

Texto adaptado y ampliado de:

Brain and Language: The Neural Representation of Words and their Meanings

Invited speech (III Conference ALFAL-NE). Oxford University, Taylor Institution, Oxford, UK. 21-22 June 2007

Julio González Álvarez Ph D.

Departamento Psicología Básica, Clínica y Psicobiología.
Universitat Jaume I. Castellón (Spain)

Cerebro y Lenguaje: La Representación Neural de las Palabras y sus Significados.

Esta charla se dirige a presentar lo que hoy sabemos en torno a la siguiente cuestión:

- *¿Qué sucede en nuestro cerebro cuando escuchamos o leemos una palabra?*

En otros términos: ¿Cuál es la representación neural de las palabras y sus significados? Para abordarlo, en la Primera Parte haremos algunas consideraciones generales sobre el cerebro y su relación con el lenguaje y revisaremos aspectos claves que nos permitirán entender mejor el núcleo de la cuestión, que trataremos en la Segunda Parte.

PRIMERA PARTE: CEREBRO Y LENGUAJE

1.1. CEREBRO Y CORTEX: ALGUNAS CARACTERÍSTICAS.

Hoy sabemos que los procesos mentales, tanto emocionales como cognitivos, tienen lugar dentro del cráneo, en ese órgano sorprendente que llamamos cerebro. Para el hombre o mujer actual esto resulta obvio, pero no siempre fue así. Aristóteles, por ejemplo, creía que un órgano tan inmóvil, grasiento, aparentemente inútil y escaso de sangre (en cadáveres), no podría jugar un papel importante en el cuerpo humano (Scott y Wise, 2003). Para el filósofo griego, el cerebro era una flema sobrante que sólo servía para refrigerar la sangre: una especie de radiador. Consideraba más lógico atribuir al corazón el origen de la vida mental: ocupa una posición central en el cuerpo, se mueve, contiene sangre, y, cuando se detiene, acaba toda actividad anímica (Finger, 2000).

Esta posición fue cambiando a medida que avanzó el conocimiento sobre la función y estructura cerebral. Pero, paralelamente, la concepción *cardiocéntrica* contó con defensores hasta bien entrado el siglo XVII. El propio William Shakespeare no cuestionaba al cerebro como sede de la razón, pero tenía serias objeciones respecto a la vida emocional. Hoy perviven ecos de esta visión cardiocéntrica en la etimología de palabras como "record", "cuerdo", "recordar", "recuerdo", etcétera, cuya raíz latina es *cor* (corazón). En inglés, saber algo de memoria es "by heart".

Inundado por un torrente continuo de datos cambiantes –p.e. no hay dos imágenes retinianas idénticas–, el cerebro constituye un asombroso mecanismo diseñado para poner orden y extraer patrones estables a partir de ellos. De cada ojo, un millón de fibras nerviosas están suministrando una catarata continua de impulsos nerviosos. Un informático hablaría de un bus de 1 millón de bits, no de 32 o 64.

Todo organismo orientado a metas (obtener alimento o pareja sexual, evitar ser presa de otros, etcétera) debe generar para sobrevivir un cierto modelo de su mundo a partir de la confusa maraña de estímulos que le rodea. Y parece que un dispositivo de procesamiento distribuido y paralelo es una de las mejores soluciones que podía encontrar la naturaleza en su andar evolutivo.

Veamos algunos datos. Centrándonos en el cerebro humano, se estima que está compuesto por unas 10^{11} (100.000 millones) de células nerviosas o *neuronas*; la mayoría de ellas situadas en la corteza cerebral o cortex. Cada neurona establece un promedio de 5.000 - 10.000 conexiones con otras neuronas. Teniendo en cuenta que estas conexiones, o *sinapsis*, son claves para el funcionamiento mental, su número resulta astronómico y sus posibles combinaciones ilimitadas. Nos encontramos ante una estructura reticular difícil de imaginar en toda su complejidad. Hay conexiones locales, entre neuronas vecinas, y conexiones de larga distancia entre células remotas entre sí. La mayor parte de estas últimas son bidireccionales.

Según cálculos (Abeles, 1991, 2004; Braitenberg y Shuey, 1998), si tomamos al azar un milímetro cúbico de cortex hay en él un promedio de 20.000 -100.000 neuronas, cada una disparando unos pocos impulsos nerviosos por segundo. Estos impulsos viajan en total por unos 4 kilómetros de axones y afectan a otras neuronas a través de 800.000.000 sinapsis.

Por otra parte, la corteza cerebral tiene una geometría interna altamente interconectada: ninguna neurona está separada de cualquier otra por más allá de 4 conexiones. Dado su número, esta interconexión constituye un verdadero prodigio matemático.

Propiedades generales del funcionamiento cerebral.

Para entender mejor el funcionamiento general del cerebro, comparémosle con el de un ordenador, la máquina que fue inventada para ejecutar algunas de sus funciones (hacer cálculos, resolver teoremas matemáticos, etcétera).

El cerebro funciona de modo:

1. **Paralelo:** miles o millones de unidades elementales de procesamiento (neuronas) se activan simultáneamente en paralelo. La velocidad de transmisión del impulso nervioso es un millón de veces más lenta que la de los circuitos metálicos del ordenador, pero las distancias son cortas (la lentitud se nota, por ejemplo, en el tiempo que tarda en llegar a nuestro cerebro la señal del dolor cuando nos lastimamos un dedo del pie). La fuerza del procesamiento reside, precisamente, en su

paralelismo. Somos muy malos en procesamiento *serial* (resolver mentalmente una raíz cuadrada es una proeza, pero un PC lo hace en milésimas de segundo) y muy buenos en procesamiento *paralelo* (reconocer formas, rostros; extraer un patrón común a partir de un conjunto variado y cambiante de estímulos; abstraer conceptos; etcétera).

2. **Distribuido:** Un ordenador guarda la información (sea un texto, una imagen, un programa) de manera **local**, en posiciones de memoria concretas: en esta posición del disco duro archiva el código de una letra, en otra posición, el código de la letra siguiente, etcétera.; con los pixels de una foto sucede algo parecido. Parece que en el cerebro la información no se almacena de forma local: aquí un grupito de neuronas para el recuerdo de mi casa, ese otro para la palabra "pájaro", aquel otro para el rostro de mi novio... Al contrario, un único recuerdo se **distribuye**, se "desparrama", entre miles o millones de neuronas modificando sus patrones de conexión.

Karl Lashley (1890-1958) empleó décadas buscando el *engrama* en modelo animal: el lugar exacto donde un cerebro archivaría un recuerdo particular. Su idea era entrenar a ratas en recorrer laberintos y observar si lo aprendido se deterioraba tras la ablación de una parte de su cerebro. Después de emplear cientos de roedores siguiendo un plan sistemático, no consiguió localizar un punto exacto donde el animal almacenara localmente la información aprendida sobre la tarea. Antes al contrario, parecía que la cosa iba "a peso": el deterioro conductual era proporcional a la cantidad de tejido eliminado. Decepcionado, declararía irónicamente "a veces pienso que es inevitable concluir que el aprendizaje no es posible" (Lashley, 1950, pág. 501).

3. **Masivo:** Hemos visto el número astronómico de neuronas y sus conexiones entre sí. Después de los 30 años de edad, cada día mueren de forma natural cientos o miles de estas células, sin ser reemplazadas por otras. Algunos fisiólogos dicen que una borrachera puede matar perfectamente a 50.000 neuronas, y no parece que deje una secuela grave (otra cosa son muchas borracheras). Ninguna neurona del cerebro es indispensable para un proceso, puede desaparecer sin que el sistema se vea afectado. Esta es otra diferencia respecto al ordenador: un fallo en el procesador central, o en una línea importante del programa, puede paralizar el sistema completo. Por tanto, cualquier operación psiconeural, del tipo que fuere, incluso una simple orden motora, involucra a poblaciones de miles o millones de neuronas.

Corteza cerebral (cortex).

1. *Orden cortical en los sistemas de entrada y salida.* Si observamos un hemisferio cerebral (p.e., el izquierdo), encontramos en su corteza áreas *primarias* que corresponden a estructuras de entrada y de salida. Las fibras de entrada se proyectan en distintas áreas dependiendo de su origen sensorial: la *visual*, atrás, en el lóbulo occipital; la *auditiva* en el lóbulo temporal; la *somatosensorial*, procedente del cuerpo, en el lóbulo parietal. En general, los sistemas de entrada se ubican en la mitad posterior del cerebro.

El sistema de salida motor se sitúa en el lóbulo frontal junto a la fisura central. De aquí nacen las complejas órdenes motoras que mueven todo nuestro cuerpo.

Una propiedad general de los sistemas primarios es que poseen un orden topográfico que refleja el orden del origen o el destino. Es decir, las células sensoriales adyacentes se proyectan en neuronas adyacentes. Así, la imagen retiniana se proyecta *grosso modo* en el área visual primaria. Los distintos tonos del sonido, que el oído separa en origen, se colocan de forma ordenada como las teclas de un piano en el área auditiva. Las distintas partes del cuerpo también se proyectan de forma ordenada en el área somatosensorial.

De este modo la corteza *motora*, responsable de los movimientos voluntarios, alberga el mapa del cuerpo en su conjunto. Si hicieramos un corte coronal y lo observáramos desde atrás, veríamos al célebre homúnculo de Penfield de los años 50 (Penfield & Rasmussen, 1950). La representación visual de las partes del cuerpo controladas por la corteza motora nos ofrece una imagen deformada según la complejidad de los movimientos. La espalda tiene una exigua representación, mientras que la mano requiere una gran porción cortical. La cara y los órganos articulatorios se reservan para sí más de un tercio de corteza motora.

Gracias a la plasticidad cerebral, esta disposición puede variar en los individuos dependiendo de ciertas circunstancias. Así, la pérdida de un miembro a la larga reduce su representación cortical. Los virtuosos del violín que empezaron a practicar muy pronto tienen más cantidad de corteza motora y sensitiva reservada para los dedos de la mano izquierda.

2. *Mezcla de información en el cortex.* Más allá de las áreas primarias de entrada y salida tenemos vastas regiones de *asociación* donde se produce la mezcla multimodal de información. Estas áreas de asociación son muy reducidas en otros vertebrados (ratas).

Como principio general, las áreas primarias no se conectan directamente entre sí*, por lo que no existe una vinculación directa entre, por ejemplo, la información visual y auditiva. Cualquier conexión entre áreas primarias viene mediada por neuronas interpuestas; esto nos dice que la asociación entre las distintas clases de información es de naturaleza compleja.

1.2. LESIONES Y LENGUAJE

¿Cómo lleva a cabo el cerebro una función tan compleja como el lenguaje? Las lesiones cerebrales constituyeron la primera fuente empírica para empezar a entenderlo. Desde tiempo atrás se sabe que una lesión no tiene las mismas consecuencias sobre el habla si ocurre en un lado u otro de la cabeza. Las guerras proporcionaron, desgraciadamente, abundante material de observación. Los soldados que venían del frente con metralla alojada en el lado izquierdo del cerebro solían presentar secuelas en el lenguaje; cuando era en la parte derecha, el lenguaje aparecía poco o nada afectado. Una de las primeras observaciones fue, por tanto, la *asimetría cerebral* o **lateralización del lenguaje** en el hemisferio dominante (o izquierdo, en la mayoría de la gente).

La primera descripción científica de un "centro del habla" en el cerebro se la debemos al neurólogo francés **Paul Broca** al presentar en 1861 el caso, ampliamente citado, del paciente Leborgne, conocido como *Monsieur Tan*. Este enfermo parecía comprender lo que se le decía y no mostraba parálisis alguna de los músculos bucoarticulatorios, pero sólo podía pronunciar algo parecido a la sílaba "tan", de ahí su apodo. A su muerte por neurosífilis, Broca le practica la autopsia y encuentra una lesión importante en su cerebro, en el lóbulo frontal del hemisferio izquierdo. Hoy el cerebro de Leborgne se conserva en el Museo parisino de Dupuytren. Durante los años siguientes, Broca presentó 19 casos más con lesiones en la misma zona, ahora conocida como el *centro o área de Broca*. Se ubica en una región próxima a la corteza motora responsable de los movimientos de la boca y la cara.

Diez años después, el neurólogo alemán **Carl Wernicke** describe un nuevo tipo de trastorno caracterizado por una comprensión muy pobre y un habla fluida pero sin sentido. Aquí la lesión aparece en el lóbulo temporal, también izquierdo, pero cerca del área auditiva. Se trataba así de un segundo centro del lenguaje (*área de Wernicke*) y la primera descripción de la llamada afasia de Wernicke.

Ejemplos. Veamos algunos ejemplos contemporáneos causados por un accidente cerebrovascular (ACV). Aquí el flujo sanguíneo se ve interrumpido por una obstrucción arterial y, como consecuencia, toda una región del cerebro resulta dañada por falta de oxígeno.

1. En el primer caso, el daño ha afectado a una amplia zona que incluye el área de Broca y tenemos una *Afasia de Broca*.

El paciente responde a preguntas del examinador: ¿Cuántos años tienes? (43 es la respuesta).

Observamos una dificultad importante para articular "cuarenta y tres". Sin embargo no existen problemas con los movimientos individuales de la boca (labios, lengua, etc.).

Siguen las preguntas: ¿En qué piso vive? ¿en qué puerta?

De nuevo encontramos dificultades para articular palabras como "siete" o "catorce". El paciente recurre a estrategias compensadoras: para articular "siete" inicia la numeración "1, 2, 3, 4, 5, 6" porque se trata de una cadena verbal bien aprendida que le lleva al programa neuromotor buscado. Las cadenas sobreaprendidas y adquiridas en edades tempranas, como los primeros números, canciones, rezos, etcétera, son relativamente resistentes al daño cerebral y suelen estar preservadas.

Tarea de nombrado: codo, muñeca.

* Una excepción a esta regla general se da entre las áreas *motora* y *somatosensorial*, que establecen conexiones directas entre sí. Para el cerebro toda la información aferente es externa al mismo, pero alguna procede del entorno exterior y otra del propio cuerpo, ¿cómo distingue entre ambas? Probablemente esta conexión directa sea clave para que el cerebro reconozca la información como perteneciente a un territorio especial: el cuerpo. Un territorio que proporciona feedback inmediato entre salidas y entradas.

¿Qué pasa con su comprensión? En general es buena pero el paciente tiene dificultades con las oraciones gramaticalmente complejas (p.e. ¿Cuanto hace que no vienes por aquí?; oraciones en pasiva, etc.). El principal escollo reside en el manejo de las palabras funcionales (preposiciones, conjunciones, etcétera)

Su lesión ha afectado al área de Broca, que se halla próxima a la corteza motora que controla los movimientos de la boca. El control individual de los músculos está preservado y puede imitar gestos con la lengua, los labios, etcétera. La traba está en su compleja coordinación para articular una palabra completa. Hablar implica la orquestación de más de un centenar de músculos pertenecientes a grupos musculares distintos. Si comparamos hablar con una orquesta de instrumentos musicales, cada uno de ellos funciona bien por separado; el problema residiría en las partituras que los coordinan en el tiempo para generar una sinfonía, o sea el programa neuromotor de una palabra. Parece que la zona de Broca es clave para las "partituras" que dirigen y coordinan los movimientos del habla.

2. Ahora examinamos un caso de *Afasia de Wernicke*, con un daño más central en la maquinaria del lenguaje. El paciente tiene como lengua materna (L1) el Valenciano (variante del catalán) y el castellano como segunda lengua (L2).

Aquí vemos una comprensión muy pobre. No entiende la instrucción de "toque un círculo" ("circul" o "cercl", en valenciano).

Ahora "toque una fitxa groga" (amarilla).

"On viu vosté?" (dónde vive usted?).

Es patente su enorme dificultad para entender el lenguaje tanto ajeno, como el propio. Lo que nos remite a la importancia del lenguaje como probable organizador del pensamiento. Esta persona se encuentra en una situación de clara minusvalía a la hora de planificar sus acciones, orientarse, deambular, etcétera

Su habla es fluida, pero carente de sentido. Está plagada de *parafasias* o graves alteraciones de las palabras, y creación de *neologismos* o nuevas palabras inexistentes en el idioma. También observamos la permanente intrusión de material verbal ("Jo soc valencià", yo soy valenciano) que se cruza en su búsqueda de las palabras. Son como escombros enteros de una casa en ruinas. Sólo cuando una pieza se rompe, somos conscientes de la enorme complejidad de la maquinaria del lenguaje.

Su lesión abarca una zona que incluye el *área de Wernicke*, cerca de la corteza auditiva primaria.

Como vemos, las zonas que al dañarse interfieren directamente en la competencia lingüística se encuentran en torno a la cisura de Silvio en el hemisferio izquierdo. Es así que se dice que las áreas "clásicas" del lenguaje ocupan la **región perisilviana** de la corteza cerebral.

El estudio de las lesiones cerebrales y sus efectos sobre el lenguaje constituye una valiosísima fuente de información dentro de la *neurolingüística* o *neuropsicología cognitiva del lenguaje*. Pero tiene **limitaciones** que no deben olvidarse, particularmente dos:

a) naturaleza incontrolada e irrepitable de la lesión (N=1).

La lesión es un hecho accidental, no controlado. En un experimento de laboratorio, el investigador manipula las variables que pretende estudiar. En el caso de los pacientes es la propia naturaleza la que efectúa el "experimento" (desgraciado experimento) y realiza la manipulación de variables de forma azarosa (Caramazza, 1992; Cuetos, 1999). En el laboratorio, el investigador puede repetir el experimento cuantas veces desee, variando de forma conocida las condiciones experimentales. Por el contrario, cada lesión cerebral es distinta; no hay dos lesiones iguales. Cada traumatismo craneoencefálico, cada infarto o hemorragia cerebral, etcétera, produce una lesión particular, única e irrepitable. En este sentido, cada enfermo constituye un experimento distinto que corresponde a la metodología de caso único (N=1).

b) una lesión puede afectar a distintos subsistemas y conexiones entre áreas remotas. Los síntomas observados podrían corresponder a zonas ajenas al daño que han quedado desconectadas entre sí, o pobremente conectadas. Es decir, debemos ser prudentes antes de establecer asociaciones simplistas entre funciones complejas y zonas cerebrales.

1.3. CEREBROS INTACTOS: TÉCNICAS MODERNAS DE REGISTRO Y NEUROIMAGEN

En las últimas décadas, las *técnicas de registro y neuroimagen* permiten estudiar a los cerebros sanos mientras realizan un proceso y registrar las áreas más activas durante su ejecución. En general, sus resultados confirman los hallazgos previos pero arrojan una visión más compleja de la dinámica cerebral.

Podemos colocarlas en dos grandes grupos. Las técnicas de registro eléctrico (potenciales evocados, ERP) y magnético del cerebro (MEG, magnetoencefalografía), ofrecen una precisión temporal de milisegundos; lo que nos abre una valiosa ventana al curso temporal de ciertos subprocesos que queremos desentrañar.

Por el contrario, las técnicas de neuroimagen como la PET (Tomografía por Emisión de Positrones) o la menos invasiva fMRI (Imagen por Resonancia Magnética Funcional) son dependientes de la hemodinámica cerebral y su precisión temporal es pobre. Sin embargo, su resolución espacial es excelente y ofrecen imágenes de gran detalle del cerebro en acción (voxels de 1 mm³).

La tendencia actual es caminar hacia la combinación de técnicas en un mismo experimento. Volveremos a ellas en la Segunda parte.

SEGUNDA PARTE: PALABRAS Y WEBS NEURONALES

2.1. WEBS FUNCIONALES

Los avances sobre la actividad cognitiva del cerebro apuntan hacia la actualidad del viejo principio del *aprendizaje correlacional* de Donald Hebb de los años 40/50.

El Principio de Hebb (1949, p.70) declara que:

"Dos neuronas, o sistemas de neuronas, que se activan repetidamente al mismo tiempo, tenderán a quedar '*asociadas*', de manera que la activación de una de ellas facilita la activación de la otra".

Una consecuencia de este principio es que se formarían lo que Hebb denominó "asambleas de células" o amplios conjuntos de neuronas que tenderían a activarse a la vez y serían la base neurobiológica de gran parte de los procesos perceptivo-cognitivos del cerebro, tanto humano como animal no-humano.

Una concepción así venía a situarse entre dos posiciones extremas. Por una parte, los localizacionistas asumían que pequeñas porciones de corteza cerebral, de pocos centímetros cuadrados, eran plenamente capaces de llevar a cabo funciones cognitivas de alto nivel. Según ellos, procesos complejos como la comprensión de las palabras estarían confinados y restringidos a una pequeña área, sin la contribución de otras. En el otro extremo, la aproximación holística defendía la equipotencialidad del cerebro respecto a cualquier operación cognitiva, y el rechazo a especializaciones corticales. Cualquier parte del cerebro sería potencialmente equivalente a cualquier otra parte.

Las "asambleas de células" de Hebb suponen una clara alternativa a ambos modelos (Pulvermüller, 1999). Contrasta radicalmente con el *localizacionismo* porque asume que neuronas en distintas áreas corticales pueden formar parte de una misma unidad funcional. También se distancia del *holismo* que sostiene que todo es igualmente distribuido en un cortex indiferenciado; para Hebb, la representación mental de, por ejemplo, una imagen involucraría zonas distintas de las de un olor o un gesto motor.

En la época de Hebb se creyó que la existencia de tales asambleas celulares que se activan como un todo representando entidades cognitivas era imposible de verificar de forma empírica. Probablemente, ésta fue una de las principales razones de que la idea no cuajara y se aceptara de forma generalizada durante los años 50 y siguientes.

Décadas después, el surgimiento de nuevas técnicas más refinadas han proporcionado un fuerte apoyo a las ideas hebbianas, que algunos autores han reformulado bajo el concepto más elaborado de *webs funcionales de neuronas*.

De acuerdo con la formulación contemporánea, una **web funcional** es un conjunto de neuronas (Pulvermüller, 2003):

- (i) que están fuertemente conectadas entre sí.
- (ii) que están distribuidas sobre un conjunto específico de áreas corticales.
- (iii) que trabajan juntas como una unidad funcional.
- (iv) cuyas partes son mutuamente dependientes entre sí.

Se propone que estas webs presentarían patrones de activación basados en dos estados de actividad: *ignición* y *reverberación*.

- El concepto de "ignición", propuesto por Braintenberg (1978), plantea que si, en un momento dado, una fracción sustancial de neuronas de una web son activadas, éstas comunican rápidamente la activación al resto de los miembros neuronales y toda la web en su conjunto se activa en décimas de segundo.
- una vez "encendida", la web mantendría su actividad neural durante varios segundos gracias a circuitos reverberantes en su interior. Esta idea ha recibido evidencia desde varias líneas de

investigación y conecta con los trabajos del grupo de Abeles (Abeles et al., 1991, 1992) sobre las denominadas *synfire chains*, o subgrupos de neuronas sincronizadas que comunican su actividad a otros subgrupos, formando circuitos en bucle reverberantes. Mientras la web reverbera y mantiene su actividad neural, cognitivamente la representación mental se halla activa.

Hoy disponemos de un volumen importante de evidencias a favor de estas webs funcionales como base neural de representaciones cognitivas específicas. En los laboratorios se hacen experimentos con animales que, por razones éticas, no podemos realizar con las personas.

Un paradigma típico es el registro de la actividad de neuronas individuales mientras un primate mantiene activa una representación de memoria en su cerebro. Aquí hemos de citar los trabajos del grupo de **Joaquín M. Fuster** en UCLA (Fuster, 1997; Fuster & Jervey, 1982) con monos macacos. En ellos, el animal debe retener en la mente un color (o una forma) de un estímulo durante varios segundos y ejecutar una respuesta motora apropiada. Es una tarea de memoria muy usada con animales, conocida como "emparejamiento demorado con la muestra". Al mismo tiempo, los investigadores registran con microelectrodos la actividad de neuronas individuales. Los resultados indican que, mientras el mono mantiene en su memoria la representación de un estímulo concreto (p.e. color rojo), ciertas neuronas de su cortex muestran un nivel alto de actividad, es decir, se disparan con mayor frecuencia. Una vez el mono da la respuesta, estas neuronas vuelven a su nivel base de actividad, al no ser necesario ya mantener el estímulo en memoria. Lo más relevante es que esta sobreactivación es específica del estímulo, de modo que tales neuronas no responden (sólo nivel base) cuando se presenta el otro estímulo (color verde).

Además, los datos son coherentes con la cuarta propiedad (iv) de que las distintas partes de una web son mutuamente dependientes entre sí. Quiere decir que si una parte importante de la web no funciona, el resto de las partes también se ven afectadas y la web en su conjunto deja de activarse. El equipo de Fuster encontró neuronas de respuesta específica tanto en el cortex prefrontal como en el temporal, lo que sugería la existencia de webs funcionales abarcativas de ambas áreas. La lesión temporal por enfriamiento de las neuronas en una área (prefrontal) conducía a la pérdida de especificidad de las neuronas en la otra área, es decir volvían a su nivel base de actividad (Fuster, Bauer, & Jervey, 1985). Esto cognitivamente se tradujo en la incapacidad del animal para mantener activa la representación mental del estímulo y responder correctamente.

2.2. WEB LÉXICAS (WORD WEBS)

Nuestro planteamiento se sitúa dentro del marco teórico defendido por Friedemann Pulvermüller (MRC, *Medical Research Council*, Cambridge, UK) y otros autores.

La idea central es que las palabras están representadas neuronalmente por webs funcionales cuya distribución cortical viene determinada por el contenido de su significado. Esto excluye la idea de un "centro del significado" unificado.

El balbuceo temprano y la producción de las primeras palabras requieren actividad neural en las áreas que controlan los músculos de la cara y los movimientos articuladores (Pulvermüller, 2001, 2003). Estas áreas se ubican en el cortex motor inferior y zonas adyacentes. Al mismo tiempo, la articulación produce sonidos que activan la corteza primaria auditiva y regiones próximas. La existencia anatómica de robustos haces de fibras entre ambas zonas perisilvianas (frontal inferior y temporal superior) proporciona la circuitería necesaria para la formación de complejos enlaces entre ambos dominios en el hemisferio dominante. Gracias al principio de Hebb, la práctica continuada del balbuceo y su escucha simultánea llevaría a la creación de complejas asociaciones o neuroprogramas específicos que estarían en la base de la representación fonológica de las futuras palabras.

En consecuencia, las palabras vendrían representadas por webs funcionales, o **webs léxicas** (*word webs*) que incluyen:

- a) neuronas en las **áreas perisilvianas** (forma fonológica)
- b) neuronas en otras **zonas corticales distantes** relacionadas con la información semántica de la palabra.

Mientras que la parte a) de la web estaría fuertemente lateralizada en el hemisferio dominante, la parte b) sería principalmente bilateral.

Las estimaciones hablan de webs del orden de 100.000 neuronas o más (Pulvermüller, 2003).

Evidencias

¿Cómo podría probarse la existencia de webs neuronales en el procesamiento de las palabras? La activación de una web y sus masivos circuitos reverberantes generaría una señal eléctrica y magnética que las técnicas avanzadas de registro podrían detectar. Y eso es lo que sucede.

Gracias al registro de los *Potenciales Evocados*, sabemos desde los años 80 y 90 que la presentación de una palabra causa en el cerebro una actividad bioeléctrica más intensa y distinta que la presentación de una pseudopalabra (un estímulo regular desde el punto de vista ortográfico y fonológico, pero carente de significado).

Las técnicas recientes de *Magnetoencefalografía* (MEG) permiten registrar los pequeños campos magnéticos que generan los flujos eléctricos en las dendritas de las neuronas. La señal es tan débil que el instrumental debe estar aislado del campo magnético terrestre y se requieren al menos 50.000 neuronas activas para generar una señal detectable. Según cálculos basados en la velocidad de transmisión del impulso nervioso y las distancias a recorrer dentro del cortex humano, los circuitos reverberantes de una web activa oscilarían en frecuencias altas, superiores a los 25 Hz o ciclos por segundo (banda *gamma*). Eligiendo cuidadosamente estímulos control (pseudopalabras), la técnica MEG detecta selectivamente mayor actividad magnética en esa banda de alta frecuencia para las palabras (Eulitz et al., 2000; Krause et al., 1998; Pulvermüller, et al., 1996).

Ejemplo. En finés, "lakko" es una palabra (huelga), pero "vakko" no lo es, se trata de una pseudopalabra. La doble oclusiva fina "kk" introduce una larga pausa natural (200 ms) en el centro de la palabra que permite registrar la respuesta cerebral por separado para cada sílaba. Los registros, tanto eléctricos como magnéticos, demuestran que la misma sílaba /ko/ genera respuestas muy distintas dependiendo de si se encuentra en un contexto de palabra (precedido por "la") o de pseudopalabra (precedido por "va").

Cuando /ko/ completa la palabra, la respuesta evocada es mucho mayor que cuando completa la pseudopalabra carente de significado. Esta diferencia sólo surge en hablantes finlandeses, no en personas extranjeras desconocedoras del finés, lo que reafirma su dependencia semántica frente a otro tipo de variables formales (acústicas o fonológicas). Además, el experimento se realizó mientras los participantes miraban una película muda y se les había instruido que ignorasen los estímulos experimentales sonoros (Pulvermüller, Kujala et al., 2001).

Los datos disponibles muestran que la actividad cerebral asociada a una palabra es:

- **rápida** (durante los primeros 200 ms), una vez el estímulo está disponible.
- **automática** (sin necesidad de atención voluntaria).

Estas dos propiedades son coherentes con el concepto de "ignición" de una web neuronal.

Otras evidencias adicionales proceden de la distribución topográfica de la activación cortical según los distintos tipos de palabras. Lo veremos a continuación.

2.3. SIGNIFICADO REFERENCIAL Y CORTEX

De acuerdo con el principio del *aprendizaje correlacional* de Hebb, el uso de las palabras en el contexto de objetos y acciones llevaría a asociaciones entre neuronas de las áreas del lenguaje y neuronas adicionales en áreas que procesan información sobre tales objetos o acciones (referentes). Un corolario de esto último es que la **distribución cortical de estas neuronas va a depender del tipo de referente semántico**.

De este modo, se crearían webs neuronales codificando palabras y aspectos de sus significados (Pulvermüller, 2001, 2003).

Revisemos algunos trabajos que apoyan esta idea.

Palabras visuales y palabras de acción. Para nosotros, el significado de nombres como "ballena", "tiburón", "cebra", y otros animales, nos es conocido fundamentalmente a través de experiencias visuales (fotografías, películas, contemplación en vivo, etcétera). Otras palabras, como "tenedor", "martillo", o "tijeras" se refieren

a objetos que usamos con cierta frecuencia y de los que disponemos experiencias motoras (de acción). Cabe esperar que la representación neural de palabras del primer tipo activen preferentemente zonas corticales de procesamiento visual (posteriores), mientras que palabras del segundo tipo activen áreas motoras o premotoras. Y eso es lo que sucede, tal como nos muestran las técnicas de neuroimagen (Martin, Wigg, et al., 1996).

Los datos sugieren que las palabras del primer tipo (eminente visual), activan webs que abarcan las áreas perisilvianas del lenguaje y áreas posteriores responsables del procesamiento visual. Mientras que las palabras del segundo tipo activan webs que abarcan las áreas perisilvianas del lenguaje y áreas frontales de carácter motor (Pulvermüller, 2001; Pulvermüller, Lutzenberg, et al., 1996).

Palabras para colores. El trabajo del equipo de Alex Martin (en Bethesda) con la técnica de Tomografía por Emisión de Positrones (PET), publicado en *Science* (Martin et al., 1995), demuestra que la generación de palabras de color ante dibujos monocromáticos o nombres de color activan zonas cerebrales próximas a las áreas involucradas en la percepción del color.

Lesiones. Desde la *neuropsicología*, la investigación nos dice que ciertas lesiones cerebrales pueden afectar selectivamente a unos tipos de palabras y no a otros: nombres frente a verbos, nombres de animales frente a nombres de herramientas, etcétera. (Damasio & Tranel, 1993; Daniele et al., 1994; Humphreys & Borde, 2001; Miceli et al., 1984, 1988; Warrington & McCarthy, 1983; Warrington & Shallice, 1984). Estas disociaciones entre clases de palabras pueden explicarse por la diferente distribución cortical de sus webs neuronales.

Subtipos de palabras de acción. Una serie de estudios dirigidos por Friedemann Pulvermüller desde el MRC de Cambridge han puesto a prueba predicciones más refinadas con verbos de acción relacionados con distintas partes del cuerpo.

En uno de los trabajos (Hauk, Johnsrude, Pulvermüller, 2004), los investigadores seleccionaron tres clases de verbos:

- a) verbos relacionados con las **piernas o pies** (andar, chutar, correr, saltar, deambular, etc.)
- b) verbos relacionados con las **manos o brazos** (coger, aplaudir, peinar, agarrar, dibujar etc.)
- c) verbos relacionados con la **boca o cara** (besar, morder, soplar, masticar, bostezar, etc.)

Cada lista constaba de 50 estímulos y las tres listas eran equivalentes en ciertas variables psicolingüísticas, como longitud de palabra, frecuencia léxica, e imaginabilidad. Además, se utilizaron otras palabras de relleno como estímulos de control.

En el experimento, las palabras se presentaban de una en una sobre una pantalla para que los participantes simplemente las leyeran de forma pasiva en silencio.

Al mismo tiempo, se registraba su actividad cerebral con la técnica de Imágenes por Resonancia Magnética funcional (fMRI, o *functional Magnetic Resonance Imaging*). Se trata de una técnica menos invasiva que la PET, porque no requiere la inyección de una sustancia radiactiva en el cuerpo. Su base es la resonancia magnética convencional (o *estructural*) que todos conocemos de los hospitales, pero va más allá. La *funcional* exige, en esencia, la comparación de dos imágenes del cerebro, una obtenida durante una situación de reposo o tarea base, y otra mientras se realiza la función mental que queremos estudiar. La diferencia entre ambas nos informa de las zonas activadas en la ejecución de ésta. Esto es posible porque, durante una tarea mental, las partes más activas del cerebro reciben mayor afluencia de sangre y, gracias a las propiedades magnéticas de la hemoglobina, pueden ser detectadas.

La fMRI implica someter al participante a un intenso campo magnético, inocuo en sí mismo, pero inaplicable a personas con marcapasos o prótesis metálicas.

Las imágenes mostraron que durante la lectura silenciosa de los verbos de acción se activaban, además de áreas del lenguaje, otras áreas corticales relacionadas con el movimiento de las partes del cuerpo asociadas a esos verbos. Es decir, durante la comprensión de los verbos se activaban representaciones de acciones específicas (Pulvermüller, 2005).

En la parte izquierda de la figura podemos observar las zonas motoras y sensoriales que se activan durante el movimiento de los pies (en azul), los dedos de la mano (rojo) y la lengua (verde). A la derecha observamos, con los mismos colores, las áreas que se activan al leer verbos relacionados con los pies o piernas (azul),

manos (rojo), y boca o cara (verde). La correspondencia es evidente y parece que hay un sustrato neural común a las acciones reales y al significado de las palabras de acción.

En las figuras esquemáticas se plantea que un verbo como *to kick* (chutar, patear) activa webs que incluyen la región perisilviana (círculos blancos) y áreas motoras superiores relacionadas topográficamente con los pies/piernas (círculos azules). El significado de *to pick* (coger) activa la región perisilviana y áreas motoras mediales relacionadas con las mano. El verbo *to kiss* (besar) activa, de nuevo, la región perisilviana y además áreas motoras inferiores relacionadas con la boca/cara.

Resultados semejantes se han obtenido en otros trabajos empleando otras técnicas con los mismos verbos de acción (Hauk & Pulvermüller, 2004; Pulvermüller, Härle, & Hummel, 2001; Pulvermüller et al., 2004; Shtyrov, Hauk, & Pulvermüller, 2004).

En la infancia, las palabras de acción son aprendidas en el contexto de la ejecución de acciones. Un niño realiza una acción y, en estrecha vecindad temporal, el cuidador usa típicamente la palabra de acción. En el cortex, el programa motor y la representación neural de la palabra se activan casi simultáneamente; de manera que la conexiones entre ambos tipos de de neuronas se hacen más fuertes (Pulvermüller, 2005).

Y esta activación ocurre en un plazo de tiempo muy breve (200 ms). Con magnetoencefalografía podemos observar cómo la activación ante verbos relacionados con la *pierna* se propaga desde las áreas persilvianas a la zona superior de la corteza motora en menos de 200 milisegundos (Pulvermüller, Shtyrov, & Ilmoniemi, 2005). Aquí los estímulos se presentaron por vía auditiva.

Así, la información sobre las partes del cuerpo está imbricada dentro de la representación neural del verbo de acción. Más en general: parece que la información motora y somatosensorial del referente está entretejida con la información fonológica de la palabra y forma parte de su significado.

Palabras olfativas. Aplicando la misma lógica, en la Universidad Jaume I de Castellón (Spain) nos planteamos estudiar la representación neural de palabras con fuertes connotaciones olfativas. En este estudio participó también Friedemann Pulvermüller.

La hipótesis de partida era que el procesamiento de palabras cuyos significados están fuertemente relacionados con los **olores**, implicaría la activación, entre otras regiones, de áreas cerebrales involucradas en el procesamiento olfativo. Era un planteamiento inédito con esta clase de estímulos.

Para ello construimos dos listas de palabras: una formada por términos asociados a olor y otra por términos neutros en este aspecto. Se trataba de comparar las activaciones cerebrales durante la lectura de unas y otras.

Para seleccionar estos estímulos, 18 personas dieron puntuaciones a un gran número de nombres y adjetivos según sus asociaciones olfativas; es decir, si las palabras se referían o recordaban algún olor, o si se referían a objetos de fuerte olor. La escala de puntuación abarcaba entre 1-7 puntos; iba desde 1–ninguna o muy debil asociación olfativa, hasta 7–asociaciones olfativas muy fuertes.

Basándonos en las puntuaciones, seleccionamos una lista de 60 palabras "olfativas" (estímulos experimentales: "ajo", "canela", "cloaca", "flor", "colonia", "sobaco", etc.), cuya puntuación media en la escala era 6,0. La lista incluía tanto palabras de valencia positiva como negativa. La segunda lista estaba formada por 60 palabras neutras (estímulos de control: "nube", "gafas", "pinza", "aguja", "tambor", "letra", etc.) que recibieron puntuaciones muy bajas en la escala (promedio 1,2). Ambas listas eran equivalentes en longitud (número de letras), y frecuencia léxica.

La tarea consistió en la lectura pasiva y silenciosa de los estímulos presentados en una pantalla a razón de uno cada 3 segundos. El tiempo de exposición fue de 750 milisegundos.

En el experimento participaron 23 personas de ambos sexos. Durante la presentación de los estímulos, se registraba la actividad cerebral del participante en imágenes por resonancia funcional en un Scanner *Siemens Avanto* de 1,5 teslas perteneciente a la casa ERESA (Hospital General de Castellón).

La literatura científica indica que en la percepción de olores reales intervienen circuitos neurales que involucran a estructuras entre las que destacan el cortex piriforme, la amígdala y el cortex orbitofrontal.

La comparación de los registros magnéticos permitió identificar aquellas áreas que se activaban de forma específica ante las palabras olfativas, pero no ante las palabras neutras de control. Encontramos activación en el *cortex piriforme* bilateral y la *amígdala* derecha.

Nuestros resultados sugieren que la lectura de palabras con fuertes connotaciones olfativas implica la activación de áreas involucradas en el procesamiento de olores reales. Este hecho es compatible con el marco teórico según el cual las palabras son procesadas por sistemas corticales distribuidos que incluyen información sobre el referente semántico.

El trabajo se publicó en *Neuroimage* bajo el título: “Leer ‘canela’ activa las regiones olfativas del cerebro”.

Una cuestión pendiente para la **investigación futura** es determinar el punto en el tiempo (*curso temporal*) en que la activación olfativa aparece, y si esta activación ocurre de forma automática e inmediata como parte del procesamiento semántico. Contestar a esta pregunta requerirá el empleo de técnicas de registro de alta resolución temporal, como es el caso de los potenciales evocados o la magnetoencefalografía. El automatismo podrá estudiarse en experimentos en los que el participante deba centrar su atención en otra tarea (p.e., contemplar una película muda mientras escucha los estímulos; o escuchar un mensaje mientras ve las palabras).

Una segunda cuestión se refiere al papel de la valencia hedonista de los estímulos (agradables vs desagradables) y si la activación de las palabras va paralela a la de los olores reales.

CONCLUSION FINAL

Los datos disponibles hasta el momento sugieren que la representación neural de las palabras y sus significados no está limitada a áreas específicas de lenguaje en torno a la cisura de Silvio (perisilvianas), sino que, probablemente, otras áreas corticales que procesan información perceptiva y motora del referente juegan un papel esencial en dicha representación. En el cerebro, el contenido semántico de las palabras no se halla confinado en un supuesto "centro del significado", compacto y unificado.