevar a cabo una función importante: además de realizar un análisis por frecuencias se encargan de fabricar por primera vez un **mapa completo tridimensional del espacio sonoro exterior**, no sólo las distancias, sino también las elevaciones con relación al oyente.

Tras realizar esta función, las neuronas de los colículos inferiores lanzan a sus axones hasta un núcleo en la parte posterior del cercano *tálamo*, justo al lado del que recibía la información visual. En el tálamo auditivo sucede algo igual a lo que en el capítulo 11 ya comentamos para el tálamo visual. Hay unas vías parvocelulares que transmiten una información auditiva muy rica, pero de forma lenta, y otras vías magnocelulares más rápidas, aunque también más burdas en cuanto a los datos transportados. Las primeras alimentan directamente a la corteza auditiva siguiendo los complejos caminos que devengarán en la percepción sonora, mientras que las segundas

influyen en la amígdala, que incorpora rápidamente a la percepción un marcado componente emocional que prepara “instantáneamente” al cuerpo ante cualquier posible amenaza detectada por el oído: “*Oigo unos pasos silenciosos tras de mí*”. Con posterioridad, una vez procesada la señal parvo en la corteza, ésta decidirá si la amígdala anticipó o no una falsa alarma y propondrá, en consecuencia, una pauta motora de conducta: “*Bah, quédate como estás, era un gato dando un salto*” o “*SÍ, haz caso a la amígdala y sal corriendo, que es un asaltante*”.

No solamente interviene el tálamo en las decisiones conductuales, sino también en el proceso de generar la percepción de sonido, como no podía ser menos. Recuperemos la señal que venía de los colículos. Al estar interconectados ambos tálamos, se constituyen como elementos neuronales esenciales en la integración sonora de las señales procedentes de los dos oídos. Anatómicamente, las neuronas del tálamo se disponen en láminas con una clara organización por tonos -por frecuencias de graves a agudas-. Aunque observamos que ya algunas de ellas enriquecen de forma pionera la gestión compleja de las propiedades del sonido al añadir una cualidad nueva: son sensibles no sólo a una frecuencia, sino también a una determinada y precisa intensidad sonora ¿Y eso qué quiere decir?

Que los potenciales de acción de esas neuronas no solamente llevan la etiqueta de la “*frecuencia determinada en que está especializada*” sino que ya comienzan a integrar a la vez la información de “*un intervalo específico de intensidad*”. Y esto va sucediendo cada vez en un mayor grado a medida que vamos avanzando hasta el córtex en el camino del procesamiento neuronal auditivo. Podemos imaginar por tanto que a partir del tálamo obtenemos un producto, unos potenciales de acción, que integran por primera vez *localización, duración, altura* del sonido -frecuencia- y *sonoridad* -intensidad-. Unos potenciales de acción que van a seguir su camino por los axones de las neuronas talámicas n4 hacia las dendritas de las n5 situadas en las cortezas auditivas primarias ¿Cuántos relevos llevamos en estas carreteras auditivas? Tres, cuatro o cinco, dependiendo de los núcleos del tronco que decidamos seguir.



*Representación de las cortezas auditivas (explicación en el texto).
 En la parte superior izquierda, esquema de la corteza AI
 segmentada por su sensibilidad neuronal progresiva a las
 frecuencias del sonido. Las áreas B, a, b, c, d y e, de la figura son
 motoras relacionadas con la capacidad de emitir sonidos (lenguaje)
 (Imagen modificada de Pablo Gil-Loyzaga y de la red, fair use)*

Bien, por fin hemos llegado con nuestros potenciales de acción a la *corteza auditiva*, en donde se encuentra representado un patrón de distribución espacial que nos recuerda al de la corteza visual, con una zona primaria envuelta progresivamente por zonas de asociación. Está situada en la parte superior del lóbulo temporal y tiene un núcleo que conforma la corteza primaria A-I, en donde se dibuja un mapa perfecto de las frecuencias sonoras discriminadas en la cóclea al principio de la cadena. Como se ha esquematizado en la imagen anterior, a lo largo de su eje longitudinal se van distribuyendo grupos de neuronas especializadas en una frecuencia, definiendo una escala ascendente –o descendente-. En esta corteza casi la mitad de sus neuronas ya están especializadas en gestionar sonidos complejos a nivel de frecuencias, de intensidad del sonido o de intervalos temporales. Todo lo cual nos va a permitir desarrollar “habilidades” tan impresionantes como es el poder distinguir los diversos “colores” del sonido, lo que conocemos como el *timbre*, esto es, la cualidad que

incorpora el sonido y que nos permite saber si el “fa” que oímos es de un violín o de una trompeta, o que nos posibilita en un ruidoso bar el poder distinguir la voz de Pedro de la de María, ambos hablando en un rincón del local, y separarlas del ruido de fondo entendiendo lo que dicen. Es una demostración más de que el cerebro se encuentra muy cómodo analizando contrastes, tanto temporales como de matiz sensorial, como ya habíamos visto en el capítulo 12 al analizar la percepción visual.

Pero la corteza primaria no está sola en su trabajo. Rodeando a la corteza primaria A-I nos encontramos con la corteza auditiva secundaria A-II, la cual, aunque no tiene una clara organización tonotópica, realiza una importante función en lo relacionado con la localización espacial y memorización de los sonidos, a la vez de llevar a cabo un análisis complejo de los sonidos procesando los patrones prosódicos, rítmicos, melódicos y armónicos. En esta última tarea le asiste el área de Wernicke (W) especializada en la comprensión de la lectura y el habla, e incluso el pensamiento “hablado”. Su función presenta una cierta bilateralidad, ya que en el hemisferio izquierdo se procesa preferentemente lo que acabamos de decir, o sea, la comprensión del habla y la lectura o del ritmo musical, mientras que el área equivalente del hemisferio derecho muestra preferencias por la prosodia, es decir, la parte emocional del habla, o por la melodía y las armonías en el lenguaje musical, también con abundantes componentes emocionales. Más en la periferia se encuentran áreas auditivas terciarias que procesan de forma más compleja y especializada la información auditiva, al participar en la integración de los sonidos con otras percepciones sensoriales, a la vez de comunicarse con otros procesos cerebrales “superiores” sobre las emociones y la consciencia. El resultado de esta integración es la experiencia global de la percepción sonora. No comprendemos muy bien cómo los patrones de respuesta en las neuronas “auditivas” -que somos capaces de observar mediante las diversas técnicas desarrolladas para ello- se transforman en la sensación de “oír sonidos”, pero la realidad es que el conjunto oído-cerebro es capaz de proporcionarnos a cada uno de nosotros unas “coloridas” propuestas perceptivas, traducción de las prosaicas ondas de presión que captaron nuestras orejas.

Con esta última visión panorámica de algunas de las funciones llevadas a cabo en la corteza auditiva acabamos este tema relacionado con el sentido del oído y la percepción sonora. Una vez más, vemos como la evolución ha dirigido el desarrollo fisiológico y anatómico que nos ha dotado a los mamíferos de una herramienta fundamental para sobrevivir: inventar sonidos. Y digo *inventar* porque afuera sólo hay ondas de presión... aunque con mucha información que a la postre va a ser esencial. Con ella el cerebro ha sido capaz de hacer una representación mental de tal como suena nuestro entorno, reconstruyéndolo virtualmente de acuerdo a sus recuerdos y sus emociones. Y surgen en nuestro mundo sensorial las cualidades básicas que hacen que un son, una frase hablada o musical, suene diferente de otro: la *sonoridad* que depende del ritmo de los trenes de potenciales de acción; la *altura* del sonido que va impresa en la frecuencia que hace que sea agudo o grave; y el *timbre* o color que nos permite distinguir el susurro de una fuente cantarina dentro del caos sonoro en la plaza céntrica donde se encuentra, y que también viene inmerso en la maraña de todos sus armónicos.

En el próximo capítulo hablaremos de un sentido muy, pero que muy, primitivo. Tanto es así que informa directamente al cerebro sin pasar por estructuras que deben ser evolutivamente más modernas, como lo es el tálamo. Nos referimos al olfato.

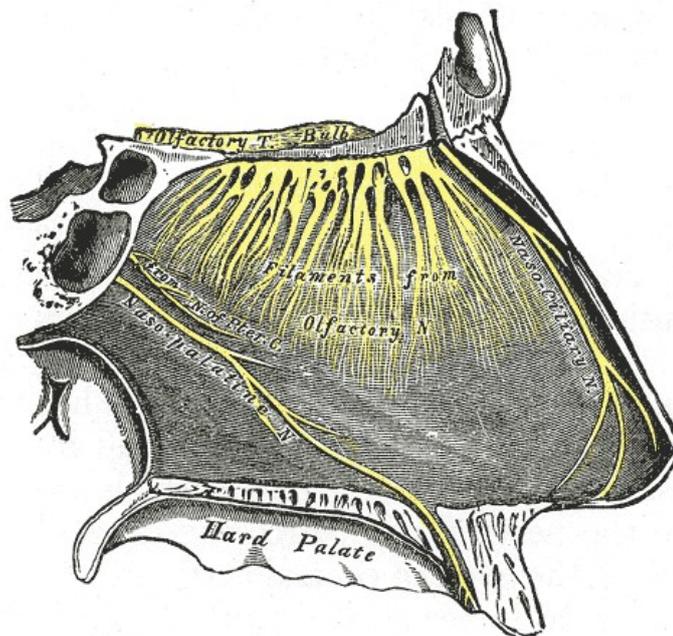
15: Sistema sensorial del olfato

Nos toca analizar un par de sentidos que responden a determinadas excitaciones inducidas en nuestro cuerpo por compuestos químicos que vienen del exterior. Hablábamos ya de un aspecto de ello cuando estudiamos el sentido de la nocicepción y termocepción en el capítulo 09 sobre el dolor y la temperatura, en donde vimos cómo determinadas moléculas agredían nuestra dermis provocando dolor, o bien cómo la capsaicina o el mentol llegaban a estimular los sensores de la temperatura induciéndonos unas sensaciones de calor o frío. Pero no es de eso de lo que vamos a hablar ahora, ya que me estoy refiriendo básicamente a los sentidos del olfato y el gusto.

En particular, este capítulo lo dedicaremos a ver qué procesos fisiológicos y neuronales se desencadenan cuando llega un estimulante químico exterior a nuestra **pituitaria**, la membrana mucosa que recubre el interior de ambas fosas nasales que, al final, nos va a producir esta sensación tan potente como es la paleta de olores del mundo que nos rodea. La evolución ha matizado las sensaciones olorosas que percibimos, de forma que normalmente lo que huele bien no es nocivo para nuestro organismo -incluso puede ser beneficioso- y lo que huele mal nos avisa de que, cuanto menos, hay que alejarse de ello como medida preventiva. Incluso la evolución nos ha regalado unas sutilezas casi “hedónicas”, al haber montado la posibilidad de integrar varias de las experiencias sensoriales: qué sería de los momentos en que nos proponemos deleitarnos con la comida sin la combinación de buen olor, buen sabor y agradable vista que nos genera el placer del gusto. ¿Qué éxito comercial tendría un perfume fragrantemente oloroso y a la vez de un sospechoso color marrón “no digo qué”? ¿Qué éxito reproductor tendría una posible pareja exponente máximo de la perfección corporal, pero que huela a *Sus estrofa doméstica*? Evidentemente, en esto último dejo aparte a los cerdos y cerdas.

Como ya se comentó en el capítulo anterior, el sentido del olfato es evolutivamente uno de los más antiguos, y prueba de ello es la

simplicidad del camino que conecta al elemento químico externo con el cerebro: el área olfativa es el único lugar donde el sistema nervioso central está en directo contacto con el medio ambiente, al ser colindantes los sensores externos y las estructuras corticales olfatorias. Nos da una clara pista de esta antigüedad el hecho de que en el desarrollo embrionario las estructuras cerebrales olfativas se inician y maduran antes que los núcleos talámicos. No nos ha de extrañar, por tanto, que a la corteza olfativa se la conozca como paleocorteza -del griego παλαιός, palaiós, “antiguo”- siendo sólo superada en antigüedad evolutiva por la corteza del cerebro emocional. Un reflejo de esta antigüedad lo tenemos en el cerebro de los vertebrados inferiores, en los que la corteza olfatoria es muy representativa tanto física como funcionalmente, ya que con ella gestionan sus trascendentales respuestas, que debemos imaginar como reflejos inconscientes, frente a los retos de la supervivencia.



Prolongaciones nerviosas que desde las fosas nasales forman en conjunto, al atravesar el hueso etmoides, el nervio olfatorio. Este último finaliza en el bulbo olfatorio, que en los vertebrados ya es parte del prosencéfalo (Anatomy of the Human Body, Henry Gray, wikimedia, dominio público)

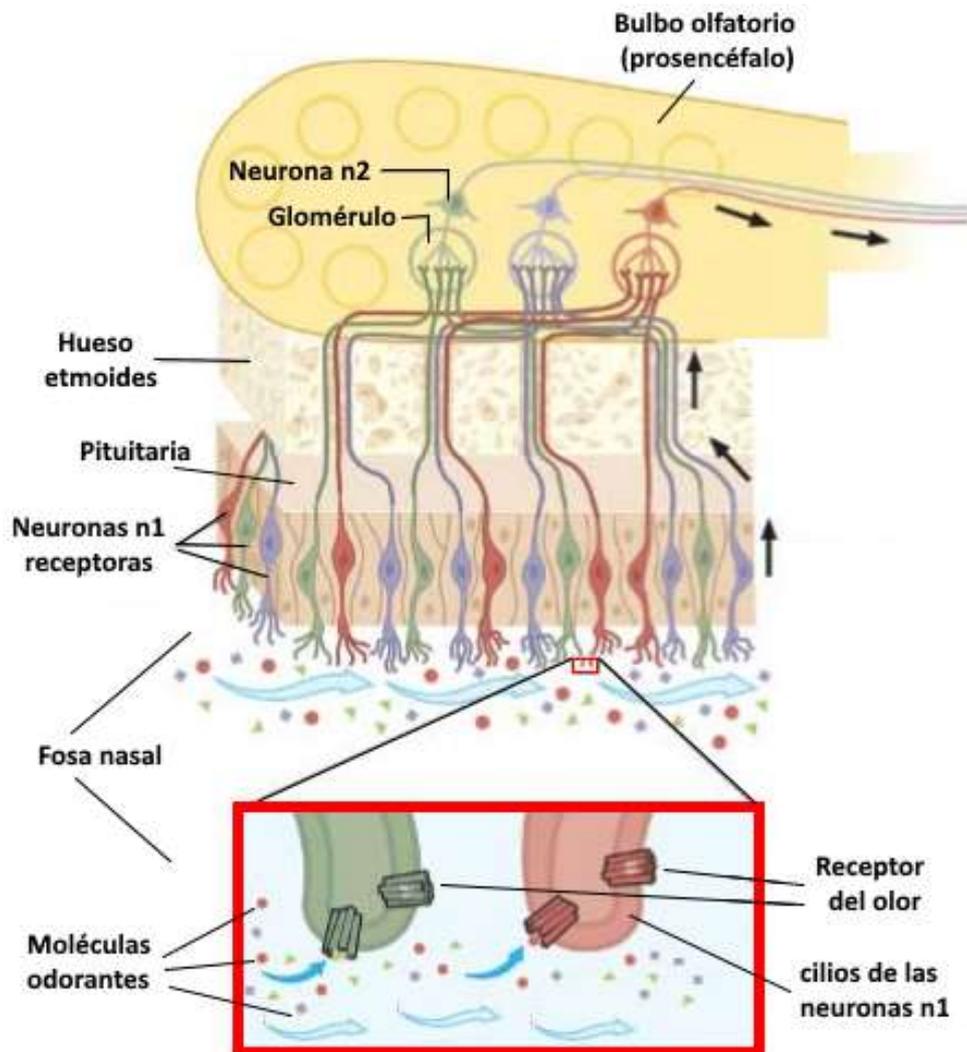
El proceso perceptivo del olor se inicia cuando cierto tipo de moléculas químicas que están “flotando” en el aire, junto con los

gases que lo forman y el polvo que está en suspensión, llegan a ponerse en contacto con los **sensores olfatorios** primarios que se encuentran, como ya he comentado, en la membrana mucosa que tapiza la parte interior de nuestros conductos nasales. Estos sensores son simplemente unas neuronas con la cabeza recubierta de cilios en cuyas membranas se encuentran incrustadas unas proteínas que actúan como canales iónicos. Las proteínas no dejan de ser más que una “madeja” de átomos con una forma específica que queda determinada por el tipo, número y disposición de estos mismos átomos que las componen. Además, las moléculas odorantes son más de lo mismo, unas estructuras atómicas y geométricas, aunque químicamente bastante más simples. Quiero decir que ambas moléculas, excitadora y receptora, tienen su determinada geometría 3D y que, de hecho, en algunos puntos encajan como anillo al dedo una con otra, lo cual permite algo así como que una llave abra una cerradura.

El resultado real nos lo desvelaron los premiados con el Nobel 2004 de medicina Richard Axel y Linda Buck^[1]. Un gen del ADN nuclear de cada neurona [n1] inmersa en la mucosa nasal es capaz de expresar una particular proteína, y solamente una, que constituirá su canal iónico a efectos del olfato. En realidad hay un variado abanico de estas proteínas, cada una de su correspondiente tipo de neurona, aunque todas ellas son muy semejantes. Cada tipo de puerta iónica incrustada en la membrana de su neurona puede ser activada solamente por unas pocas moléculas ambientales, lo que hace que cada neurona n1 tenga una estrecha especialización centrada en un escaso número de excitadores.

Los más o menos cien millones de neuronas receptoras de la mucosa nasal se encuentran agrupadas formando conjuntos, conjuntos que están físicamente organizados siguiendo una pauta que sitúa a las que van a inducir percepciones olorosas agradables reunidas en un extremo del campo odorífero y las contrarias en el polo opuesto. No sólo se organizan por zonas, sino también por ejes de olores. Debido a esta circunstancia anatómica es en la propia mucosa nasal donde se lleva a cabo el primer análisis acerca de la cualidad “atracción/repulsión” que tendrá para el sujeto la percepción final del

olor. No se sabe muy bien el porqué, pero es claro que en la apreciación de los olores la organización de las neuronas olfativas en la mucosa es relevante a la hora del tipo de información que en ellas se produce.



Inicio del camino neuronal correspondiente a la percepción de los olores (Imagen modificada de Wikimedia, uso libre)

De todas formas, la especialización de las neuronas n1, como ya sabemos por lo que sucede en otros sentidos, no comporta ninguna diferenciación en los potenciales de acción inducidos en estas neuronas con relación a los de las vecinas. No hay potenciales de acción del tipo “olor agradable” o del tipo “olor a resina”. Todos son iguales, aunque de alguna manera cada axón lleva “escrito” su habilidad particular. Estos axones de las neuronas n1 forman el **nervio olfatorio** y no están recubiertos por mielina, por lo que sus

trenes de potenciales de acción no son de los más rápidos, como ya explicamos en el capítulo 04. Quizás sea una disposición evolutiva eficiente, debido a que no todos los olores exigen una reacción de supervivencia inmediata. Físicamente, esos axones abandonan la mucosa atravesando el **hueso etmoides**, que en esta zona es como una piedra pómez. No tienen un recorrido muy largo, ya que justo al otro lado del fino hueso se encuentra el **bulbo olfatorio** -que es para el olfato lo que la retina para la vista- formado por un variado grupo de células entre las que se encuentran las neuronas [n2] con cuyas dendritas hacen sinapsis. Y ahí acaba el nervio olfativo. Poca cosa, pero que recupera su importancia si pensamos que el bulbo olfatorio es en realidad ya parte del encéfalo.

En la imagen de la página anterior se ha ampliado la visión de esta zona. Las sinapsis entre axones n1 y dendritas n2 no se llevan a cabo de forma generalizada en todo el bulbo olfatorio, sino en unos compartimentos esféricos llamados **glomérulos** que tienen un tamaño medio de una décima de micra. Cada célula sensora primaria proyecta su axón a pares de glomérulos equivalentes en ambas fosas nasales, de forma que sobre cada glomérulo llegan a converger hasta 25.000 axones de células cuyo ADN expresa su particular tipo de proteína receptora, que a su vez es receptiva a un pequeño paquete de moléculas odorantes. Además, en cada glomérulo pueden hacer a la vez sinapsis de 20 a 40 neuronas n2, las que toman el relevo en el bulbo olfatorio. Así que, como resultado de esta especialización y de entrecruzamientos, podemos imaginar cómo una fragancia compleja compuesta de varios olores esenciales llegará a decenas o centenas de estos glomérulos, en donde se activaran los potenciales de acción de decenas o centenares de neuronas n2. Sin embargo, no parece que todas las n2 afectadas se activen con la misma intensidad, ya que intervienen determinadas células vecinas que desencadenan una serie de inhibiciones que hacen que un glomérulo del conjunto de los activados tome la dominancia en el inicio de la expresión de un olor complejo. Todo ello hace que el patrón de la información que sale de las **células mitrales**, las n2, hacia las instancias siguientes del encéfalo no sea ni de lejos un reflejo pasivo de la que reciben del nervio olfatorio.

Odorant receptors	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Description
A 					●										rancid, sour, goat-like
B 		●				●									sweet, herbal, woody
C 	●			●	●		●			●	●				rancid, sour, sweaty
D 		●			●	●									violet, sweet, woody
E 	●			●	●		●	●		●	●	●			rancid, sour, repulsive
F 				●	●		●			●					sweet, orange, rose
G 	●			●	●		●	●		●		●		●	waxy, cheese, nut-like
H 				●	●		●			●		●			fresh, rose, oily floral

MODIFIED AFTER LINDA BUCK AND COLLEAGUES IN CELL VOL 96, MARCH 5, 1999

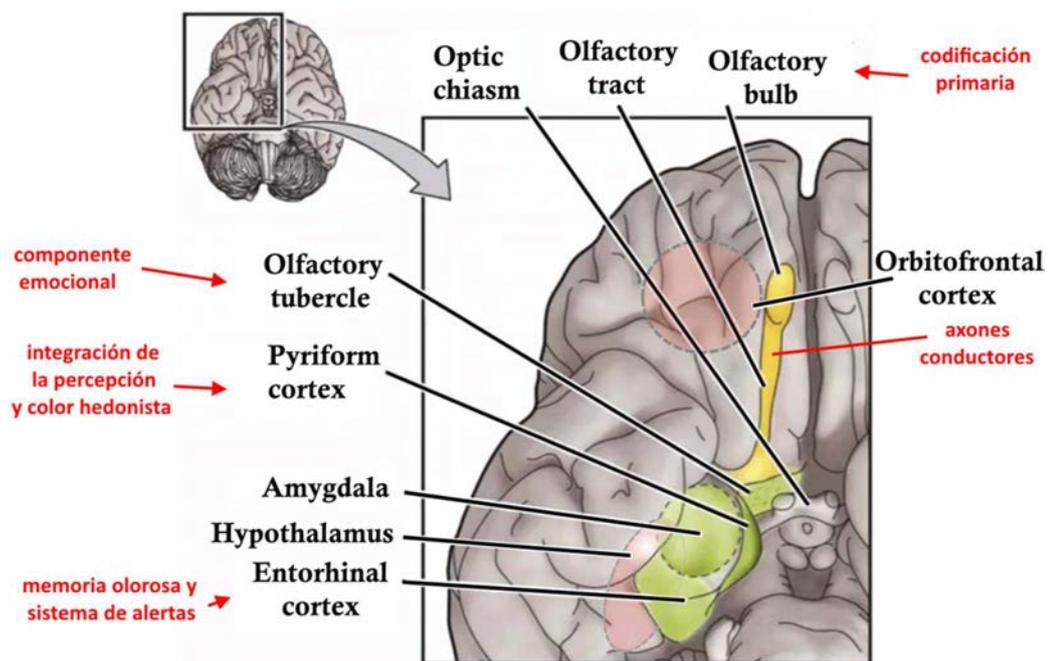
Ejemplo de la riqueza del código en la transcripción de la información que inicia alguna de las moléculas odorantes (a la izquierda) al incidir sobre algunas de las proteínas receptoras (arriba) (Imagen: The Nobel Foundation, fair use)

La imagen anterior es muy ilustrativa con respecto a lo que pasa en el primer escalón del algoritmo de codificación, al representar un ejemplo parcial del código de transcripción de la información que genera alguna de las moléculas odorantes al incidir sobre algunas de las proteínas receptoras. Si nos fijamos en el odorante del tipo E, calificado como “rancio, agrio, repulsivo”, podemos ver que puede acoplarse hasta con ocho proteínas receptoras, por lo que la información de este odorante llegará hasta ocho tipos de glomérulos diferentes. Pero a cada uno de estos glomérulos especializados, como el informado por la proteína número 5, también le pueden llegar datos de otros odorantes, alguno de ellos coincidente en el tiempo con el desagradable tipo E. A lo que habrá que añadir la selección realizada en el juego activación-inhibición que realizan las neuronas n2. En resumen, se trata de una circuitería simple y a la vez sofisticada para discriminar señales mediante un código combinatorio basado en el número y localización de los receptores primeros que son activados por la misma molécula química odorante, código que hace más compleja y rica su combinatoria al introducir en el juego a los glomérulos, unos relés especializados que interconectan de forma

compleja a las siguientes neuronas del relevo de potenciales de acción. Todo ello nos hace capaces de detectar con el olfato hasta unas 1.200 moléculas diferentes. Combínelas mediante el rico algoritmo que hemos descrito, digno del propio Alan Turing, y obtendrás las sutilezas de nuestro olfato, capaz de percibir lo imperceptible, por ejemplo, en vinos o perfumes. Hasta diez mil aromas diferentes, aunque parece ser que cada aroma puede reducirse a una mezcla de diez olores primarios que reflejan características de lo que hay en el mundo y que son importantes para la supervivencia, como puede ser el olor del peligro, del alimento o de la pareja. De todas formas, no está nada mal.

Aunque hemos desarrollado una capacidad de *odolocalización* basado en las sutiles diferencias de las plumas inhaladas por ambos nostriles de la nariz^[2], el sistema del olor presenta una particularidad, que para mí puede ser un indicio de la antigüedad evolutiva de este sentido, que es que en ninguna de las estructuras del cerebro se producen mapas topográficos definidos del espacio olfativo exterior, ni siquiera un ordenamiento topográfico interno, tal como sucedía en otros sentidos -vista, oído, propiocepción, tacto, olor, temperatura-. Se cree que quizás haya algo semejante en el bulbo olfatorio, al principio de la corriente de los potenciales de acción, pero que luego se difumina definitivamente a medida que avanza hacia estancias cerebrales superiores, mutando hacia una extensa sincronicidad temporal en la actividad de la corteza olfativa. Sin lugar a dudas, las reglas con las que el cerebro codifica y maneja las señales olorosas son muy distintas a las que usa para los otros sentidos, incluso pudiéndose hacer la hipótesis, como lo hacen algunos neurólogos, de que, ya que el patrón del código olfativo no correlaciona la posición espacial de los olores y de que, en cambio, sí existe una amplia sincronicidad en la actividad de la corteza olfativa, este código del olfato no pueda ser más que uno de tipo temporal. Es decir, que la secuencia temporal de llegada de la información a las diversas estructuras encefálicas que la procesan es la referencia con la que se lleva a cabo la discriminación y la respuesta adecuada frente a la detección de los odorantes del medio ambiente. Un artificio del encéfalo que nadie diría que pudiera ser útil en la construcción de la paleta de olores. Así es el habilidoso cerebro “cuenta cuentos”.

Pero sigamos adelante con la descripción de los circuitos. Resulta que el bulbo olfatorio es el final, la última frontera, de una larga prolongación encefálica como la trompa de un elefante, que parte desde zonas próximas a la base anterior de la zona talámica y se proyecta por encima de las fosas nasales hasta prácticamente las subórbitas oculares. Toda esta estructura está considerada como la **corteza olfativa**, por donde discurren a través del tracto olfatorio los axones de las neuronas del bulbo olfatorio que han recibido el relevo de potenciales de acción, para más allá transmitirlos hacia estructuras corticales o cuasi corticales en donde se llevan a cabo los procesos que colaboran en la percepción última y subjetiva de los olores. En la imagen siguiente podemos ver la cadena de estas estructuras interconectadas situadas en la parte interior del lóbulo temporal, por debajo de los emocionales núcleos amigdalinos y del hipocampo. Se tratan de *tubérculo olfativo*, la *corteza piriforme* y la *corteza etorrinal*.



Dibujo de la base del cerebro en el que se ha resaltado el sistema olfatorio. En el bulbo y tracto olfativos se encuentran las neuronas n2, cuya mayoría proyectan sus axones a la corteza olfativa primaria (en verde) o al cerebro límbico (amígdala) sin pasar por el tálamo. En rojo las funciones de las cortezas (imagen modificada del libro Neuroscience, D. Purves et al., 2012, fair use)

Desde estas cortezas filogenéticamente antiguas se proyectan axones hacia otras más antiguas aún, como el hipocampo al que se accede vía la corteza etorrinal, y hacia otras más modernas del neocórtex, como es la orbitofrontal, justo encima de los ojos, que se lleva a cabo a través de la corteza piriforme. Y cómo no, al igual que otras muchas corrientes de información sensorial, también llegan al conjunto de estructuras del tálamo, nuestro registrador de entradas favorito. En conjunto encontramos algo así como **tres subsistemas olfativos**. Podemos imaginar **(I)** que en la *corteza etorrinal*, junto con una más antigua corteza vecina -el hipocampo-, encontraremos la elaboración de la reminiscencia del primitivo servicio de alertas con el que se inició el olfato al permitir fijar los recuerdos olorosos en el tiempo. Un segundo subsistema **(II)** lo conformará la *corteza piriforme* junto también a próximas estructuras cerebrales, tales como la corteza insular, el claustro de los ganglios basales y otros núcleos relacionados, que llevarán a cabo la integración de la información olfatoria. También será la piriforme la que con el neocórtex encontrará la integración del olor con otras sensaciones, lo que nos va a proporcionar la experiencia refinada hedónica del gusto y el placer del sabor. A través de las realimentaciones tálamo-corteza, las señales olfativas se relacionan con una red neuronal muy extensa, prácticamente todo el córtex frontal, que interviene de manera capital en la toma de decisiones y en las consiguientes órdenes ejecutivas. Entendemos así por qué los olores condicionan nuestro comportamiento con tanta fuerza, que además están muy imbricados con nuestro mundo emocional a través del tercer subsistema **(III)** al relacionarse la corteza olfativa del *tubérculo* con el mundillo emocional de la amígdala y su servidor, el hipotálamo, implementando un procedimiento de alertas irracionales y rápidas - “*ojo, este alimento puede ser dañino, preparemos el cuerpo para el combate*”-, anteriores al posible análisis racional más lento del neocórtex.

Con esta visión funcional del escenario que se monta el cerebro “narrador” acabamos nuestro viaje por el mundo fisiológico y anatómico del sentido del olfato. Todo comenzó a partir de una serie de sustancias químicas, navegantes aéreas, excitando a ciertas proteínas que se encuentran en las membranas de unas neuronas

inmersas en la mucosidad nasal. *Todo muy prosaico*. Como los potenciales de acción que provocan, todos ellos iguales. *No parece que el tema se eleve demasiado*. Potenciales que llegan a amasijos de neuronas dentro del cráneo, a las que les gusta -menos mal- trabajar coordinadas. *Suena tan ilustre como la vida de un hormiguero*. Y, sin embargo, este poco elevado marasmo es el que nos impulsa irremisiblemente, aún en contra de nuestras voluntades más firmes, hacia el interior de la pastelería delante de cuya puerta estamos transitando a las ocho de la mañana. El 2,3-butadiol de la mantequilla o el Furan-2-ylmethanethiol del café nos han dado una lección de humildad. Su nombre suena asqueroso, pero... qué ricos nos los disfraza el cerebro. Aunque todo pueda ser un poco más complejo, ya que a esta hora temprana puede que sólo piense en la inmediata reunión que ha propuesto mi jefe... ni butadiol, ni furán, ni nada... la percepción olorosa es extremadamente sensible a la propuesta emocional que el cerebro nos construye en cada momento. Lo cual complica más el conocimiento de este sentido, de tal forma que para algunos biólogos el olor es una percepción que se siente pero no puede ser medida. Todos estos matices nos van a llevar a preguntarnos una vez más, ahora para este sentido: *¿Hay olores por ahí afuera?* Y como lo que hemos visto es que en el mundo externo sólo hay compuestos químicos, llegaremos obligatoriamente a la conclusión de que *el mundo no huele* y que *el que "huele" es nuestro cerebro*. Y no es que el sistema nervioso "huela", es que nos propone su invención de los olores como una herramienta emocional genial para sobrevivir.

En el capítulo que sigue acometeremos el análisis del segundo sistema sensorial "químico": el gusto.

NOTAS DEL CAPÍTULO 15:

1. Podéis encontrar el texto en el siguiente enlace:

[https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2004/press.html]

16: Sistema sensorial del gusto

Nos estamos aproximando al final del libro. Después de hablar de un variado abanico de sentidos aún nos queda tratar el del gusto. En el capítulo anterior habíamos estudiado el sentido del olfato, y el del gusto, al igual que él, se trata de uno cuyas espoletas iniciales del proceso son moléculas químicas que provienen del exterior del organismo. Veamos cómo es el proceso neuronal de la sensación de los sabores.

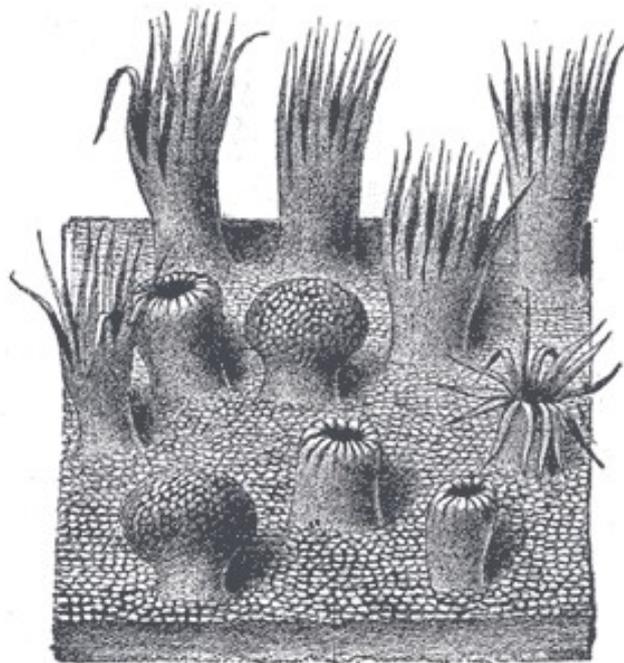


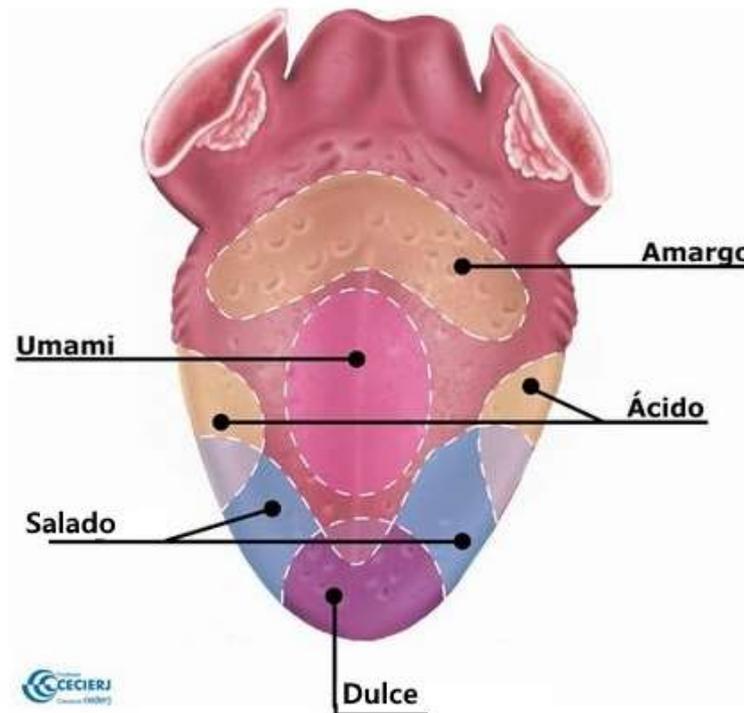
Imagen de los diversos tipos de papilas gustativas extraída de Anatomy of the Human Body, Henry Gray 1918 (Wikimedia, dominio público)

Los sensores gustativos primeros se encuentran en la cavidad bucal, principalmente en la lengua y en la faringe. En estas áreas se encuentran unas formaciones, las **papilas gustativas**, con variados aspectos, desde el que se asemeja a una seta hasta uno filiforme o bien con aspecto de vaso o incluso con algo semejante a hojas, en donde podemos encontrar a los **receptores gustativos** que no son más que unas células sensoras del estímulo exterior. Al igual que en

las células sensoras que conocemos de otros sentidos, las del gusto disponen en su cabeza de unos canales iónicos que, como ya sabemos, a fin de cuentas se tratan de determinadas proteínas expresadas por algún gen de su ADN, y que se encuentran incrustadas en la membrana celular. Cuando encaja la molécula excitadora en su canal parejo se genera un desequilibrio iónico en el interior de la célula, que a la postre va a derivar en la generación de una emisión de neurotransmisores en su base.

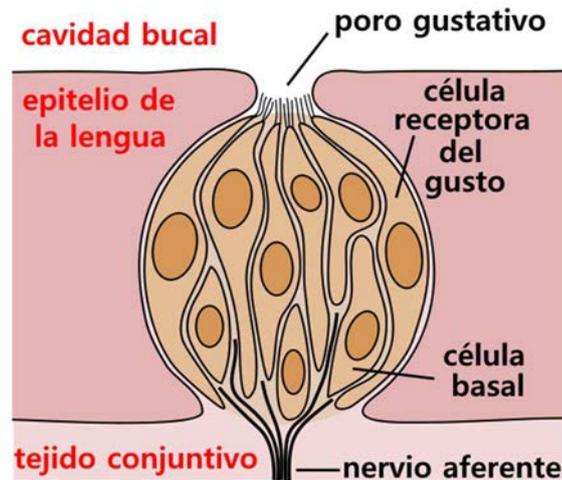
Quedémonos en el inicio de este proceso, cuando determinadas moléculas químicas que se encuentran en el exterior del organismo provocan, al ser ingeridas en la boca, el inicio de la percepción de los sabores. Sabemos que hay una multitud de ellos, aunque podemos reducirlos a cinco básicos: el *salado*, el *ácido*, el *dulce* y el *amargo*, con una quinta categoría llamada *umami*, inducido principalmente por el glutamato monosódico, que refuerza la intensidad de los otros cuatro. La palabra umami viene del japonés y significa “delicioso”.

Los diferentes sabores provienen de diferentes inicios perceptivos, ya que cada tipo de moléculas inductoras de alguno de los sabores interactúa de una forma diferente con los canales iónicos, o similares, de las células sensoras. Lo primero que se observa es que sobre la lengua hay una *predisposición* a que los sensores de cada tipo de los cinco sabores elementales se distribuyan según un patrón espacial *preferente y parcialmente superpuesto*. Lo cual no quiere decir que esto se traduzca en una perfecta distribución sensorial topográfica de los sabores exteriores. El sabor salado, el dulce o el umami son percibidos preferentemente en la parte delantera y lateral de la lengua. Sin embargo, el sabor amargo tiende a ser detectado en las papilas situadas sobre todo en la parte posterior de la lengua, y por fin el sabor ácido, en los lados de la misma. Como veremos unos párrafos más abajo cada una de estas zonas son inervadas por **tres pares de nervios craneales** distintos, lo cual nos refuerza una vez más la idea de que las percepciones no responden exclusivamente al reflejo de las características que viven en el exterior, sino más bien a los canales de gestión encefálica en donde son tratadas: el gusto también es el resultado del trabajo en “oficinas” internas de los “funcionarios” especializados.



Mapa lingual de las zonas preferentes de detección primera de los sabores (Imagen, Fundação CECIERJ, fair use)

Hay que decir algo más acerca de esta aproximada topografía lingual de papilas especializadas en sabores, ya que ésta tiene una segunda derivada: es también la topografía de la *sensibilidad* al gusto. En cada una de estas regiones el gusto responde a distintos umbrales de concentraciones de las diferentes moléculas excitadoras. Las papilas que actúan bajo el efecto de sustancias que inducen la sensación de sabor amargo lo hacen en rangos de concentraciones por debajo de las nanomolares (inferiores a 10^{-9}), mientras que las especializadas en los sabores dulces o salados actúan con concentraciones de los excitadores a partir de un orden mil veces mayor (más de 10^{-6}). Lo cual tiene una cierta lógica, ya que las sustancias ingeridas que son dañinas para el organismo suelen ser amargas y, por tanto, es esencial que sean detectadas con antelación a las sustancias dulces o saladas, percepciones estas últimas que nos dan idea de que son adecuadas para alimentarnos. Es más, precisamos una mayor abundancia de ellas para darnos cuenta de lo que son y las detectamos con más dificultad, ya que en nuestras vidas necesitamos una buena cantidad de ellas. La sabia evolución.

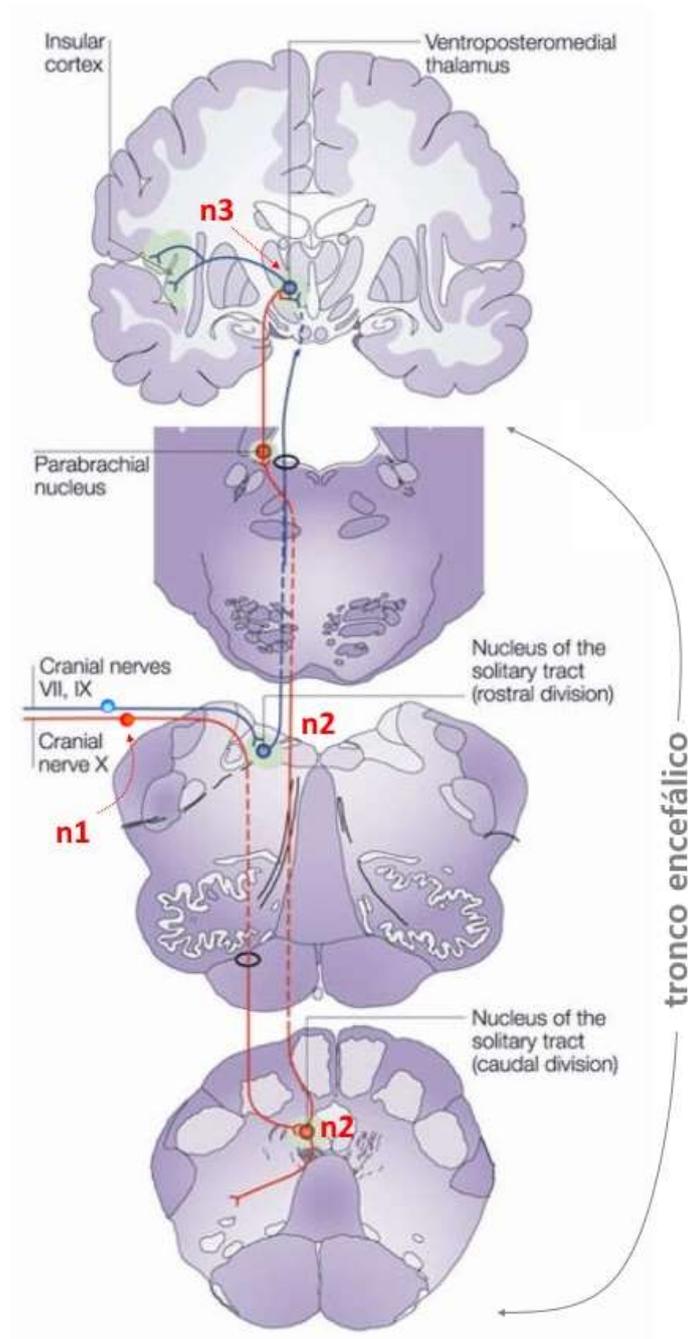


Esquema de una papila gustativa (Modificado de wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Bien. La verdad es que en nuestra boca ha entrado una sustancia dulce o ácida. Sustancia que ha excitado a una neurona sensorial en cierta papila, que a su vez ha emitido unos neurotransmisores por su base. A esta base llegan los axones de las primeras neuronas [n1] en el relevo de potenciales de acción “gustativos”, cuyos núcleos se encuentran repartidos entre **tres ganglios** dispuestos en el interior del hueso temporal. Estos axones son los que conforman los **nervios gustativos**, en plural, ya que hay tres zonas sensibles al gusto inervadas por diferentes nervios: el VII para la parte delantera de la lengua; el IX para la parte posterior de la lengua, y el X para la faringe. Realmente, los gustativos son subnervios de estos tres que en su conjunto sirven para otros propósitos variados.

Las neuronas situadas en estos tres ganglios proyectan otra rama de sus axones hacia el tronco encefálico, más o menos a la altura del cerebelo, para hacer sinapsis con las segundas neuronas [n2] que allí se encuentran formando el **núcleo del tracto solitario**. A este núcleo le llegan también señales de las vísceras y a su vez emite conexiones hacia otras zonas del tronco especializadas en respuestas somáticas motoras reflejas relacionadas con las vías altas respiratorias y bucales, y que son las que manejan reacciones tales como las náuseas, el toser o el escupir, e incluso los vómitos. Así que en este sentido el núcleo del tracto solitario se constituye en un integrador de señales y órdenes relacionadas con la comida, no solamente matizadoras de la faceta hedónica del paladar gastronómico, sino las que le van a

permitir ser el último “cancerbero” corporal ante situaciones en las que acabamos de ingerir alguna sustancia tóxica o dañina para nuestro organismo. En estos momentos, tras ingerir algo nocivo, el núcleo del tracto solitario puede provocar la tos, o el vómito, tras lo que se provoca la expulsión de estas sustancias perniciosas.



Esquema de las primeras vías neuronales que intervienen en la percepción del gusto (Imagen, National Center for Biotechnology Information, PMC Open Access Subset)

Las neuronas n2 del tracto solitario, tras recibir el relevo de los potenciales de acción, al igual de lo que sucede en muchos otros sentidos, los transmiten a través de sus axones hacia la parte posterior del **tálamo** en donde les espera una tercera sinapsis a realizar con la tercera línea de neuronas [n3]. Ésta, a su vez, proyecta sus axones hacia cortezas no demasiado alejadas físicamente del tálamo. Son las que se conocen como **cortezas olfativas** primarias que se encuentran escondidas en el pliegue que separa los lóbulos frontal del temporal (ver figura de arriba), en posición inferior a la corteza motora del lóbulo frontal.

En estas cortezas primarias los cinco sabores básicos son interpretados por células especializadas en cada uno de ellos, que se distribuyen en áreas muy precisas, conformando un ordenado mapa espacial de sabores en donde se interpretan las distintas cualidades del gusto^[1]. Podríamos pensar que esta circunstancia responde a un procedimiento organizativo general del cerebro, pues ya vimos algo parecido con las percepciones del dolor, temperatura, tacto, vista u oído, como podemos recordar si repasamos los capítulos correspondientes que dedicamos a estos sentidos. Pero con un matiz, ya que en estos sentidos es importante el saber exactamente el lugar del organismo donde se inicia la percepción -me duele la oreja, veo un coche a mi izquierda, oigo la nota “do” de aquel piano, me tocan la espalda, me quemo la pierna- mientras que en el gusto ¿qué importancia puede tener el saber que en la punta de la lengua me sabe dulce?

Más allá de las cortezas gustativas primarias encontramos a la **corteza secundaria**, situada en la corteza orbitofrontal -por ser la parte de la corteza del lóbulo frontal que se encuentra físicamente sobre los ojos-, y a la que también llegan estímulos gustativos que sensibilizan hasta a un 8% de sus neuronas, aquellas que responden de forma especializada a determinado sabor. En esta corteza secundaria comenzamos a ver cómo se empieza a introducir en la percepción influencias de tipo más psicológico: preferencias o motivaciones. Es lógico, ya que en la vecindad cerebral de las cortezas gustativas primarias y secundaria no sólo se encuentran las *cortezas prefrontales supraorbitales* -gestión del comportamiento y

toma de decisiones-, sino también la *corteza insular* -relacionada directamente con las vísceras- y la *corteza olfativa*, de la que ya hablamos en el capítulo anterior. Como vemos, de nuevo nos encontramos con una zona muy especializada del encéfalo en la que se integran señales relacionadas con el placer -o no- de la alimentación, factor importante que puede condicionar nuestras pautas de comportamiento, lo cual nos permite pensar que las vías neuronales del gusto deben participar en algo más sofisticado que añade valor a su particular gestión. Las cualidades de los estímulos que nos traen los alimentos descansan no sólo en la información que viene de las papilas gustativas, sino también en otras propiedades como el olor, la textura -tacto- o la temperatura^[2]. Las estructuras corticales del sistema central del gusto funcionan como una circuitería integrada en la que las neuronas que se excitan ante *inputs* del gusto son también sensibles ante estímulos somatosensoriales y olfativos. Además, las vías del gusto están moduladas por señales que reflejan determinados estados internos del cuerpo, tales como el nivel de hormonas gastrointestinales o el de la glucosa en sangre. Estamos ante un sistema multisensorial que nos ha regalado la evolución para que podamos evaluar continuamente el significado biológico de los estímulos que detectamos en la boca. Tenemos múltiples experiencias del tema: “*debo tener una bajada de azúcar porque ¡qué sabrosa me resulta la manzana!*”, “*esta carne, por el olor que tiene, debe saber a cuerno quemado*”, “*¡qué calor!, me sabrá a gloria una cerveza fresquita*“... Cuando nos pase algo por el estilo ya sabremos cuál es la maquinaria cerebral que nos está produciendo estas sensaciones-percepciones.

Una maravilla. A lo largo del proceso de generación de las cualias del gusto hemos observado algunos actores especializados en un determinado sabor. Hemos visto que los axones de los nervios gustativos llevan una información precisa con la etiqueta que les puso la célula sensitiva con la que hizo la sinapsis inicial. Podemos decir que hay axones dulces, axones amargos, axones salados, axones amargos o axones umami. Pero una vez que estos axones han entrado en el encéfalo la cosa ya no está tan clara, empezando por el procesador integrador del núcleo del tracto solitario, o más allá, en la región de las cortezas gustativas y vecinas. Parece como si con el paso

por las sucesivas estructuras neuronales se fuera difuminando la señal eminentemente de tipo sensorial gustativo, la importancia del sabor, para hacerse cada vez más significativo su eco en las pautas de comportamiento, a través de la percepción de su valor para la seguridad vital o de la percepción del valor hedónico de los alimentos, es decir, si un gusto es placentero o si merece ser recibido con una respuesta de rechazo. No sabemos cómo se las apaña el cerebro para deducir estas sutilezas a partir de unas familias de trenes de potenciales de acción, todos básicamente iguales, pero lo hace. No cabe duda de que lo hace.

Con eso damos por finalizado nuestro “penúltimo” sentido, aunque quizás debiera decir el último de la lista de los tradicionales. Y nos quedamos, una vez más, con la formulación de la pregunta: Si todo comienza con una molécula química... ¿dónde está el sabor? ¿los pasteles *saben*? Es evidente que no, los pasteles no saben, pero nuestro cerebro nos propone para los pasteles una etiqueta, un entorno emocional agradable, de premio, que nos indica, sin tener que pensar conscientemente, que podemos ingerirlos pues son buenos, con valor nutricional, para nuestros organismos. O bien nos propone una náusea que nos induzca un rechazo porque nuestro organismo se encuentra en el borde de un coma diabético hiperglucémico.

En el capítulo siguiente abordaremos un sentido poco conocido, quizás porque su definición se encuentre entre dos aguas, que nos permite saber cómo está nuestro horno químico interno: el de la interocepción.

NOTAS DEL CAPÍTULO 16:

1. Para los más curiosos, podréis tener más información en el artículo “*A Gustotopic Map of Taste Qualities in the Mammalian Brain*” (2011) de Xiaoke Chen et al.
2. Para una mayor información al respecto podréis acudir a este artículo, “*The gustatory cortex and multisensory integration*” (2010), de Iván E. de Araujo y Sidney A. Simon.

17: El sentido de la interocepción

Tras hablar en el capítulo anterior del proceso neuronal que nos genera la percepción del sabor, en éste vamos a hablar del último sistema sensorial que nos queda por comentar: el de la interocepción. Como su nombre sugiere, es el equipamiento y el proceso con el que cuenta el cerebro para tener datos de la propia situación interna del organismo, datos importantes para mantener el normal funcionamiento de órganos y sistemas. Estaríamos hablando de la monitorización de los sistemas circulatorio, gastrointestinal, respiratorio, urinario y endocrino, y de la posterior regulación y coordinación de importantes actividades corporales como son la digestión, la temperatura corporal, la presión sanguínea, el caudal respiratorio y muchos aspectos de la conducta emocional. Como veis, un variado abanico del que preocuparse.

Sin lugar a dudas el cerebro sabe qué hacer con esta información que le llega desde las vísceras. Gracias a ello nuestra vida sigue normalmente adelante sin sobresaltos, día a día, con nuestro sensible equilibrio homeostático apoyado en el filo de la navaja, de forma absolutamente inconsciente para nosotros. Lo cual no creamos que es una labor baladí. Tiene su importancia, ya que el panel de mandos de las vísceras es sumamente complejo como para coordinarlo desde la consciencia. Sin embargo, a veces percibimos algo: como resultado de los procesamientos cerebrales en los que intervienen estas señales interoceptivas se generan unas percepciones absolutamente subjetivas, incluso podríamos decir que para el que las percibe son casi del tipo de la realidad que le proponen los sentidos de la vista, el gusto, el olfato o que se experimentan con el dolor. Estaríamos hablando de la sensación de sed, de hambre o de su contraria, la saciedad, de palpitaciones inexistentes, de una angustiada asfixia o, por supuesto, también de dolor. Pero también según modernos neurólogos^[1] sería el sentido responsable de la percepción consciente de las emociones, es decir, de los sentimientos: tristeza, felicidad, amor, asco... ¿de dónde surgen estas sensaciones internas a las que el hombre, con su capacidad de generar conceptos abstractos, les ha

puesto nombre? Porque se tratan de construcciones de nuestro cerebro.

Efectivamente, en nuestros cuerpos no hay nada que se llame *hambre*... quizás, tal vez, vaciedad de estómago. Sólo hay sensación de *ahogamiento* en casos de ansiedad... sin que los bronquios hayan colapsado. Ni tampoco en el cuerpo hay nada que se llame borrachera de *amor* más que una taquicardia o una ansiosa sudoración en un entorno corporal y de pensamiento placentero. Son perceptos creados por el cerebro para añadir una componente emocional a situaciones estresantes del organismo, perceptos que son útiles para la supervivencia. La evolución, una vez más, ha hecho “bien” las cosas -aunque simplemente las ha hecho y son como son- seleccionando a aquellos individuos que generaron estas pautas subjetivas cerebrales. Quizás si no sintiéramos el estímulo de la sed moriríamos de un paro cardíaco por deshidratación, o por una crisis metabólica ante una pérdida de sales. O tal vez sin padecer conscientemente el hambre no sentiríamos la llamada de emergencia del cerebro y de nuestros músculos pidiendo glucosa. Posiblemente sin la sensación de ahogo o de palpitaciones seguiríamos sin límite con un ejercicio corporal extenuante o con una situación laboral estresante, circunstancias que debemos modular como sea. Y sin lugar a dudas sin el reflejo feliz de la dopamina en las relaciones entre sexos, estado que sentimos como amor, posiblemente no habría motivación para el apareamiento y en consecuencia no habría descendencia y continuación del acervo genético.

Es habitual que la función de la interocepción se suele considerar como consciente, es decir, pensamos en ella como la percepción consciente de los estímulos generados por las vísceras. Para entenderlo mejor recalcamos lo dicho en el párrafo anterior: sería lo que nos diera la señal de hambre cuando el organismo en su actividad requiere alimento, o la percepción que produciría la señal de sed tras una exigente mañana de cuidar el huerto en un día soleado, o que nos induciría una taquicardia tras una hemorragia aún no controlada, o que nos crearía la sensación de ahogo y asfixia subiendo una cuesta en la maratón, o simplemente el que nos ayuda a decir “*me duele el estómago*” tras una mala digestión. Este carácter que se le suele dar

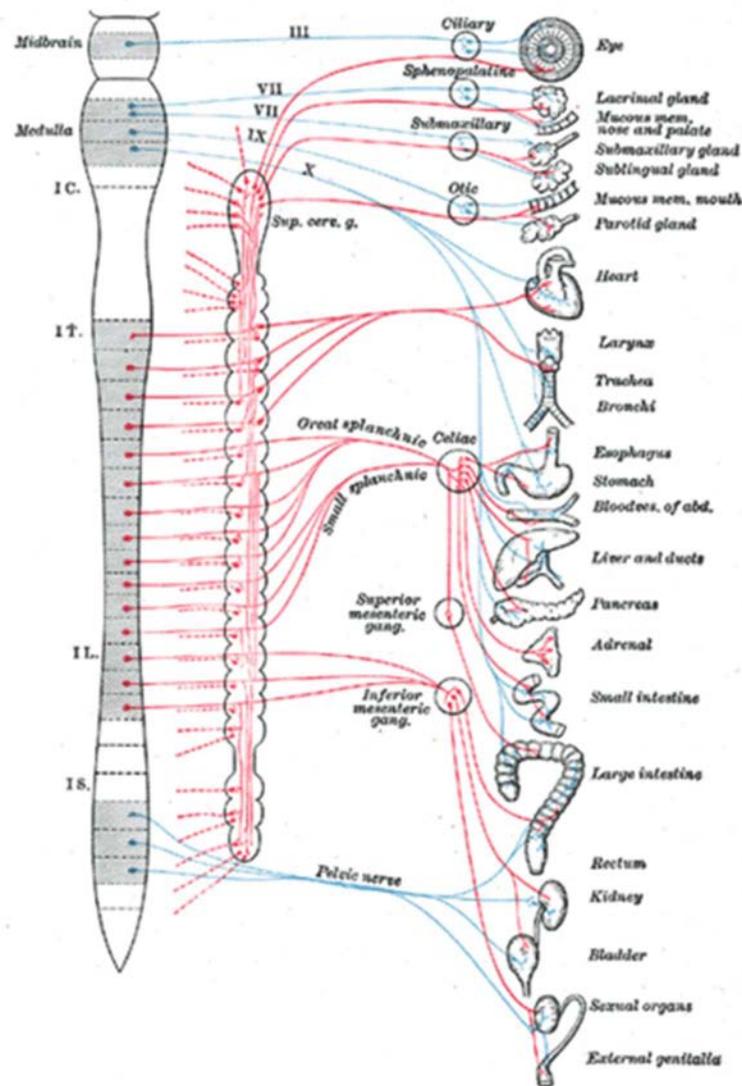
de consciente no se ajusta totalmente a la realidad, ya que se ha observado en algunos estudios sobre humanos que ciertos procesamientos de información interoceptiva en los centros superiores no consiguen alcanzar la consciencia. Y, por supuesto, lo podemos encontrar en el carácter interoceptivo inconsciente del sistema endocrino con su juego hormonal, por el que el cerebro recibe información del estado del cuerpo. De todos modos, en esta serie no hablaremos de esto último, ya que nos hemos centrado desde el principio en plantear el esquema neuronal de los sentidos, con la clara intención de que ello nos permita entender mejor cómo el cerebro se comporta como el gran inventor de nuestras percepciones.

Vayamos, pues, a la arquitectura neuronal del sentido de la interocepción. O, al menos, a intentar plantear la generalidad de lo poco que aún se conoce sobre ese difuso sentido.

El sistema empieza con **los sensores** situados en los órganos viscerales de las cavidades torácica y abdominal. Estos detectores primarios de las señales interoceptivas ***pueden activarse*** por la acción de excitaciones de variada tipología, desde una deformación celular provocada por una **(i) causa mecánica** -presión, estiramiento o tensión-, a una agresión provocada por **(ii) sustancias químicas**, o una **(c) variación de temperatura**. Otros sensores son sensibles a la **(iii) concentración osmótica del plasma** sanguíneo y aún otros relacionados con el **(iv) volumen de los fluidos** corporales. Las células sensoras actúan mediante unos mecanismos fisiológicos de respuesta muy similares a los detectores estudiados en los otros sentidos, que se basaban en flujos de iones entre el exterior y el interior de dichas células sensoras inducidos por alguna de las causas excitadoras externas que hemos mencionado.

Las neuronas que recogen el “aviso” de los sensores convierten los cambios locales físicos y químicos, que afectan a los órganos, en señales eléctricas que transmiten al sistema nervioso central a través del **sistema nervioso autónomo**, utilizando **dos vías**: la del *nervio vago* -el X de los pares craneales- y la del conjunto *nervio pélvico/médula espinal*. El sistema nervioso autónomo, al ser el encargado de vehicular la información de las vísceras y del medio interno, es la parte del sistema nervioso que controla las acciones

involuntarias regulando importantes actividades corporales que incluyen la digestión, la temperatura corporal, la presión sanguínea y muchos aspectos de la conducta emocional. Los axones que llevan la información desde la periferia al encéfalo transmiten la sensación visceral y la regulación de la presión sanguínea y de los movimientos respiratorios.

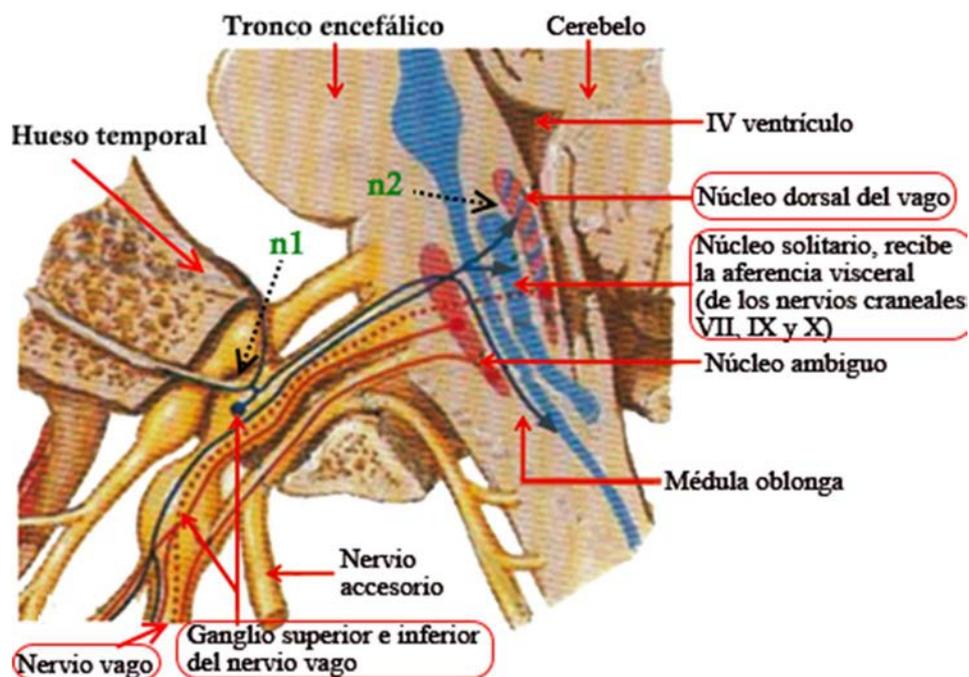


Sistema nervioso autónomo. Se ha dibujado en azul al sistema parasimpático y en rojo el sistema simpático. (Imagen de Anatomy of the Human Body, 1918, Henry Gray, dominio público)

Pero vayamos con **la primera de las vías**. Al *nervio vago* se le conoce también como nervio pneumogástrico. El que se le llame así tiene una clara explicación, ya que inerva la faringe, el esófago, la laringe, la tráquea, los bronquios, el corazón, el estómago, el

páncreas, el hígado y el intestino, aportándoles el componente parasimpático que vela por la correcta realización de sus funciones de una forma inconsciente. En el capítulo dedicado al sentido del gusto ya hablábamos de él como responsable de esa percepción a partir de la faringe. Pero quizás la función que le exija más recursos sea la de llevar las señales interoceptivas, puesto que dedica alrededor del 80% de sus axones a esta misión.

Dichos axones, que proceden de los cuerpos neuronales [n1] situados en unos ganglios dentro del hueso temporal, entran directamente en el **tronco encefálico** (la *Medulla* en la imagen anterior) en donde se proyectan al *núcleo del tracto solitario*, que es la zona donde se encuentran las neuronas [n2] de segundo orden con las que harán sinapsis. Recordemos cómo este núcleo participaba también en el sistema del gusto desarrollando una función de integración de señales viscerosensoriales. Recibidos los potenciales de acción por estas segundas neuronas, los transmitirán a través de sus axones a diversos lugares del tronco encefálico, del hipotálamo y de la amígdala, estableciendo así vías neurales bien organizadas que son la base para la regulación de los distintos órganos.



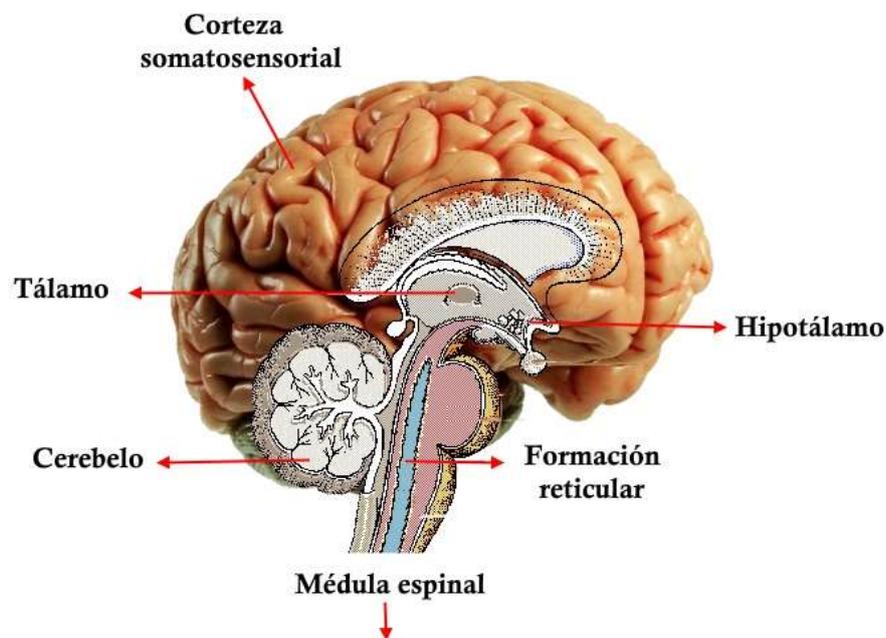
Arquitectura neuronal del nervio vago responsable de la primera vía interoceptiva (Imagen de la red, fair use)

La segunda vía de comunicación interoceptiva visceral con el sistema nervioso es semejante a la que ya conocemos de otros sistemas sensoriales como el del tacto, el nociceptivo o el termoceptivo. Recordemos que básicamente se trataba de una cadena de tres neuronas en serie: una primera sensora [n1] con el cuerpo en un ganglio de la cadena paralela a la médula espinal; la segunda [n2] en la propia médula o en el tronco encefálico, la cual proyecta su axón a una tercera [n3] situada en el tálamo.

Vamos a particularizar este esquema general para la vía visceral que estamos comentando, que se conoce como el *tracto archiespino-talámico*.^[2] Sus primeras neuronas, las sensoras, llamadas también neuronas aferentes viscerales, tienen sus cuerpos en la cadena de *ganglios anexos a la médula espinal* y son las que transportan los primeros potenciales de acción inducidos por lo experimentado por los órganos de las cavidades abdominal y torácica. Estas neuronas n1 de primera línea lanzan sus axones que penetran la *médula espinal* torácica, lumbar y sacra, para ascender por ella y al final entrar en el *tronco encefálico* y, posteriormente, llegar hasta el *tálamo*. La arquitectura de las conexiones en este tramo intermedio es muy difusa, ya que están organizadas en la médula por bloques según la distribución longitudinal de segmentos corporales,^[3] no dando lugar a “lugares” específicos que representen una víscera. Esta vía visceral presenta también sinapsis secundarias a diversos niveles de la médula espinal y del tronco encefálico, y además sus segundas neuronas tienden numerosos axones colaterales hacia las vías que conducen la sensibilidad somática consciente, por lo que muchas veces se puede confundir la sensación de una víscera con las que generan estructuras orgánicas, otras vísceras, neurológicamente relacionadas. O bien se pueden producir reflejos de unas a otras, como pudiera ser el percibir un fuerte dolor en la zona escapular cuando realmente es el bazo el que protesta.

La complejidad arquitectónica de esta vía, por un lado, ralentiza su actividad y su capacidad de respuesta y por otro lado difumina la percepción del lugar, del momento temporal e incluso de la modalidad del primer impulso excitador interoceptivo. Sin embargo, a pesar de su complejidad difícil de desenmarañar, puede sorprender

que el número de las vías neuronales que se encargan de las vísceras sea muy pequeño en proporción con las que llevan al cerebro información de otras regiones o de otro tipo de percepciones. Estas fibras nerviosas normalmente están en estado “silencioso” y sólo comienzan a dispararse bajo condiciones muy específicas fijadas por algún tipo de umbral. Aquellos eventos que lo sobrepasan son interpretados como un potencial peligro para los órganos viscerales y por tanto para el organismo, despertando al sistema y generando percepciones conscientes de malestar y de dolor. Quizás una explicación de este funcionamiento tan difuso y como de segundo orden resida en que las vías que llevan la información visceral sean las filogenéticamente más antiguas, arrastrando por tanto unas funcionalidades primitivas que, por haberse manifestado eficientes desde antiguo, han perdurado en los organismos de hoy sin necesidad de modificaciones.



Estructuras superiores de la vía archiespinosa que pensamos conforman algo así como un módulo de gestión autónomo de la interocepción (Imagen compuesta a partir de la red, fair use)

Estas vías interoceptivas del tracto archiespino-talámico terminan en una zona específica del tramo inicial del tronco encefálico, llamada *formación reticular*, y desde ésta sus neuronas proyectan sus axones más arriba, hacia el diencéfalo, hasta el *tálamo* y el *hipotálamo*, lo

que en su conjunto constituye un auténtico centro de control autónomo sobre el que las estructuras superiores ejercerían únicamente un papel modulador. En un principio se creía que aquí se acababan las estructuras neurales que gestionaban las percepciones viscerales, pero poco a poco se van teniendo más evidencias de que las entradas interoceptivas se proyectan en el encéfalo más profundamente, hasta distintas regiones corticales. Lo que sabemos acerca del procesamiento cortical de la información interoceptiva que le llega, así como su repercusión sobre la consciencia y la conducta, es muy escaso, y aunque en la práctica al córtex llega información de todos los órganos, no tenemos muy claro cuáles puedan ser las regiones de la corteza implicadas en la sensibilidad visceral -posiblemente sean las *áreas somatosensoriales* del lóbulo parietal-.^[4]

No puedo acabar este capítulo acerca del sentido de la interocepción sin hablar de un aspecto que me parece sorprendente, y es su posible relación con el extraordinario proceso emergente en el encéfalo como es la *consciencia*. Aunque hay diversas escuelas en el estudio de las emociones y sentimientos, parece que la neurología actual se decanta hacia la existencia funcional de la siguiente cadena: a partir de una circunstancia percibida del exterior -o del propio cuerpo-, el cerebro, en base a su patrón de experiencias guardado en la memoria, prepara inconscientemente al cuerpo para afrontar la situación -amenaza u oportunidad-. Las alteraciones generadas en cuerpo, pensamientos e incluso la dinámica de la acción de pensar, constituyen los estados emocionales que a su vez son percibidos por el cerebro dándonos la componente sentida de los mismos. Aparecen los sentimientos -la componente consciente de las emociones- que como humanos de pensamiento abstracto hemos bautizado con una gran riqueza de matices... felicidad, asco, amor, ansiedad, ira o incluso impulso a comer o a beber. Lo cual no deja de ser idéntico patrón en el proceso normal de cualquier sentido exteroceptivo como puede ser la vista: llega un fotón que activa una cadena de reacciones que pone en funcionamiento la corteza visual que tras sucesivas carambolas neuronales -las “emociones”- nos producen la percepción -los “sentimiento”-, las cualías del color.^[5] Podemos imaginar cómo llega a nuestro cerebro el dato de la visión de una araña próxima, imagen que activa estructuras neuronales emocionales como la amígdala, la

cual manda instrucciones en una primera carambola al hipotálamo para que regule el flujo hormonal que acelere el ritmo cardíaco; que ajuste la atención hacia la posible amenaza; que erice los pelos en señal de contraamenaza nuestra; que fije también la atención de nuestro pensamiento en la araña dentro de una dinámica de razonamientos rápidos... una serie de cambios en nuestro cuerpo que son detectados por nuestra instrumentación interna, visceral, la cual envía la información de vuelta al cerebro, hacia cortezas cerebrales específicas -ya hablamos más arriba que serían las somatosensoriales, en particular la conocida como **ínsula**- que saben lo que hacer con ella... a fin de cuenta construir mapas neuronales de la situación para su uso en los procesos de respuesta o planificación motora ante la amenaza. Y todo ello bajo la aparición emergente de un sentimiento que podemos llamar miedo.^[6]

Pero ¿qué es todo esto último que acabamos de describir? Sin lugar a dudas la base de la consciencia. Estos mapas sentidos de estados corporales son a fin de cuentas el reflejo de nuestro “yo”. Y las cualia que se nos propone no son más que el coloreado, el semáforo avisador, del matiz premio castigo que incorpora la emoción-sentimiento adscrito a cada mapa de estado corporal en relación a un mapa de estado exterior -araña- o interior -poca agua, sed-. Con ello tenemos las herramientas precisas para razonar, comparar, planificar, imaginar y hacer. Tenemos la base de nuestra consciencia.^[7]

Acabo aquí con esta digresión de matiz neuronal-psicológico que he introducido como una cuña final en el capítulo ya que era de obligado cumplimiento por lo que me parece extremadamente revelador de nuestra condición humana -y no me arrepiento al usar el adjetivo “extremadamente” que puede parecer superlativo-. Con todo lo dicho en este capítulo creo que tenemos información suficiente como para plantearnos de nuevo la pregunta que es nuestro hilo conductor: “Lo que sentimos como real en nuestras vísceras, lo que nos cuenta del hambre, la sed o la angustia, ¿es algo real que pinta y condiciona la existencia diaria de nuestros órganos internos?”. A estas alturas de la serie ya podemos imaginar y saber que el cerebro, a partir de unos mismos cuantos de información, los potenciales de acción, inventa y

construye su propia “música” dependiendo de a cuál de sus teclas ha llegado la presión de sus complejos procesos. Misterioso.

En el siguiente capítulo me enfocaré en consideraciones que emanan de este misterio, en planteamientos sin respuesta que me sugiere el mundo de nuestras percepciones sensoriales, los cualias, intentando intercambiar con los lectores un interés por las dudas planteadas e intentando despertar en ellos una sabia curiosidad que me pueda realimentar.

NOTAS DEL CAPÍTULO 17:

1. Para un mayor detalle acerca del tema recomiendo la lectura del libro “*En busca de Spinoza*”, del neurólogo y Premio Príncipe de Asturias Antonio Damasio.
2. Aquí *archi* proviene de la raíz griega “*αρχειν*” significa ser el “primero”, el “antiguo”.
3. Los segmentos corporales son las unidades de la particular y ancestral arquitectura modular del organismo de la mayoría de animales. Para más información, podéis leer la entrada 24 de la serie “*La Biografía de la Vida*” publicada en el blog de “*El Cedazo*”:

[<http://eltamiz.com/elcedazo/2014/02/15/la-biografia-de-la-vida-24-dos-nuevas-habilidades-bilateralidad-y-segmentacion/>]

4. Podéis releer el capítulo 03 en el que hablábamos de la corteza cerebral.
5. He escrito entrecomilladas las palabras emoción y sentimiento - aunque no son las exactamente adecuadas-para hacer una analogía del proceso de percepción de algo externo con el de la percepción interoceptiva.
6. Se teoriza con que los sentimientos que son procesados por la ínsula van desde reacciones básicas tales como el hambre, la ansiedad o el asco, hasta sentimientos más complejos como lo es el rechazo social.
7. Remito de nuevo a lo dicho en la anterior nota 1.

18: Más allá de los cualia

“Podemos afirmar que nada existe; si algo existiera, no podemos llegar a conocerlo, y si fuera de alguna manera posible conocerlo, no podríamos explicarlo a nadie.”

Tesis del filósofo sofista de la Magna Grecia (Sicilia) Gorgias de Leontinos (siglo V-IV a.C.)

“Sabemos también que nuestra conciencia propia es, en un sentido profundo, todo lo que hay. La cúpula celeste y los centenares de cosas visibles que se encuentran bajo ella, incluido el cerebro -el mundo, en definitiva- existen, para cada uno de nosotros, sólo como parte de nuestra conciencia, y desaparecen con ella.”

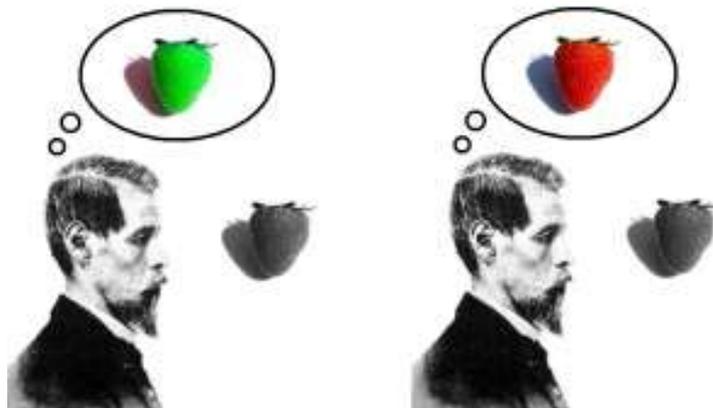
Gerald M. Edelman, Premio Nobel de Fisiología o Medicina (1972), en su libro “El Universo de la Consciencia”.

Bien amigos, llegamos al final del camino tras habernos asomado a lo largo de los capítulos anteriores al interior del sistema nervioso y haber paseado por sus habitaciones abiertas al exterior: las de los sentidos. En el último capítulo lo hicimos con el sentido de la interocepción. Creo que hemos conseguido afianzarnos en la idea, en base a haberla repetido una y otra vez, de que todo lo que percibimos como una realidad externa es realmente una invención de nuestro cerebro. Aunque quizás suene mejor el decir que es la propuesta vital de este gran núcleo de neuronas para que podamos mantener el equilibrio homeostático y pasearnos por la vida sin demasiados problemas. ¿Pudiera ser mejor? Quizás sí, pero nuestras laboriosas neuronas son como las hormigas... laboriosas y simplemente, de *simple*, eficaces. Nuestro genoma nos dice “X años”, y en esto está nuestro organismo.

Es bueno para nuestra supervivencia poder apreciar un cuerpo sólido cuando nos paseamos por la Selva de Oza en la española región de

Aragón. Es bueno también el oír el cascabeleo de la serpiente mientras no nos queda más remedio que atravesar el desierto de Arizona. Casi igual de bueno es el poder oler el “perfume” añadido al gas natural que hace borbotear a nuestras cocinas, o el sentir rápidamente sobre nuestro dedo el filo del cuchillo con el que nos preparamos unas patatas. O el experimentar la sed, la fatiga, el vértigo o el dolor por el fuego. Nuestras percepciones concretas... y bien concretas, las tangibles del exterior y las abstractas del interior. Son nuestros sistemas de alerta en la conducción por la vida.

¡PERO! ... no lo veo tan fácil, siento una inquietud existencial... es más, es algo así como una duda copernicana al respecto. De aquí que no me va a extrañar si algún valiente que culmine la lectura de los párrafos siguientes llegue al convencimiento de que el autor lamentablemente ha entrado en un estado de “demencia” filosófica... pido disculpas y ayuda... toda opinión será bienvenida. Pero sigamos.



¡Vaya lío con los cualia! (Imagen de la red, fair use)

A lo largo de los capítulos anteriores, mientras desgranábamos sentido a sentido el rosario de los que creemos tener, hemos visto que todo es bastante sencillo: un agente exterior se hace presente, un sensor lo detecta e inicia una cadena de potenciales de acción, unas vías neuronales exclusivas para cada tipo de percepción los vehicula hacia estancias superiores del sistema nervioso, en donde son procesados -y no hemos dicho cómo- para al final, misteriosamente, dar a luz a todas y cada una de nuestras percepciones sensoriales.

Mismos potenciales, distintas percepciones. Curioso. Sí... es curioso que, con los mismos datos, unas células idénticas interpreten cosas distintas según sea la escasamente definida oficina cerebral de gestión. ¿Será verdad que el cerebro se lo inventa todo?

Sin embargo, el misterio se me hace inconmensurable si miro hacia afuera usando mis sentidos exteroceptivos; si analizo cuáles son los agentes externos que traen la materia prima para la confección de mis cualia tan míos. Copio de la Wikipedia: “*Los cualia son las cualidades **subjetivas** de las experiencias individuales. Por ejemplo, la rojez de lo rojo, o lo doloroso del dolor*”.

¿Cuáles son los cualia de la vista? La intensidad de la luz, el color, las texturas... aunque además se nos informe de la posición, o del movimiento o de las formas... En cualquier caso, y desde un punto de vista objetivo, luz, color, textura, movimiento, formas... son lo mismo: el resultado de procesar la información de unos cuantos fotones que “vienen” de fuera. Entrecomillo *vienen* porque realmente no sabemos si vienen, están o son explosiones energéticas locales y transitorias.

¿Cuáles son los cualia de la audición? Los sonidos, los tonos, el timbre, la prosodia agradable o no de las armonías y acordes... Pero realmente ¿qué es todo esto? El resultado de procesar el patrón de empujones electromagnéticos que sobre la membrana de MI tímpano aplica el aire que se encuentra junto a MI oído externo.

¿Y cuáles los del tacto? Resultados de otra serie de interferencias electromagnéticas entre los electrones de nuestros tejidos epiteliales y los de los cuerpos que se ponen en contacto con nosotros y nos empujan, retuercen, o simplemente rozan.

¿Qué diremos del gusto o del olfato, un par de sentidos quimiosensitivos? Ciertas moléculas químicas encajadas en ciertas proteínas como una mano en un guante, que actúan como espoletas iniciadoras de otros ajetreos moleculares e iónicos ¿Afinidad espontánea? No. Resultado de afinidades químicas monitorizadas por las fuerzas intermoleculares, que no dejan de ser más que otra jugada electromagnética.

Vamos observando sentido a sentido del abanico de los que reciben los estímulos de origen exterior, y no nos queda más remedio que llegar a conclusiones parecidas. Afuera no hay algo que se llama *objetos vistos*, ni *sonidos*, ni *caricias*, ni *olores*, ni *sabores*, ni *dolor*, ni *temperatura*.

Entonces ¿qué es lo que hay ahí afuera? ¿Qué es eso con lo que interactúa nuestra más elemental física y química orgánica? Sabemos del gran vacío de la materia, donde el minúsculo electrón, diez mil veces más pequeño que el núcleo del átomo, se pierde aún diez mil veces más si se compara con el tamaño del átomo completo. Sabemos de la gran incertidumbre de la materia, de la que la cuántica nos dice que todo, cualquier cosa que nos imaginemos tiene una cierta probabilidad de ser “posible”. Sabemos también, gracias a la genialidad de don Alberto, que eso de la materia no es siquiera eso, materia, sino pura energía. Y lo más impresionante, ¿alguien es capaz de saber qué es eso de la energía? Porque la muy esquivada sólo se manifiesta a través de lo que suponemos son sus efectos. En física, «energía» se define como la capacidad para realizar un trabajo. Con esta sutileza evanescente nos ventilamos lo que parece el Todo, la Energía. Y parece que se comporta monolíticamente, como si en su conjunto fuera constante, irremisible consecuencia, parece ser, de que lo que pasa en nuestro Universo es invariante con respecto a la traslación en el tiempo, los sucesos siguen los mismos patrones pasen hoy, ayer o mañana.^[1] ¿No parecen una locura las nieblas de la omnipresente energía?

Sí, efectivamente, de la energía sólo notamos sus efectos, gestionados por sus agentes favoritos, las cuatro fuerzas fundamentales de la física. Como si estuviéramos en la caverna de Platón viendo las luces y sombras que proyecta. Pero no estamos solos: las matemáticas son nuestro gran órgano sensorial hacia la nebulosa filosófica del Algo. Por ahora no tenemos más que esta herramienta tan abstracta y lógica. Y las matemáticas parece que nos dicen que la realidad es simplemente un juego de contrastes y de los efectos que producen estos contrastes.

Piso de nuevo el suelo al pensar en un ejemplo. El mundo es sólido al tacto porque hay unos electrones en los átomos de nuestros dedos

y en los de “lo tocado”, con una cualidad interna y misteriosa, la carga eléctrica, de la que sabemos casi solamente que se rechazan si son del mismo signo y se atraen si son del contrario ¿Qué experimentamos? ¿La sensación “sólido” o la reacción de repulsión entre lo mío y el objeto que toco, provocado por el campo electrónico? ¿Hay un contraste entre las cargas que se resuelve con un fotón que informa? Pero... ¿qué son las cargas sino el resultado de la imposición de la conservación de una cierta simetría -una más- “interna” y misteriosa que nos conduce, otra vez de cajón, a que hay una cualidad “carga” que poseen ciertas partículas?^[2]

Y ya puestos, ¿qué es una partícula fundamental? ¿Qué es un electrón negativo, sino tan sólo la excitación puntual y matemática de un campo cuántico que podemos llamar electrónico y que, generalizando para el mundo de las partículas, el resultado es que se comportan como si tuvieran una determinada masa, una determinada carga, un determinado espín y se pueden propagar por el espacio-tiempo? Y lo mismo podemos decir al ver cómo un núcleo atómico milagrosamente no se desintegra estando como está lleno de partículas con carga positiva, los protones, o cómo hay partículas que misteriosamente sí se desintegran emitiendo otras de otro tipo. O la asombrosa, a pesar de lo natural, aventura que vivimos cuando nos tiramos de cabeza a la piscina, cayendo gracias a una deformación del espacio-tiempo producida por la masa-energía de nuestro planeta Tierra. Por cierto... suponemos que mi energía-materia se entera gracias a la excitación de un campo cuántico gravitatorio al que le gusta jugar al toma y daca del gravitón entre mi cuerpo y la gran masa de la Tierra.

Parece que existimos como entes resultado de un mundo relacional más allá de lo tangible. ¿Es un mundo vacío? ¿Es todo y sólo el efecto de una pura acción-reacción de unas fuerzas fundamentales que parecen regir nuestro Cosmos y que se nos han revelado gracias a las matemáticas y al poder del razonamiento que se apoya en la consciencia que gestiona el yo?

Y aún se me ocurre una idea que puede parecer más loca. Si eso es lo que me parece mi exterior y mi cuerpo, apoyándome en el Yo que siento como propio ¿cómo no pensar que el que pasea junto a mí por

la calle no “experimenta” el mismo vértigo existencial? Vértigo por el que el Otro también me debe experimentar como parte de su mundo relacional “más allá de lo tangible”, al igual que lo que representa él para mí. Lo que me hace pensar que igual no existo como entidad real más allá de ser una función de estado que colapsa gracias a la Consciencia que emerge de dicho estado onda-partícula, energía-materia ¿Es mi vecino de paseo, tal como el de más allá o el otro, el resultado de un proceso semejante? ¿Somos simplemente una ilusión que emerge de la arquitectura espacio-temporal de un Todo^[3] energético?

No me atrevo a más. Para mí es suficiente misterio. Mi “materialidad” no me permite imaginar lo que pueda ser la realidad: ¿podiera ser que la física que parece regir nuestro cerebro lo sobrepase de tal forma que por mucho que evolucione nunca la va a entender? Posiblemente, siendo parte de la explicación, nunca llegemos a ella. Y aun diciendo eso, ¿y qué? Hace cuatro mil millones de años nuestra consciencia estaba en el limbo de los “futuribles”, no había nada que se le pareciese en nuestro planeta y, sin embargo, lo que está ahora ahí afuera, sea lo que sea, ya existía ¿Hay realmente algo o sólo hay una ficción matemática? Hay gente que cree en esto último. ¿Somos quizá la pequeña diversión de un informático “celestial”? También hay gente que lo postula. Sólo sé que, ¡gracias a los cielos!, mi *simple* cerebro me lo pone fácil para vivir día a día.

Y con este capítulo, que no sé si se asemeja más a una fanfarria de opereta o a un castillo de fuegos artificiales chinos, o quizás a una estéril hemorragia mental, doy por concluido el libro, aunque todavía quedan por publicar un par de Anexos relacionados con ella. Espero que, a pesar del necesario discurrir por la anatomía neuronal que se os ha podido hacer tremendamente duro, os haya despertado la misma inquietud que a mí me tiene desconcertado: ¿es todo un sinsentido? La verdad es que no lo sé ni creo que nadie lo sepa nunca. Pero, y por supuesto es mi opinión subjetiva, no queda más remedio que ponerse de frente ante este tipo de realidades y conjeturas que bordean lo nebuloso, al igual que lo exigen otras de parecida categoría filosófica y vital. Es algo absolutamente necesario para mejorar como seres humanos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 18:

1. Realmente interesante y asequible esta entrada del blog “*Cuentos Cuánticos*” sobre la gran física que fue Emmy Noether.

[<https://cuentos-cuanticos.com/2016/02/11/emmy-noether-la-mujer-que-nos-enseno-a-repensar-la-fisica-womeninsteam/>]

2. Realmente eso de la carga eléctrica y su conservación -hay igual número de positivas que de negativas- huele también al teorema de doña Noether y a la conservación de extrañas simetrías internas de las partículas. Espero que os haya servido la recomendación de la nota anterior.
3. Tengo que aclarar que este Todo con mayúscula es absolutamente laico y existencial, LO que existe.

Anexo I: El GPS biológico. Sentido de orientación

A modo de introducción

He estado dándole muchas vueltas acerca de si procedía hablar del siguiente tema o no, y de si encajaba en la materia de este libro acerca de “*Los sistemas receptores*”. Estoy hablando de la conveniencia o no de analizar el sistema neural mediante el que los animales nos ubicamos en el espacio y con el que guiamos nuestros movimientos, lo que comúnmente suele llamarse el *GPS cerebral*. Estoy hablando de si entra de lleno o sólo de refilón en el conjunto de los “sentidos” que hemos desgranado a lo largo de la serie que dimos por finalizada en el capítulo anterior. Porque si fuera correcta la idea, por qué no hablar también del reconocimiento facial^[1] o, en un sentido más general, del reconocimiento “semántico”^[2] de nuestro entorno. ¿No son también esos procesos unos generadores de percepciones o sensaciones que nos ayudan, al igual que los sentidos “convencionales”, a navegar manteniendo el precario, aunque normalmente duradero, equilibrio vital de nuestro organismo?

A lo mejor es ese sutil matiz, o quizás un personal impulso emocional surgido de la sorpresa que me producen esos especializados programas cerebrales, lo que me ha convencido. Por eso en este capítulo voy a hablar, dentro de la premisa fundacional de nuestro blog “*El Cedazo*”^[3] de *ser sencillo antes que incomprensible*, acerca del sistema interno posicionador de nuestro organismo en el espacio. Es decir, nuestra brújula de navegar.

El “sentido” de la orientación

Todos estamos habituados al concepto que incorpora la palabra GPS.^[4] Tanto que ya es parte indispensable de nuestra tecnología vital -como el móvil, internet o el escáner médico por citar otros

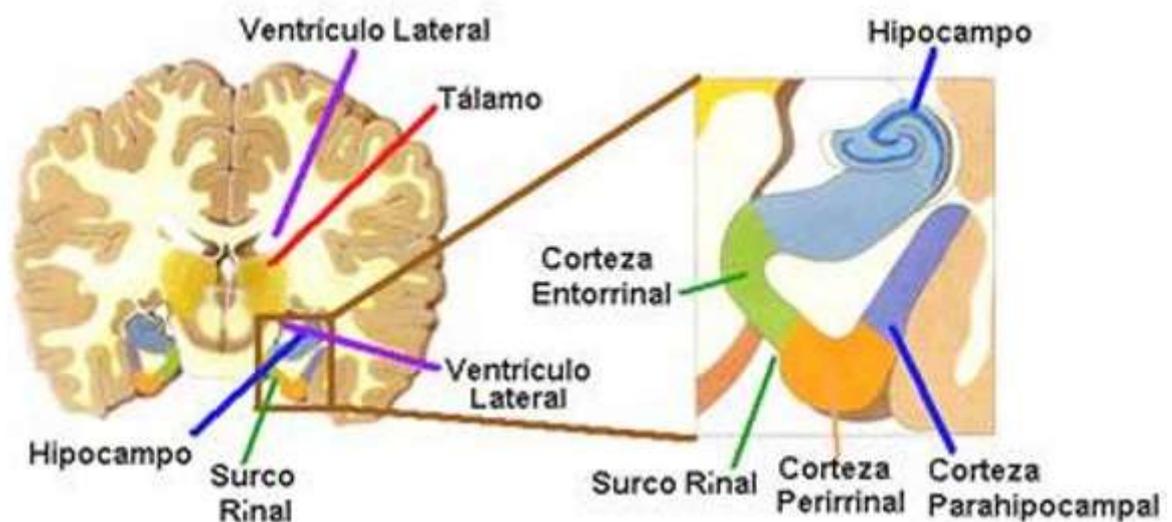
ejemplos- y que ya usamos casi sin ser conscientes de ello. Navegando en nuestros coches, o en un paseo apoyado en cualquier aplicación electrónica del tipo “*maps*”, o buscando la posición exacta y relacional cuando hacemos montañismo fuera de ruta...

Nuestro gran amigo GPS nos dirá sobre un mapa físico de nuestro entorno dónde nos encontramos, de dónde venimos, la dirección y distancia “de” y “a” nuestro destino, cuánto hemos navegado y cuánto tiempo estima que lo tenemos que hacer aún. Incluso nos permite rescatar nuestras experiencias pasadas, que serán un valor más para la ayuda. Cualquier mente no especialmente habilidosa es capaz de moverse por el mundo gracias a sus indicaciones. Todo resumido en un mapa o plano, la posición personal (X, Y), un compás que orienta el conjunto con respecto a un punto fijo arbitrario y universal -como hace una brújula-, un calculador de distancias y un reloj interno, que permite hacernos una idea más sofisticada de nuestra dinámica de marcha y que nos permite planificar futuro a base de datos del pasado.

Si lo pensamos bien, eso es la vida misma: hay que buscar alimento, hay que huir de predadores, hay que encontrar pareja con la que generar descendencia o hay que averiguar dónde hay un lugar seguro. Somos animales, y nuestra característica fundamental es que nuestras estrategias vitales, al contrario de lo que pasa con las plantas, se apoyan en el movimiento: un invento y producto de millones de años de evolución. Por eso quizás sea incluso esperable el encontrar en los animales un sistema de navegación, ya que los que no lo desarrollaron tuvieron más problemas para sobrevivir. De hecho, hoy no nos acompañan sus descendientes y quizás, en parte, sea por eso. Pero sí, es sorprendente, al menos para mí, el que este sistema de navegación biológico sea tan semejante en sus rutinas a lo que nuestra tecnología ha construido en forma de GPS. En nuestro cerebro hay mapas locales generales y particulares, hay brújulas, hay medidores de distancias y velocidades e incluso, aunque no sepamos muy bien cómo sucede, integradores de toda la información que nos dan las pautas de decisiones en el movimiento. El resultado es una especie de cualia sensorial,^[5] un saber interno acerca de nuestra posición en el espacio,

un sentirnos “orientados”, sentimiento cuya intensidad varía de uno a otro ser humano.

Aunque la circuitería y la lógica se encuentran repartidas por el cerebro, la “almendra” del sistema está situado casi completamente sobre nuestras fosas nasales, en las cortezas de antigua filogenia conocidas con el nombre de corteza entorrinal e hipocampo. Podríamos considerar que la primera se comporta algo así como ser la puerta de entrada y generadora de información de base para la orientación, mientras que el hipocampo es el procesador de datos que fabrica los mapas y las memorias espaciales. Os propongo una imagen para que os “orientéis” en el lugar físico donde se encuentran las anteriores cortezas cerebrales.



Esto es la imagen artística de un corte vertical del cerebro, más o menos por su parte central, por delante de las orejas, en el que se puede observar las posiciones de las cortezas entorrinales y del hipocampo (Imagen de Neurología Contemporánea, CC BY-SA 4.0)

En estas cortezas encontramos neuronas que desarrollan, según su tipo, las siguientes funciones:

1. Generación de un mapa de nuestro entorno gracias a las “**células - neuronas- de red**” situadas en la corteza entorrinal.
2. Determinación de una dirección “especial” -tipo el norte de la brújula- que nos permite fijar la orientación de nuestro mapa. Esto lo

realizan las “**células de dirección de la cabeza**” situadas en el “subiculum”, una zona cortical entre la entorrinal y el hipocampo.

3. Determinación de algo semejante a “*distancias a*”, “*dimensiones de*” o “*límites de*” gracias a las “**células de límite**”, también en la corteza entorrinal.

4. Determinación de la dinámica de nuestro movimiento gracias a las “**células de velocidad**” de la corteza entorrinal.

5. Identificación de nuestro posicionamiento particular en el espacio gracias a las “**células de lugar**” situadas en el hipocampo.

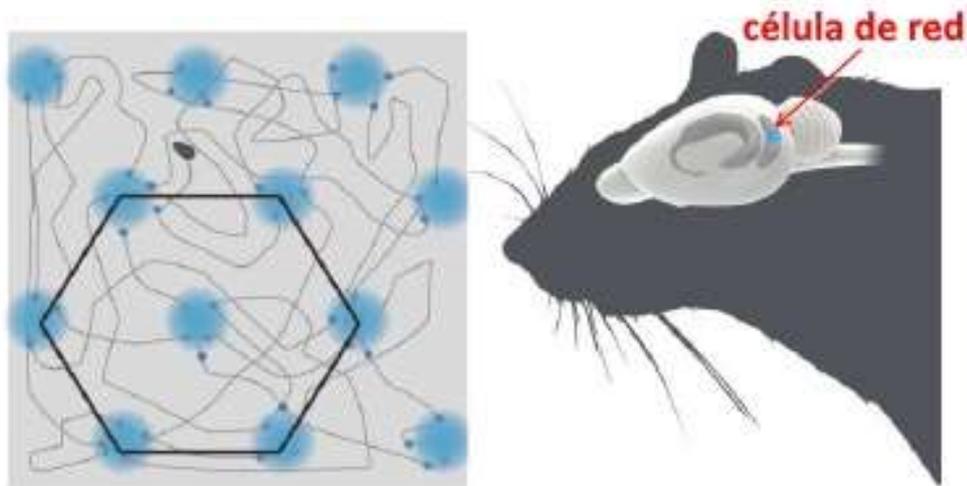
Veamos cómo actúan cada una de estas neuronas.

Células de red

Las células de red son unas neuronas que se activan -disparan sus potenciales de acción- cuando un individuo está sobre un lugar específico del entorno. Pero no hay solamente un punto (X, Y) característico para cada una de ellas, sino que se activan también cuando el individuo se ha desplazado hasta otros puntos distintos, que generalmente dibujan en el plano un hexágono o un triángulo equilátero con una clara orientación espacial. Por lo que el conjunto de estas neuronas genera una cuadrícula, una malla, directamente relacionada con el entorno, un preciso mapa conocido como “**mapa de red**”, en donde están establecidas claramente las coordenadas de cada uno de sus puntos.

Como ya se ha dicho, las células de red se encuentran en la corteza entorrinal. En cada uno de sus correlativos módulos neuronales codificadores de red la respuesta en el tamaño de las cuadrículas que dibujan es diferente, de forma que según su posición anatómica, producen una información más o menos fina: los que se encuentran en la parte superior, la más exterior de la corteza, dibujan una malla más fina, mientras que los que se encuentran en posición inferior, más interiores, la dibujan más gruesa. Con la curiosidad de que entre una y otra consecutiva el paso de red está relacionado en un factor de raíz de dos. Esta particular codificación favorece una eficaz y efectiva

determinación de la posición del individuo, ya que podemos suponer por ejemplo que si en el momento vivencial no se exige mucho detalle bastará con utilizar la información de malla ancha. Y lo contrario si la precisión en la posición es vital. A eso se le llama optimizar los recursos.



Las células de red se sitúan en la corteza entorrinal. Una simple célula de red se activa cuando el animal llega a varias localizaciones específicas del entorno con la particularidad de que conforman una red hexagonal (Imagen de Ole Kiehn, extraída del artículo^[6] “The brain’s navigational place and grid cells system”, fair use)

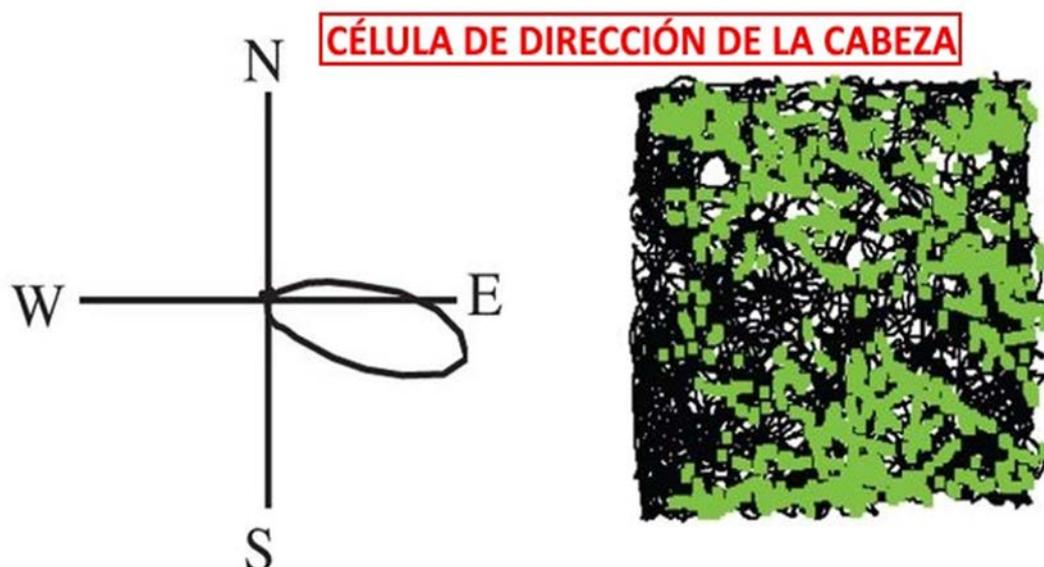
Estos patrones de red se generan casi inmediatamente en cuanto se entra en un nuevo entorno y normalmente **se mantienen estables**. Tan estable es que cuando el individuo accede a un ambiente completamente diferente las células de red mantienen el espaciamiento de la red. Es decir, se activan cuando el individuo se sitúa en posiciones análogas a las de la dinámica de construcción del mapa del ambiente donde estuvo antes, a la vez que las redes de las células vecinas mantienen sus desplazamientos relativos. Esto nos permite pensar que los procedimientos y mapas creados en la corteza entorrinal tienen la gran propiedad de ser de uso general.

Ya tenemos un mapa topográfico. Ahora hay que poner sobre él otro tipo de información, ahora sí más específica, del individuo y el entorno, y orientarse. Veamos cómo sucede esto último.

Células de dirección de la cabeza

Ahí entran las células de dirección de la cabeza. Alguien nos tiene que decir cuál es la orientación del mapa reticulado dibujado en nuestra corteza entorrinal en relación con nuestro entorno, porque si no sería una milagrosa casualidad el que encontráramos en él la ruta adecuada a nuestras necesidades y previsiones.

Las neuronas de dirección de la cabeza tienen la particular propiedad de que se activan cuando la cabeza se encuentra dirigida hacia una dirección específica del entorno en el plano horizontal del individuo. Cada neurona, o grupo de ellas, está especializada en una dirección del compás de navegar. Y lo hacen según un marco en el que los puntos de referencia pueden ser distantes y donde, independientemente de la ubicación o dinámica del individuo, se fijan las coordenadas en relación a diferentes puntos u objetos del ambiente exterior.



(Esta figura y la siguiente: de Tom Hartley, a partir del artículo "Space in the brain: how the hippocampal formation supports spatial cognition", fair use)

En la figura anterior podemos ver el resultado típico en una prueba con ratas cuando se monitorea la actividad de una *neurona de dirección de la cabeza*. En negros y verdes, el campo de juego por donde se ha movido el animal, la errática línea negra, y en verde los lugares donde se ha activado la neurona que se estudiaba. En el diagrama de coordenadas se indica el resultado estadístico de las direcciones preferentes de la cabeza cuando disparaba la neurona en estudio.

Esta brújula biológica, que no depende en absoluto del campo magnético terrestre, trabaja fundamentalmente con base en la información visual -aunque también funciona eficientemente en la oscuridad- y la información de posicionamiento propuesta por el sistema vestibular.^[8]

Células de límite

Estas neuronas, que se encuentran cerca de las neuronas de red, nos ayudan a dibujar un poco más las características del entorno definido por el mapa neural que triangula el entorno. Es así porque se activan con preferencia cuando el individuo en su deambular se encuentra a una particular distancia y dirección de los límites geométricos físicos -por ejemplo un obstáculo- de ese entorno.



Parece que calculan la distancia que separa al individuo del último obstáculo que se ha encontrado, información que utilizan las

neuronas de red para grabar el dato como punto de referencia. Ello nos permite imaginar que son las encargadas de dibujar la posición y forma de los diversos objetos situados en el campo del mapa, y así da la impresión de que completan su dibujo.

En la figura anterior podemos analizar la respuesta de una **célula de límite** durante una prueba con una rata. Al igual que dijimos para las células de dirección de la cabeza, la errática línea negra es la pista del desplazamiento del animal, sobre la que se ha superimpreso en verde los lugares donde dispara la neurona. A su lado el esquema de colores que representa el campo físico del experimento, en donde el límite - un obstáculo o un borde del campo- está definido por un objeto representado en blanco, mientras que con un código de gradiente de colores (máximo en rojo, nulo en azul oscuro) se indica la intensidad local de los patrones de disparo de la célula de límite.

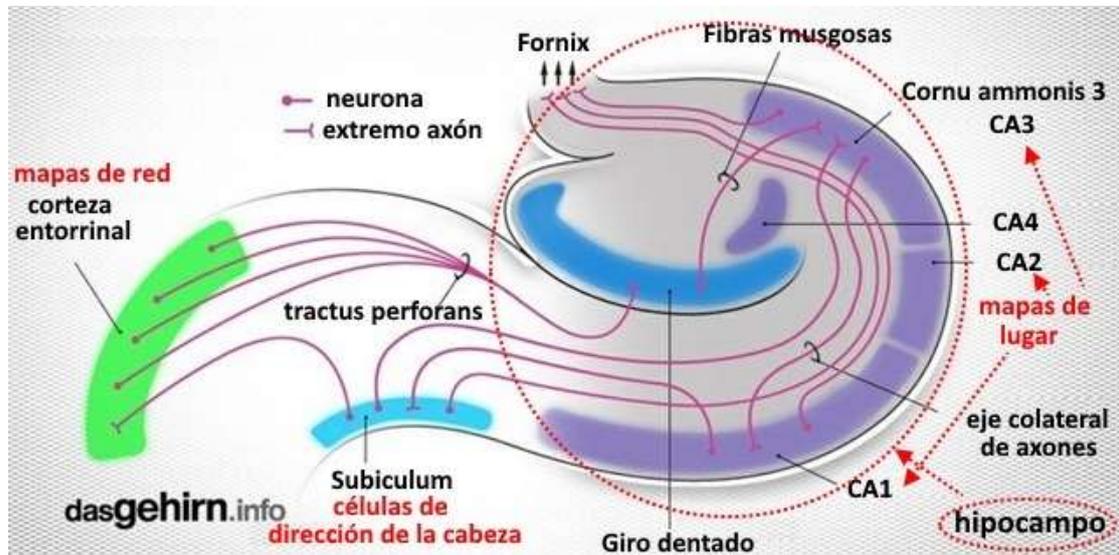
Células de velocidad

Estas neuronas, situadas también en la corteza entorrinal, se activan en respuesta a las variaciones de velocidad del individuo, y parece claro que esta actividad no responde a factores externos tales como el aspecto visual del entorno. Pero lo más curioso es que la codificación de la velocidad, que luego se propondrá instantáneamente a las células de red, se hace con una cierta anticipación a la acción motora, de forma que realmente codifica la velocidad que se va a tener al cabo de unos instantes.^[9] Con esa información y la que proponen las células de dirección de la cabeza, las células de red calculan la localización del individuo en el mapa cognitivo.

Células de lugar

Ya tenemos un mapa de nuestro entorno, en donde hemos podido dibujar lo que allí se encuentra y donde, gracias a los suficientes datos obtenidos por otros subsistemas, quizás pudiéramos obtener nuestra posición y la orientación precisa que nos permita un deambular “saludable” por nuestro medio ambiente. Algo habrá que hacer con esa rica información que va a pasar desde la corteza entorrinal hacia el hipocampo, de acuerdo a la red de axones esquematizados en la

figura de más abajo, en donde serán integradas para generar el producto final del GPS biológico que nos va a proponer qué es lo que hay a nuestro alrededor, cómo se relacionan espacialmente las cosas que me rodean y dónde me encuentro y me muevo en relación a esas cosas y en relación con el entorno que las contiene.



La información generada por neuronas de la corteza entorrinal - mapas de red, límites y velocidad- se transmiten por el tractus perforans al giro dentado del hipocampo, para más tarde pasar a las áreas de generación de mapas de lugar en las zonas CA1, 2 y 3, también del hipocampo. Estas mismas áreas CA son informadas de la actividad de las células de posicionamiento situadas en el subiculum. Generada la integración de toda esta información se envía el resultado del procesamiento de la orientación, a través del fórnix, hasta otros núcleos y cortezas cerebrales en donde se llevarán a cabo integraciones más complejas (Imagen a partir de dasGehirn.info, CC BY-NC 3.0 DE)

De la tarea se van a encargar las células de lugar situadas en la última corteza, el hipocampo, que se halla escondida en la parte interna del lóbulo temporal. Su activación es muy parecida a la que les sucedía a las células de red, con la característica singular de que las de lugar sólo disparan sus potenciales de acción cuando el individuo se aproxima y pasa sobre uno y sólo un punto determinado del entorno.^[10] Cada vez que el individuo cambia de posición dentro de

un mismo ambiente se activa una neurona de lugar distinta, por lo que con ello pensamos que se genera un patrón neural que representa un mapa de posiciones repartidas por el área de movimiento, un “**mapa de lugar**” que no depende en absoluto de referencias internas del organismo sino de “pistas” espaciales, visuales u olfativas del entorno local, y parece que cuanto más lejanas, mejor. Todo eso sucede de forma muy rápida desde el primer momento en que el individuo entra por primera vez en un ambiente nuevo. Es decir, las neuronas de lugar, tras un breve periodo de acoplamiento, se especializan en una zona puntual concreta del entorno, incluso sin necesidad de que el individuo se haya posicionado alguna vez sobre ella. Habrá que suponer que la memoria u otras entradas sensoriales puedan ser la causa de ese automatismo.



Representación del disparo de neuronas de red y de lugar mientras se estaba realizando un test de laboratorio con un ratón (Imagen a partir de Investigación y Ciencia, marzo 2016, fair use)

Esos mapas sobre nuestras ubicaciones espaciales podrían asemejarse a los que generan las células de red, pero con la particularidad de **que ahora en el hipocampo no se dibuja una retícula, sino un campo**

de posiciones puntuales. Evidentemente los procesos se generan en distintas estructuras de la arquitectura cerebral, aunque debemos suponer la existencia de algún módulo de integración de orden superior que superponga la información de ambos tipos de mapa, el topográfico de orientación y contenidos y el de “sensores” de posición.

Además los mapas de lugar presentan otra característica que los diferencia de los de red, ya que los mapas en la entorrinal, como dijimos más arriba, son casi inalterables -las neuronas de red se activan en posiciones análogas sea cual sea el entorno- manteniéndose al cambiar de ambiente, mientras que **los mapas que se generan en el hipocampo son particulares y específicos para cada ambiente**, incluso si el cambio se concreta en cosas tan simples como un cambio de colorido de las paredes de la habitación donde nos situamos.

Como sucede en los mapas de red, en donde se fijaba el paso de malla con distinto tamaño según la capa de neuronas que los generaban, las áreas de sensibilidad de cada neurona de lugar -**los campos de lugar**- son más o menos grandes dependiendo del lugar en donde se generan dentro del hipocampo, variando según un gradiente desde los más pequeños en la zona dorsal CA3 hasta los mayores en la zona ventral CA1.^[11] Incluso en el ápice ventral -el extremo inferior- del hipocampo, dentro de CA1, hay una zona en donde se generan “campos de lugar” que cubren todo el entorno. Sin lugar a dudas ésta es una característica que tiene que mejorar la eficacia y efectividad de las operaciones asociadas llevadas a cabo en el hipocampo. Podemos pensar, por ejemplo, que ante una necesidad de posicionamiento global solamente trabaje la zona inferior de la corteza CA1.

Los mapas de lugar se generan rápidamente desde el primer momento en que el individuo entra por primera vez en un ambiente, y además presentan una característica importantísima, como es el que puedan irse almacenando varios en paralelo. El hipocampo es una corteza vital para el mantenimiento de memorias a medio y largo plazo, por

lo que esos mapas de lugar generados en gran medida por la información que viene desde la corteza entorrinal también crean un recuerdo, datos de lo que hay y sucede en el lugar representado por el mapa. En el hipocampo no sólo generamos las bases de nuestras habilidades para movernos por el espacio, sino que en él parecen constituirse algo así como flashes de memoria autobiográfica dispuesta a ser utilizada para nuestras remembranzas del pasado y planificaciones de futuro.

Final

Espero que lo escrito haya sido lo suficientemente claro como para que nos hayamos dado cuenta de cómo la evolución nos ha regalado con un magnífico sistema de navegación por los distintos escenarios de nuestras vidas. La semejanza de las estructuras del hipocampo y de la corteza entorrinal en todos los mamíferos, incluso la existencia de formaciones neurales semejantes al hipocampo en animales no mamíferos, parece sugerir que los sistemas de mapas de red y de lugar son sumamente robustos y que provienen de un lejano antepasado de los cordados.^[12]

Sin lugar a dudas nuestras habilidades de posicionamiento espacial no descansan exclusivamente en el comportamiento de las redes neurales explicadas. Las representaciones espaciales incorporan la acción de un amplio grupo de circuitos cerebrales, entre los que se encontrarían los dedicados a los sentidos en general,^[13] desde los más obvios de la vista o el olfato hasta el de propiocepción y vestibular, así como de la corteza parietal^[14] o algún núcleo de gestión de la intención motora como resulta ser el núcleo estriado, una parte de los ganglios basales situados en lo más profundo del encéfalo.

No obstante este optimismo por las asombrosas habilidades de nuestros organismos, tengo que decir que todavía sabemos muy poco acerca de cómo se realimentan los distintos módulos del proceso explicado, realimentación de donde emergerá una representación coherente del posicionamiento, así como tampoco tenemos mucha idea de cómo se interrelacionan con el resto de gestores espaciales

del cerebro, especialmente en cómo afecta toda esta información a la hora de tomar decisiones sobre a dónde y por dónde movernos. Sin duda llegará el día en que esta nebulosa se nos descubra.

NOTAS DEL ANEXO I:

1. Con esto no me refiero a que una imagen más o menos ovalada, con dos botones superiores brillantes, una protuberancia central y otra abertura profunda horizontal inferior nos lleve de la mano a decir que es una cara. Me refiero a algo mucho más sutil, como es que en algún momento de la experiencia anterior nos surja como un rayo ¡Este es Juan Rulfo!
2. Aquí por semántica entiendo, como una extensión de lo que sucede con el lenguaje, la marca conceptual que el cerebro coloca a cualquier ente físico o mental que forma parte de nuestras vivencias. Sería un poco como en base a desmembrar los aspectos claves y universales de un objeto, correlacionarlos para dar a luz el “saber” de qué categoría de objeto se trata: claramente un concepto “nube” y no un concepto “copo de algodón”.
3. El blog “*El Cedazo*” es donde se han publicado todos los capítulos de este libro.
4. Digo bien *palabra*, pues está aceptada y definida en el “*Diccionario de la Lengua Española*” con el siguiente significado: “*Sistema que permite conocer la posición de un objeto o de una persona gracias a la recepción de señales emitidas por una red de satélites*”.
5. Aunque hemos hablado en esta serie largamente acerca del concepto *qualia*, incluyo aquí la definición que nos ofrece Wikipedia: “*Los qualia son las **cualidades subjetivas** de las experiencias individuales. Por ejemplo, la rojez de lo rojo, o lo doloroso del dolor. Simbolizan el vacío explicativo que se advierte ante la existencia de cualidades epifenómicas, (fenómeno secundario o derivado de otro fenómeno principal o determinante)*”

sujetas a la subjetividad de nuestra percepción y el sistema físico que llamamos cerebro. Las propiedades de las experiencias sensoriales son por definición no cognoscibles en la ausencia de la experiencia directa de ellas; como resultado, son también incomunicables.”

- 6.** Este interesante artículo de los neurocientíficos Ole Kiehn y Hans Forssberg se titula “*The Brain’s Navigational Place and Grid Cell System*”. Recomiendo también la lectura de otra publicación, “*El GPS del cerebro*”, aparecida en la revista “Investigación y Ciencia” de marzo de 2016. Este último artículo está escrito por May-Britt Moser y Edvard I. Moser que, junto con John M. O’Keefe, fueron galardonados con el Premio Nobel de Psicología o Medicina en 2014.
- 7.** O, mejor dicho, al revés: los navegadores tecnológicos imitan el funcionamiento de nuestro GPS cerebral.
- 8.** En los capítulos 07 y 08 se explica el sistema vestibular.
- 9.** El desfase puede ser del orden de los 60 milisegundos.
- 10.** Con más propiedad, cuando el individuo se encuentra dentro de un área donde se activa la sensibilidad de la neurona de lugar. Algo así como los campos receptores de las neuronas ganglionares de la retina de los que hablamos en el capítulo 10 dedicado al sentido de la vista.
- 11.** Esta nomenclatura CA corresponde a las iniciales de “*Cornu Ammonis*” -asta de carnero- que fue la primera denominación utilizada para el hipocampo. Con posterioridad se decidió que más que al cuerno espiral de un carnero, un corte radial del hipocampo se parecía más a un caballito de mar. De ahí su nombre definitivo, “*hippocampus*” que procede del griego: *ἵππος*, hippos = caballo, y *καμπος*, kampos = el monstruo marino Campe, una quimera con cuerpo de mujer, su mitad inferior de dragón y su cabello hecho de serpientes.

- 12.** Copio de Wikipedia: “*Los cordados (Chordata, del griego χορδωτά khordota*” con cuerda”) son un filo del reino animal caracterizado por la presencia de una cuerda dorsal o notocorda de células turgentes, tubo neural hueco en posición dorsal, hendiduras branquiales y cola, por lo menos en alguna fase del desarrollo embrionario... la mayoría pertenecientes al subfilo de los vertebrados...”, entre los que nos encontramos nosotros, los humanos.
- 13.** Y de eso hemos hablado largamente en este libro.
- 14.** Sobre todo la del hemisferio derecho, que parece gestionar nuestro sentido del propio Yo en el aquí y ahora.

Anexo II: Sentido de la propia identidad (Yo y consciencia)

Este segundo anexo del libro, que sin duda resultará *sui géneris* y quizás desubicado, surge espontáneamente como una necesidad vital de fijar mis ideas. Intuyo que mi identidad es lo que me eleva, me da consistencia al tan simple orden físico, que pudiera parecer tan desolador, con el que acabé en el último capítulo, el 18, donde filosofaba sobre las cualías.^[1] Porque de aquel trasfondo elemental de la existencia del Cosmos surge, aunque parece un imposible, la percepción de que evidentemente yo soy bastante más que el resultado de un mero juego de las leyes físicas más fundacionales. Realmente me percibo como una identidad personal, propiamente mía, desde cuya perspectiva soy el dueño de mi cuerpo, de lo que siento y de lo que percibo. Soy propietario de estas experiencias como también soy el propietario de las reacciones con las que las afronto. Como todos, a no ser que las patologías o los accidentes lo anulen, siento, me parece saber, que hay una entidad propia que me define, me da consistencia y me permite realizar mi existencia al interactuar con más o menos fortuna con lo que me rodea.

Como podéis imaginar me estoy refiriendo, quizás más que a un sentido, a un sentimiento, a un matiz personal sobre la idea de mi identidad, a un cualía^[2] personal que definimos como el sentido del Yo. Una realidad perceptiva más que emerge del mundo completo - como cerrado y autosuficiente para explicar sus fenómenos- de la biofísica, de donde la suma de sus partes ha construido algo más que lo que de esta suma se puede esperar: mi identidad, mi yo, la herramienta que me permite, con su presencia sentida, el navegar con ventaja por el mar de la supervivencia, de la homeostasis.

El *Yo es*, por tanto, *una propiedad emergente* a partir de nuestra actividad biológica más básica, que nos ha abierto un nuevo escenario

vital. Pero si aceptamos que emerge de nuestra física tendremos que suponer que hasta cierto punto deberá ser aprehensible desde la física, es decir, deberá ser explicable en base a la realidad material en que debe sustentarse. Hablé ya en alguna antigua entrada del blog “*El Cedazo*”,^[3] en la serie “*Biografía de lo humano*”, acerca de ello: de cómo pudo surgir la emergencia del Yo a partir de lo biológico y de cuál podría ser el sustrato neuronal que nos propone esta fantástica percepción. Lo cual me permite pensar, y no creo que abusando de un forzado calzador, que entra de lleno en la esencia de la presente serie sobre “*Los sistemas receptores*” y que, en consecuencia, pueda proceder el reiterar la línea argumental de lo allí dicho con la esperanza de que el paso del tiempo me pueda permitir ahora plantear una proposición más decantada, más clara y, en la medida de lo posible, más entendible. Lo que me obliga, agradablemente para mí, a renovar la manifestación de mi entusiasmo por las ideas de Antonio Damasio, afamado neurólogo portugués, Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica 2005, de quien proviene todo lo que va a seguir.



Antonio Damasio, el maestro (Wikimedia, CC BY-SA 2.0)

La exposición acerca del **Sentido de la Propia Identidad**^[4], del saber íntimo y personal del Yo, va a tener dos ámbitos. Uno, el primero, acerca de la teoría evolutiva sobre el amanecer del Yo y la Consciencia – ¡qué mayor cualia que el íntimo sentir de la propia consciencia! -. Otro, el segundo, en donde exponer los posibles elementos neuronales que explicarían la anterior cualia. Comenzamos.^[5]

Teoría evolutiva acerca del amanecer del Yo y la Consciencia

Se basa en dos ideas fundamentales. La primera es que los circuitos neuronales son capaces de conformarse de forma que pueden dibujar, con su arquitectura y pautas funcionales, a un “sosias” de lo que está pasando, tanto del propio organismo como de los objetos percibidos por los sentidos o evocados desde la memoria, y que pueden ser manejados por la propia circuitería neural del cerebro en cualquier momento. “Sosias” que se suelen nominar como **mapas neurales**. Al ser un resultado de la fisiología neuronal, podemos estudiarlos y conocerlos. De hecho, la moderna neurología sabe bastante acerca de ello.

La segunda idea fundamental es que estos mapas provocan unas **imágenes mentales**, y plausiblemente también otro tipo de mapas, que nos proporcionan la consciencia de lo que sucede a nuestro organismo y de cómo y por qué se ve afectado por el exterior - ¡Ajajá... por aquí hay algo punzante que me hace cerrar el ojo!-. Es decir, la base más elemental de nuestro pensamiento racional. La mala noticia es que no tenemos ni idea del cómo los mapas neuronales pasan a las imágenes mentales: el aún inconcluso problema de los cualia, lo que se conoce como el problema difícil, o duro, de la neurología. Problema del que la mayoría de los neurocientíficos no niegan el que haya una solución física real, del estilo de la circuitería encefálica que soporta a los mapas neurales.

Dicho esto, pasemos a presentar el esquema de la hipótesis sobre la emergencia evolutiva del Yo y la Consciencia. Lo voy a intentar hacer de la forma más esquemática posible.

En lógica evolutiva^[6] tenemos que pensar que, ante la realidad tangible de lo que le pasa al organismo y de lo que pasa en su frontera con el exterior, se iban implementando unos circuitos neuronales internos que replicaban lo que estaba sucediendo. Que podemos fácilmente imaginar cómo los patrones de conocimiento inconsciente interno, a disposición del organismo, de lo que iba viviendo. Tenía que ser así, pues era funcionalmente vital para mantener el equilibrio homeostático del individuo. Y lo mismo pasaría con los inconscientes y automáticos patrones de respuesta motriz.

El hecho de que el organismo sea un todo, sensación-reacción, haría que estos circuitos neuronales que reflejaban la “sabiduría” vital del cuerpo se fueran inevitablemente integrando, permitiendo el germinar algo así como el anclaje del cuerpo en su realidad, proporcionándole la base para una “sensación” de identidad, un **Yo elemental** y estable, afanado en los procesos vitales, sobre el que ya pudiera acomodarse el arranque de una sensación de consciencia automática y elemental,^[7] por la que, poco a poco, el individuo queda capacitado para sentir su unidad corporal y el imbricado carácter de las respuestas que este mismo cuerpo produce.

Y eso ya no es un Yo elemental y solitario, sino un **Yo nuclear**, central, que existe y es interactivo en el aquí y el ahora. Los *mapas neurales sensitivo-motores* que progresivamente se iban presentando en el escenario de la evolución permitieron una nueva complejidad, digamos que sofisticación, de los procesamientos neuronales. Junto con la progresiva evolución en los imprescindibles módulos neurales de **la atención** (sin atención, aún en los primeros niveles evolutivos - quizás puras reacciones químicas-, no hay supervivencia) *que enfocaba de una forma preferente aquellos mapas de la nueva experiencia*, mapas del objeto que interactúa con el organismo y los propios mapas de este organismo modificado, *fue posible la emergencia de imágenes mentales que iban a posibilitar la aparición*

de la sensación del “saber” (algunos le llaman “sensación de la sensación”) acerca de la existencia de un organismo personal en un mundo de objetos, de los que también “sabía”, con los que tenía una interrelación. “Saber” y “sabía” entrecomillados, ya que evidentemente en este momento evolutivo era un proceso real interno y proto-consciente del organismo. Una **consciencia nuclear y central** del cuerpo en el aquí y ahora, y por tanto instantánea y no aprehensible; se trataría más de una pieza del Lego vivencial que de una herramienta para una gestión vital más compleja. Como en un bullir de fotogramas momentáneos, está ahí, pero al igual que aparece, instantáneamente desaparece, sin que la podemos verbalizar ¿qué se puede hacer con ella más que imaginar su funcionamiento y su potencial?



Propuesta de esquema resumen de lo que se propone en la entrada

Sabemos que la evolución, en su actividad tozuda y persistente, poco a poco iba permitiendo la progresiva mayor complejidad en los organismos y, en particular, de los sistemas neuronales. Los mapas del Yo nuclear y las imágenes mentales que iban soportando la emergencia de la Consciencia central pudieron hacerse más complejos y más estables en el tiempo. Vislumbrándose ya la **capacidad de memoria**, que iba también haciéndose más potente,

lo que posibilitaba el hecho de guardar esos millones de mapas e imágenes instantáneos que iban surgiendo en el día a día vivencial. Progresivamente, los patrones de funcionamiento para el Yo nuclear, encuentro del organismo y el exterior en el aquí y ahora, se debieron ir abriendo a los mapas almacenados en la memoria correspondientes a otros “aquí y ahora” temporalmente diferentes, lo cual proporcionó la ampliación de la relación. Que también se extendería hacia el futuro al hacerse más complejos los patrones de respuesta, inicialmente motora, mediante los que el cerebro proponía alternativas de comportamiento. Con ellos se generaban mapas neurales de posibles comportamientos y de los resultados históricos de dichos comportamientos. Mapas de pasado, presente y futuro que la memoria era capaz de manejar y proponer a demanda de los módulos internos de decisión.

La memoria permitió jugar con los *flashes* del aquí y ahora que generaban las “vivencias”, engendrando un cuerpo correlacionado de estados del Yo, potencialmente de todo el abanico temporal vivencial del individuo. El Yo nuclear y la memoria permitieron la aparición en escena de un **Yo autobiográfico**, que lo mismo era histórico que recordativo o proyectivo. Los nuevos y complejos mapas neurales que surgían de la autobiografía también eran almacenados en la memoria y utilizados para nuevas realimentaciones y manipulaciones, con el correspondiente paralelo en imágenes mentales que conceptualmente eran replicas del funcionar de esos mapas neurales autobiográficos. Imágenes mentales que permiten ahora la emergencia de lo que algunos llaman la “sensación del ser -del Yo- conociendo”, de la consciencia de un ser que siente a sí mismo y que actúa desde una perspectiva personal, poseedor y agente único de su vida. ¿Qué es eso ni más ni menos que *la emergencia de la constatación por parte del individuo* de una **Consciencia propia ampliada**, con relación a la Consciencia nuclear del aquí y ahora-, que le posibilita el hacer diabluras, incluso motivadas por un propósito más allá de un estricto uso para supervivencia como organismo?

Esto creemos que pudo ser la evolución y surgencia, sobre la estricta realidad física, de los fenómenos emergentes que conocemos como Yo -anclaje de la identidad- y como Consciencia -sentimiento de la identidad-. Ahora nos debemos a la segunda parte prometida: la base neuronal que soporta esta historia evolutiva.

Los posibles elementos neuronales que explicarían la anterior cualia.

Al enfrentarme a la tarea de tratar de explicar lo qué la neurología piensa acerca de cuál pueda ser la base neuronal encefálica de los personajes del “*sentido de la propia identidad*”, toda esa colección de Yoes y de Consciencias que han ido apareciendo, poco a poco me he ido convenciendo de que la mejor alternativa es proponer una reorientación hacia lo que, con bastante extensión, escribí en la serie “*Biografía de lo Humano*”, publicada en el blog “*El Cedazo*”, acerca del tema. No procede el repetir lo que allí se dijo, que podéis encontrar en su entrada 9^[8] nominada como “*Soporte neuronal de la Consciencia*“. Con una aclaración: allí llamé “proto-Yo” a lo que aquí bautizo como “Yo elemental”; allí veréis escrito “Yo-mismo” donde aquí escribo “Yo nuclear”; aquí respeto el nominativo asignado al “Yo autobiográfico” aunque allí le añadí el nexa de un guión. Con relación a las Consciencias, al estar adosadas a su propio Yo de base no procede aclaración, las pistas son obvias.

Si no te apetece ir al detalle que te propongo, por otro lado un poco tedioso, dejo aquí un magnífico resumen propuesto por nuestro maestro Antonio Damasio:^[9] ”... *la consciencia [nuclear] depende especialmente más de regiones arcaicas -desde el punto de vista evolutivo- que de zonas recientes, y localizadas en las profundidades del cerebro, no en su superficie. Curiosamente, los procesos... que aquí propongo se arraigan en estructuras neurales antiguas, íntimamente relacionadas con la regulación de la vida, más que en los logros neurales más modernos de la neocorteza [necesaria para expandir la consciencia hasta sus aspectos autobiográficos] que*

permiten percepción fina, lenguaje y racionalidad compleja. El aparente “más” de la consciencia depende de lo “menos”... Oculta y venerablemente antigua es la luz de la consciencia.” ¿Desde cuándo?

Con esta última pregunta podría dejar el tema finiquitado. Pero...

Últimas palabras.

Como he dicho en una nota anterior,^[5] el dibujo de la ciudad neuronal de la Consciencia, del sentido de la propia intimidad, está bastante estudiado y, por tanto, esperanzadoramente basado sobre pacientes con deficiencias patológicas o traumáticas en sus encéfalos. Se están pudiendo correlacionar de una manera bastante seria estas malfunciones y deficiencias con la mayor o menor percepción del Yo y la Consciencia, en todas sus modalidades. También los ensayos clínicos sobre pacientes e individuos sin problemas, mediante diversas técnicas de prospección cerebral, están dando como resultado una idea que comienza a ser clara, suficientemente, en lo relacionado con los mapas neuronales y aun escasa en lo referente a las imágenes mentales, como para pensar que los neurólogos están posiblemente en una buena senda hacia el desenredo del nudo de la Consciencia.

La Consciencia, una gran palabra para los humanos. Fiamos nuestra valía y posibilidades en esta magnífica emergencia evolutiva del cerebro mamífero. A veces la pensada como una propiedad de algo que no es material, un componente intangible para nuestra mente, el complemento del organismo material que nos permite intuir qué es lo que siente este último, el cuerpo. El “*pienso luego existo*” de Descartes. Pero que, al igual que sucedió en el camino de la Vida y la Ciencia, las ideas son sobrepasadas y, por mejor conocidas, aclaradas. Siempre la explicación más sencilla que se base en el menor número y menos desarrollados supuestos. Y la neurología nos está abriendo esta puerta para la Consciencia, para explicar la mecanicidad que existe en el dibujo de algo tan trascendental para el

hombre como es el sentido de su propia identidad, el sentido de su Yo que realmente parece que es el sujeto que “conoce” y “actúa”, de forma que gestiona la vida desde una perspectiva exclusivamente personal e incommunicable.

Aquí dejo este anexo que necesariamente se ha deslizado entre la neurología, la psicología y la filosofía. Me gusta esta conjunción tan necesaria a la hora de explicarnos.

NOTAS DEL ANEXO II:

1. Simplemente como recordatorio copio aquí una de las últimas locas y contundentes frases: *“Parece que existimos como entes resultado de un mundo relacional más allá de lo tangible. ¿Es un mundo vacío? ¿Es todo y sólo el efecto de una pura acción-reacción de unas fuerzas fundamentales que parecen regir nuestro Cosmos y que se nos han revelado gracias a las matemáticas y al poder del razonamiento que se apoya en la consciencia que gestiona el yo?”*

2. Según nos cuenta un grupo científico de la Universidad de Granada... *“Los cualias son una experiencia en primera persona. El problema duro de la conciencia. Ejemplos de cualias son el “dejavu”, el dolor, la intuición, la sinestesia, el placer mental, la pasión, tener algo en la punta de la lengua, el color, la curiosidad...”*.

[<http://www.ugr.es/~setchift/esp/cualia.htm>]

3. [<https://eltamiz.com/elcedazo/2016/02/20/biografia-de-lo-humano-07-teoria-sobre-la-evolucion-de-la-consciencia/>]

[<https://eltamiz.com/elcedazo/2016/03/05/biografia-de-lo-humano-08-una-historia-para-la-consciencia-reflexiva/>]

[<https://eltamiz.com/elcedazo/2016/03/19/biografia-de-lo-humano-09-soporte-neuronal-de-la-consciencia/>]

4. Digo “Propia” por distinguirla de lo que sería algo menos “emergente”, como la percepción de saber quién es el que tengo delante -identifico a-, lo que se vehicula mentalmente por otros derroteros neurales que posiblemente serán objeto de otro anexo de la serie.
5. Todo lo anterior es aún una hipótesis encefálica que en realidad no lo es tanto -lo de hipótesis-, ya que se basa en un detallado análisis a partir de la experimentación con individuos, vía pruebas de tipo psicológico o de tipo de imágenes y encefalogramas del cerebro. Lo voy a dejar a nivel expositivo, recomendando la lectura de los libros del profesor Damasio... y no sé con cuál quedarme, pues son complementarios: “*La sensación de lo que ocurre*”, “*En busca de Spinoza: neurobiología de la emoción y los sentimientos*”, “*El error de Descartes: la emoción, la razón y el cerebro humano*” y “*El cerebro creó al hombre*”.
6. La que parece más plausible aplicar a lo largo del desarrollo progresivo de los procesos que, desde una simple célula que unificaba la experiencia sensorial con la adecuada reacción somática, nos ha llevado a organismos tan complejos como el nuestro, con segmentación de células especializadas, pero que en el fondo lo que hacen es lo mismo: percepción-reacción.
7. No me he atrevido a escribir consciencia “inconsciente”, pero creo que se entiende como posible en unos estadios de evolución animal muy fundacionales.
8. [<https://eltamiz.com/elcedazo/2016/03/19/biografia-de-lo-humano-09-soporte-neuronal-de-la-consciencia/>]
9. De su libro “*La sensación de lo que ocurre*”, al final del capítulo 8.

