

Fundamentos de biolingüística

Antonio Benítez Burraco
Victoria Marrero Aguiar



Contenidos digitales
www.sintesis.com


EDITORIAL
SÍNTESIS

Fundamentos de biolingüística

PROYECTO EDITORIAL CLAVES DE LA LINGÜÍSTICA

Director:
Juan Carlos Moreno Cabrera



Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de la propiedad intelectual. La infracción de los

derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sigs. Código Penal), El Centro Español de Derechos Reprográficos (www.cedro.org) vela por el respeto de los citados derechos.

Fundamentos de biolingüística

Antonio Benítez Burraco
Victoria Marrero Aguiar



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

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

© Antonio Benítez Burraco
Victoria Marrero Aguiar

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

ISBN: 978-84-1357-341-0
Depósito Legal: M. 20.124-2024

Impreso en España - Printed in Spain

Índice

Introducción	7
1. Lingüística y biología	9
1.1. Los objetivos clásicos de la lingüística	9
1.2. La <i>biologización</i> de la lingüística. El legado de Eric Lenneberg ..	18
1.3. La biolingüística como disciplina	22
1.4. Conclusiones	27
2. La metodología para el estudio biológico del lenguaje	29
2.1. Tareas y técnicas psicolingüísticas y cognitivas	29
2.1.1. <i>Tareas</i>	30
2.1.2. <i>Técnicas y paradigmas</i>	32
2.2. Técnicas neurolingüísticas y neurobiológicas	37
2.2.1. <i>Técnicas de base electromagnética</i>	38
2.2.2. <i>Técnicas de base metabólica</i>	41
2.3. Técnicas genéticas	46
2.3.1. <i>Del fenotipo anómalo a los genes de interés</i>	46
2.3.2. <i>Estudios funcionales de los genes de interés</i>	57
2.4. Conclusiones	63
3. El lenguaje como sistema biológico complejo	65
3.1. El análisis molecular del lenguaje	65
3.1.1. <i>El gen FOXP2 como paradigma... y como problema</i>	66
3.1.2. <i>Genes, más allá de FOXP2</i>	69
3.1.3. <i>El análisis genético de los endofenotipos</i>	72

3.1.4. <i>El análisis molecular del lenguaje: algunas conclusiones</i>	74
3.2. El análisis neurobiológico del lenguaje	75
3.2.1. <i>La teoría neurolingüística clásica</i>	77
3.2.2. <i>Modelos neurolingüísticos recientes</i>	79
3.2.3. <i>Las estructuras subcorticales y el lenguaje</i>	83
3.2.4. <i>Las ondas cerebrales y el estudio del lenguaje. La perspectiva oscilométrica en neurolingüística</i>	84
3.3. El análisis cognitivo del lenguaje	88
3.3.1. <i>Producción y recepción del habla</i>	88
3.3.2. <i>Cognición y lenguaje</i>	92
3.3.3. <i>Variabilidad lingüística y cognición</i>	94
3.4. El lenguaje y el cuerpo	94
3.5. El lenguaje como fenómeno biológico complejo	97
3.6. Conclusiones	103
4. <i>El lenguaje como problema evolutivo complejo</i>	105
4.1. El enfoque mítico y el enfoque científico	106
4.2. La evolución del lenguaje desde una perspectiva comparativa	108
4.3. La evolución del lenguaje a la luz del registro fósil	114
4.4. La evolución de las lenguas y del lenguaje en la prehistoria	128
4.5. Conclusiones	136
5. <i>Biología y lenguaje: algunas cuestiones clave</i>	137
5.1. ¿Existe el instinto del lenguaje?	137
5.2. ¿Es el lenguaje un módulo cerebral?	141
5.3. ¿Son diferentes las lenguas orales y las signadas?	147
5.4. ¿Qué sucede cuando se daña el lenguaje?	153
5.5. ¿Qué sucede cuando el lenguaje se desarrolla de forma anómala?	158
5.6. ¿Aprendemos una segunda lengua de modo diferente a como desarrollamos la lengua materna?	165
5.7. ¿Es el lenguaje una innovación evolutiva?	172
5.8. Conclusiones	175
Epílogo	177
Bibliografía seleccionada	185

Contenidos digitales



Figuras en versión completa y color
Bibliografía completa

2

La metodología para el estudio biológico del lenguaje

El estudio biológico del lenguaje requiere un abordaje interdisciplinar en el que convergen distintas áreas de conocimiento, y cada una de ellas aporta sus instrumentos metodológicos: las ciencias cognitivas –y, más concretamente, la psicolingüística–, las neurociencias –especialmente, la neurolingüística y la neurobiología– y la genética. En este capítulo esbozaremos las principales técnicas que permiten estudiar los fundamentos biológicos del lenguaje desde estos tres campos.

2.1. Tareas y técnicas psicolingüísticas y cognitivas

Cuando nos interesa conocer los procesos cognitivos que hacen posible la adquisición y el uso del lenguaje nos adentramos en el terreno de la psicolingüística. Sus técnicas son tan variadas como sus objetos de estudio: algunas, tan clásicas como los cuestionarios “de lápiz y papel”, y otras, más actuales, como el seguimiento ocular o *eye tracking*.

Las respuestas que nos proporcionan esas técnicas, a su vez, se suelen dividir entre respuestas *online*, en curso o en tiempo real (generalmente, inconscientes), y respuestas *offline*, obtenidas una vez concluidos los procesos necesarios para realizar la tarea (y, por tanto, en su mayoría conscientes). Las segundas son las clásicas y más habituales, porque no requieren equipamiento tecnológico: diarios, informes de los padres sobre el desarrollo del lenguaje en sus bebés, repeticiones, lectura, cuestionarios, descripción de imágenes, etc. Para las primeras, en cambio, el tiempo es crucial, y debe medirse con precisión: “las tareas y medidas más comunes en Psicolingüística son cronométricas y consisten en registrar la latencia o tiempo de respuesta ante un

estímulo, medido en milisegundos, bajo el supuesto de que el tiempo es un indicador de la complejidad de la tarea que el participante ejecuta” (Igoa, 2022: 220). Ello requiere equipamiento específico, como se describirá en el 2.12.

2.1.1. Tareas

En este apartado esbozaremos las principales actividades que se suelen pedir a los participantes en experimentos psicolingüísticos, comenzando por las de percepción más básicas (las que nos permiten distinguir sonidos, o identificarlos); seguiremos con las que conllevan asignación a determinadas categorías (verificación, decisión léxica, juicios de gramaticalidad o aceptabilidad, etc.); luego veremos las tareas de comprensión; y finalizaremos con las de producción.

Las tareas más habituales en los estudios perceptivos pueden ser de detección (“levanta la mano cuando comiences a oír la señal”), discriminación (“¿estos dos sonidos son iguales o diferentes?”) o identificación (“¿qué sonido es este?”). En los estudios sobre unidades con significado solemos encontrar tareas de decisión léxica (“¿este estímulo es una palabra o no lo es?”), verificación de categorías (“¿gato pertenece a la categoría *mascotas*?”), juicios de relación semántica (“indicar, en una escala de 1 a 5, el grado de relación entre el significado de estas dos palabras”), o identificación de rimas (“¿terminan igual estas dos palabras, riman?”).

Cuando se está trabajando en el nivel morfosintáctico, los juicios suelen ser de gramaticalidad o aceptabilidad. No hay consenso sobre la forma de plantear tales juicios, pero suelen tener forma de pregunta, similar a esta: “¿es aceptable la oración X con un significado Y?” (Muñoz Pérez, 2014). Aunque pueden plantearse respuestas no dicotómicas, sino escalares (“de 1 a 5, ¿cómo de aceptable te parece esta oración?”) e incluso por estimación de magnitudes (Schütze y Sprouse, 2013).

Cuando estudiamos la comprensión y nos interesa comprobar que el participante ha entendido el contenido de un texto, las tareas pueden ir desde pedir una explicación oral sobre el mismo (*verbal explanation task*) (“¿qué quería decir A cuando dijo X?”) hasta dar a elegir la respuesta correcta en una serie de tres, cuatro o cinco opciones, o pedir respuestas más creativas, como construir frases, establecer comparaciones o incluso representar acciones con la ayuda de objetos o juguetes (Cacciari y Padovani, 2012).

Por último, si estudiamos la producción lingüística, la tarea puede ser una simple repetición (o “imitación elicitada”), una lectura (que en estudios psicolingüísticos se etiqueta como “tarea de denominación” o *naming task*), una descripción de imágenes, o actividades más complejas, como la tarea de interferencia entre palabra e imagen (*picture-word interference task*) (Rosinski *et al.*, 1975). En esta última se pide a los participantes que etiqueten o lean palabras y, simultáneamente, se les presentan imágenes que pueden coincidir con el significado (y entonces la tarea es más fácil y se realizará más rápido) o no (y ocurrirá lo contrario: aumen-

tará el tiempo de respuesta). Últimamente se intenta que los experimentos sean más naturales y tengan mayor “validez ecológica”. Para eso, se plantean tareas colaborativas. Una de ellas, que describiremos con más detalle porque se utiliza con frecuencia en lingüística, es la tarea del mapa (*map task*) (Brown *et al.*, 1983): se entregan dos mapas similares, pero no idénticos, a una pareja de participantes, y se les pide que colaboren para encontrar una ruta que lleve de un sitio a otro pasando por determinados puntos. Uno de ellos asume el papel de instructor y recibe un mapa con la ruta señalada; el otro tiene que pedir indicaciones para descubrirla. La figura 2.1 muestra los mapas del instructor y del seguidor utilizados en el *Atlas interactivo de la entonación del español*.

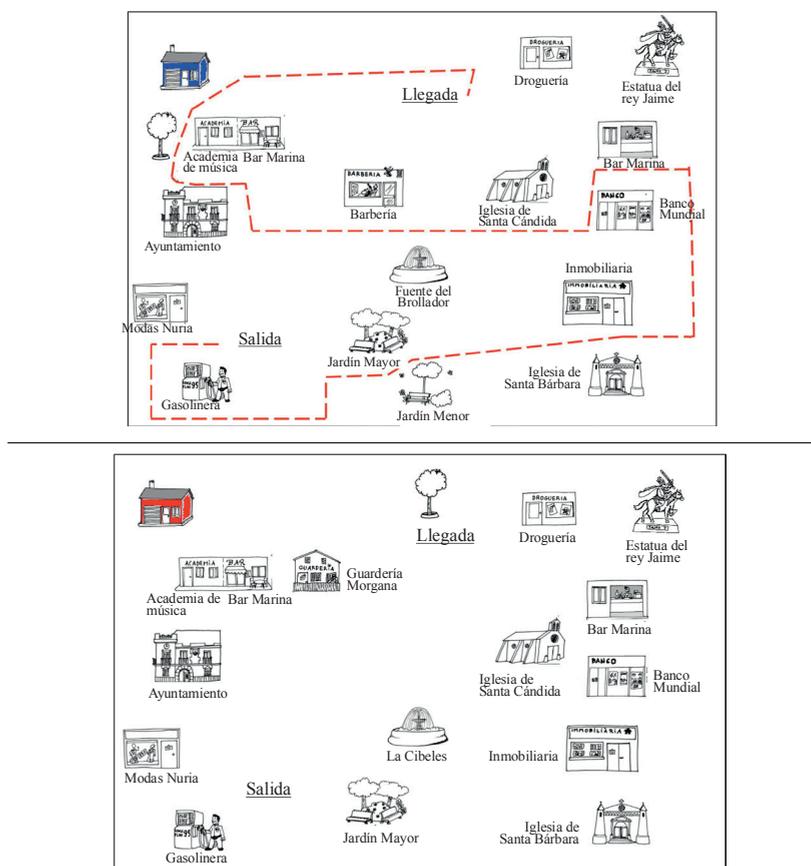


Figura 2.1. *Map task*. Ejemplos de mapas utilizados en la tarea del mapa del *Atlas interactivo de la entonación del español*. Arriba, el mapa del instructor; abajo, el mapa del seguidor (adaptada de Prieto, P. y Roseano, P., 2009-2013).

La elección de una de estas técnicas viene condicionada, evidentemente, por los objetivos del estudio, el tipo de proceso que nos interese conocer, los estímulos con que contemos, las características de nuestros participantes, etc. A su vez, varían en cuanto al nivel de dificultad y el tipo de mecanismo atencional que ponen en marcha, por lo que, metodológicamente, tienen implicaciones que conviene conocer antes de establecer el diseño de un experimento.

2.1.2. Técnicas y paradigmas

En el ámbito psicolingüístico, además de las técnicas de neuroimagen que describiremos en el próximo apartado, seguramente una de las más empleadas es el seguimiento ocular o *eye tracking*, al que dedicamos este. Además, se describe un paradigma tan habitual que, aunque no es una técnica en sentido estricto, merece una mención en este capítulo, dedicado a la metodología: la *facilitación* o *priming*. Concluiremos con una serie de procedimientos que han permitido a los investigadores conocer las capacidades perceptivas tempranas con las que los bebés responden a estímulos lingüísticos mucho antes de empezar a hablar.

A) Priming o facilitación

Comenzando por los paradigmas (que no son técnicas, pero sí forman parte de los instrumentos metodológicos de las disciplinas), en psicolingüística ocupa una posición estelar un procedimiento que pone de manifiesto el efecto de la memoria (a menudo implícita, no consciente) en el reconocimiento de estímulos: es lo que se conoce como *priming* o *facilitación*, que generalmente consiste en favorecer el acceso a una determinada palabra presentando anteriormente un estímulo relacionado con ella (un *facilitador*), bien por cercanía semántica (Neely, 2012), bien por similitud fónica (Meyer y Van der Meulen, 2000), bien por estructura morfológica (Frost *et al.*, 2000) o sintáctica (Tooley y Traxler, 2010). Incluso cuando la presentación del facilitador es tan breve que no puede percibirse conscientemente (30-80 ms), el tiempo de reacción necesario para acceder al objetivo es menor que sin ese estímulo previo (Van den Bussche *et al.*, 2009). El *priming* puede ser también negativo, cuando el estímulo facilitador es contradictorio con el objetivo, y entonces retrasa su detección.

B) Eye-tracking o seguimiento ocular

Cuando, en 1901, Raymon Dodge y Thomas Clain publicaron un artículo en el que presentaban “las primeras mediciones precisas del ángulo de velocidad de los

movimientos oculares en condiciones normales” (Dodge y Clain, 1901: 145-146), quizá no imaginaban el crecimiento exponencial de los estudios con electrooculografía a partir de los años setenta y, especialmente, en el siglo XXI. La figura 2.2 ofrece una aproximación gráfica, de “trazo grueso”, a ese incremento en los estudios que utilizan esta técnica. Desde que se ha aplicado a la mejora de las técnicas de *marketing* y al diseño de páginas web, su uso se ha popularizado aún más fuera del ámbito científico.

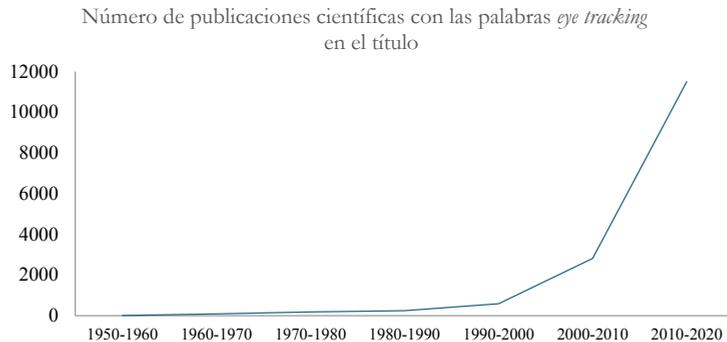


Figura 2.2. Resultado de la búsqueda bibliográfica en Google académico de las palabras *eye tracking* en el título de los trabajos, agrupado por décadas (fecha de la búsqueda: 19/06/2022).

Los movimientos y la fijación oculares, además de su papel –obvio– en la percepción visual y la lectura, se asocian a mecanismos atencionales, en general, y a los necesarios para la comprensión y la producción del lenguaje, en particular (además de otros procesos de interés psicológico, como la toma de decisiones o el razonamiento, y capacidades como la memoria o la imaginación [Richardson y Spivey, 2004]).

Los datos de seguimiento ocular proporcionan cuatro tipos de medidas (Holmqvist *et al.*, 2011): movimientos a través del espacio, posición en localizaciones determinadas, frecuencia (número, proporción y tasa de movimientos) y latencia (tiempo transcurrido entre movimientos oculares sucesivos, que se pueden representar como distancias espaciales). Pero son dos los componentes básicos que informan a los investigadores sobre el comportamiento de la mirada: las *fijaciones oculares* (dónde se mira y durante cuánto tiempo) y los *movimientos sacádicos* o *sacadas* (hacia dónde se mueven los ojos entre una fijación y la siguiente). Ambos son, generalmente, inconscientes, y ni siquiera en un proceso aparentemente lineal, como la lectura, siguen un orden de izquierda a derecha, sino que presentan saltos

atrás, llamados *regresiones* (en un 10-15% del tiempo medio de lectura) (Conklin y Pellicer-Sánchez, 2016). A medida que la tarea se vuelve más difícil, aumenta la duración de las fijaciones y las regresiones, mientras disminuye el tamaño de los movimientos sacádicos. Las zonas de la pantalla donde se encuentran los elementos más relevantes para un experimento se conocen como *áreas* o *zonas de interés* (ROI, por su sigla en inglés). En tareas de lectura, generalmente son palabras; en tareas con imágenes, los ROI serán zonas concretas de las mismas. La figura 2.3 nos muestra el tipo de datos que proporciona un sistema de *eye tracking* en lectura. Vemos los patrones visuales de procesamiento en la lectura de dos frases. La situada arriba es “Lorenzo y Alejandro reparan sumideros; o sea, desagües. Están acostumbrados a soportar malos olores”; la inferior es: “Emilio y Javier están enfermos; o sea, indispuestos. No es tan grave como parece”. Los círculos corresponden a las fijaciones, y su tamaño es proporcional a la duración de las mismas; las líneas corresponden a los movimientos sacádicos. En este estudio se deduce que la paráfrasis y la reformulación, a pesar de sus similitudes, son mecanismos que requerirían procesos cognitivos y toma de decisiones diferentes.

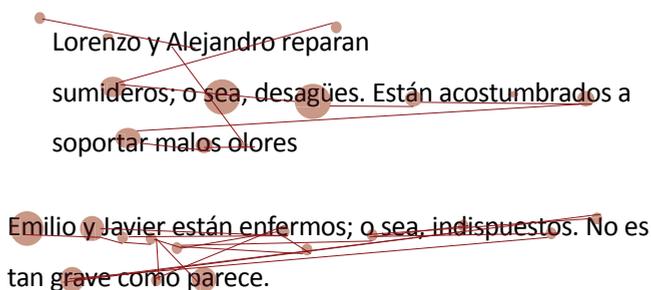


Figura 2.3. Patrones visuales de procesamiento en lectura (adaptada de Salameh Jiménez, 2022).

Como es lógico, los experimentos con *eye tracking* se han utilizado a menudo en la lectura, para estudiar el reconocimiento y la integración de palabras, considerando variables sintácticas (Clifton y Staub, 2011), semánticas (Bohan y Sanford, 2008) o pragmáticas (Filik, 2008), así como palabras compuestas, frases hechas, colocaciones y unidades compuestas de varias palabras (Carrol y Conklin, 2014).

Pero lo que más nos interesa, desde el punto de vista biolingüístico, es la información que la técnica de *eye tracking* nos puede proporcionar respecto al procesamiento del habla y el lenguaje en condiciones lo más naturales posibles. Una fructífera línea de investigación, en este sentido, es la de “mirar mientras se es-

cucha”, con procesamiento multimodal, como propone el paradigma del mundo visual (*visual world paradigm*): se presentan simultáneamente un enunciado oral y una escena visual con varios objetos (representados de forma más o menos realista). Uno de ellos corresponde al enunciado verbal; otro es un competidor que se parece al objetivo, y otros son distractores. Cuando la mirada se fija en el estímulo coincidente con el mensaje oral, se considera que se ha producido el acceso al léxico (Berends *et al.*, 2016). Según la revisión de Huettig y sus colegas, de 2011, este paradigma se había utilizado para estudiar tanto la producción como la percepción del lenguaje, desde el nivel fonológico y prosódico hasta el gramatical, léxico, pragmático y discursivo, también en participantes bilingües.

Últimamente se están multiplicando los experimentos en que la técnica de *eye tracking* se combina con la electroencefalografía, que describiremos en el siguiente apartado. Se consiguen así dos medidas biológicas simultáneas: el movimiento ocular y la activación neuronal (Hollestein y sus colaboradores [2018] presentan un corpus con este tipo de datos).

C) *Técnicas empleadas con los bebés*

Concluimos este apartado con una breve presentación de las técnicas que han permitido a los psicolingüistas conocer los procesos cognitivos subyacentes a la adquisición del lenguaje en los bebés mucho antes de sus primeras palabras. Hasta los años setenta del siglo pasado, todo lo que sabíamos dependía de la producción: de las primeras vocalizaciones intencionales a los balbuceos y, después, las primeras palabras. Pero en esa década se propusieron algunas técnicas, muy ingeniosas, que permitieron hacer descubrimientos sorprendentes sobre la capacidad de niños muy pequeños, recién nacidos, para detectar diferencias en los estímulos auditivos. Todas ellas se basan en un mismo principio, la *habitación*: acostumbrar al bebé a un determinado estímulo hasta aburrirlo, y entonces introducir otro nuevo. Diferentes indicadores corporales detectarán si ha notado ese cambio: el ritmo cardíaco y la frecuencia de succión aumentan, cambia la dirección de la mirada, y, cuando son un poquito mayores, giran la cabeza.

La medición de la amplitud de succión (*high amplitude sucking*) supuso un revulsivo en el ámbito de los estudios del lenguaje, cuando Eimas y sus colaboradores (1971) mostraron que bebés de muy pocos meses (de uno a cuatro) fueron capaces de discriminar las claves acústicas que diferencian /pa/ y /ba/ igual que los adultos: no de forma gradual, sino categorial, con una frontera clara y súbita entre unos estímulos sintéticos que, sin embargo, cambiaban poco a poco. La tecnología había sido desarrollada dos años antes: “nuestro aparato consistía en una tetina y un transductor de presión que proporcionaba registros poligráficos de todo el comportamiento de succión y un registro digital de la presión de succión superior a 18 mm-Hg” (Siqueland y DeLucia, 1969: 1145). Tras ese primer estudio llegaron

otros muchos, que confirmaron su utilidad y su fiabilidad, aunque últimamente esta técnica está siendo sustituida por otras –como la neuroimagen– que no requieren una conducta activa por parte del niño (Byers-Heinlein, 2014).

La mirada es otra de las respuestas conductuales que muestran hacia dónde dirige el niño su atención. En ella, o en el movimiento de toda la cabeza, se basan los paradigmas de tiempo de mirada (o, de forma más precisa, “mirada preferente con dos alternativas”, *intermodal preferential looking*) y giro operativo de cabeza (*head turn preference*). Vuelve a ser necesaria una fase de habituación, en la que se presenta al niño un estímulo repetidamente hasta que este deja de prestarle atención, y, en ese momento, se cambia el estímulo para comprobar si recupera la atención (gira la cabeza o vuelve la mirada). Aunque actualmente algunos estudios utilizan la técnica de *eye tracking* para registrar la dirección de la mirada de los bebés. En el diseño clásico de esta técnica (figura 2.4) bastaban una grabación en vídeo y la observación del investigador: el ensayo comienza atrayendo la atención del bebé hacia el punto central del escenario, donde están la videograbadora y el observador, mediante el parpadeo de la luz central y, si es necesario, moviendo en silencio una marioneta. A continuación, el títere desaparece, la luz central se apaga y una luz intermitente se enciende en uno de los dos lados del escenario. Cuando el bebé se gira hacia ese lado, comienza a sonar un estímulo auditivo, que continúa haciéndolo durante un par de segundos o hasta que el niño deje de prestar atención. Los sonidos de los dos altavoces son diferentes; la duración de la mirada de los niños hacia cada lado indica la detección de los dos tipos de estímulos.

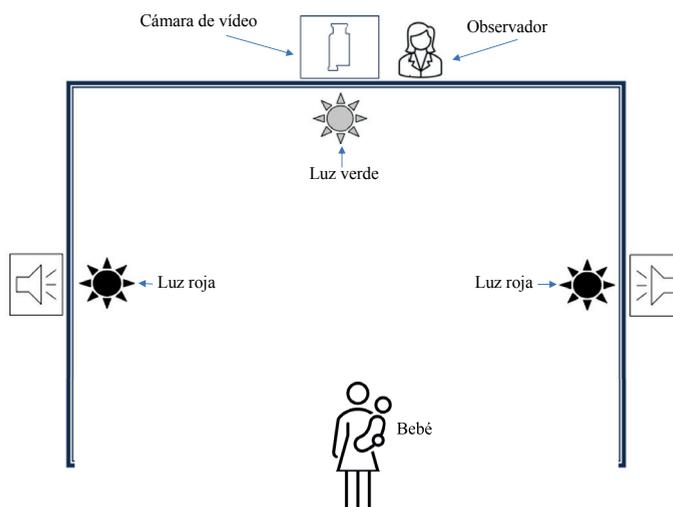


Figura 2.4. Diseño de la cabina de experimentación para el procedimiento de giro operativo de cabeza (*Head-Turn Preference*) (adaptada de Nelson *et al.*, 1995).

2.2. Técnicas neurolingüísticas y neurobiológicas

El lenguaje es uno de los objetos de estudio más relevantes para la neurociencia cognitiva actual, y los resultados que nos proporcionan las técnicas de neuroimagen aportan datos de gran interés para la lingüística. En 1929 Hans Berger publicó el resultado de unos registros que habían comenzado cinco años antes, cuando colocó a un joven de diecisiete años un osciloscopio de dos canales sobre la piel que le cubría una trepanación craneal (La Vaque, 1999). El resultado fueron los primeros electroencefalogramas (EEG), la técnica más antigua para el estudio del cerebro vivo. Cincuenta años más tarde, en 1975, se presenta la tomografía por emisión de positrones (PET, por sus siglas en inglés), y en 1979 se graban las primeras imágenes por resonancia magnética. Ya en la década de los noventa se multiplican las opciones, al sumarse las imágenes obtenidas por resonancia magnética funcional (fMRI) y mediante técnicas ópticas. Desde hace casi un siglo, por lo tanto, las técnicas de neuroimagen están permitiendo un conocimiento cada vez más preciso de la actividad cerebral necesaria para utilizar el lenguaje, no solo en la corteza, sino también en el cerebelo, el tálamo o los ganglios basales, sin olvidar los circuitos que los conectan, y con una precisión mucho mayor que la que permitían los datos sobre lesionados cerebrales, en los cuales, además, era imposible controlar los efectos de la plasticidad y la reorganización del cerebro.

Las técnicas para el estudio del cerebro en funcionamiento se dividen, habitualmente, entre las que se basan en mecanismos electromagnéticos y las que toman como base el funcionamiento metabólico de las neuronas. En la figura 2.5 pueden verse los equipamientos necesarios para las tres más utilizadas, que se describirán a continuación. Las dos primeras son de base electromagnética, y la tercera, metabólica (más información sobre todo este apartado en Marrero-Aguilar, 2022).

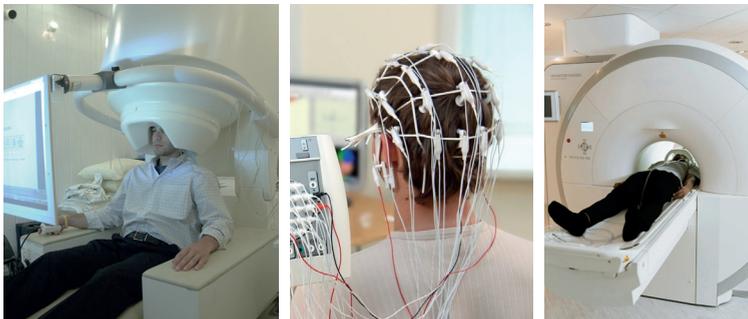


Figura 2.5. Sistemas de adquisición de neuroimágenes: magnetoencefalografía o MEG (izquierda), electroencefalografía o EEG (centro) e imagen por resonancia magnética funcional o fMRI (derecha).

2.2.1. Técnicas de base electromagnética

La actividad de las neuronas es eléctrica por naturaleza. Las técnicas de base electromagnética miden de forma directa esas descargas, en el caso de la *electroencefalografía* o la *electrocorticografía* (ECog), o el campo magnético asociado a las mismas, en el caso de la *magnetoencefalografía* (MEG).

El electroencefalograma (EEG) permite registrar, gracias a unos electrodos inocuos que se adhieren al cuero cabelludo, las ondas cerebrales que atraviesan el cráneo. Son el resultado de la actividad conjunta de amplias áreas de la corteza, o de un hemisferio entero, en frecuencias que van desde unos 2-4 Hz en las ondas delta hasta más de 30 Hz en las ondas gamma, pasando por las zeta, alfa y beta. En los últimos años, la perspectiva oscilométrica, que se basa en el estudio de estas ondas, ha desarrollado propuestas muy interesantes sobre sus relaciones con el procesamiento del lenguaje (sobre la que volveremos en el apartado 3.2.4). En suma, la EEG ha sido una metodología extensamente utilizada para analizar la cognición, en general, y el procesamiento cerebral del lenguaje, en particular, tanto considerando las ondas en su conjunto (Weiss y Mueller, 2003; Ganushchak *et al.*, 2011) como, especialmente, mediante uno de sus componentes: los potenciales evocados y, en concreto, los relacionados con eventos (*event-related potentials, ERP*), cuya obtención y principales componentes relacionados con el lenguaje nos muestra la figura 2.6. Recientemente se han empezado a recoger evidencias de una técnica de EEG mucho más invasiva, pero también más informativa: el estéreo EEG, o EEG intracortical, cuyos electrodos no se colocan sobre el cuero cabelludo, sino que se implantan profundamente en el cerebro (Arya *et al.*, 2019; Aron *et al.*, 2021).

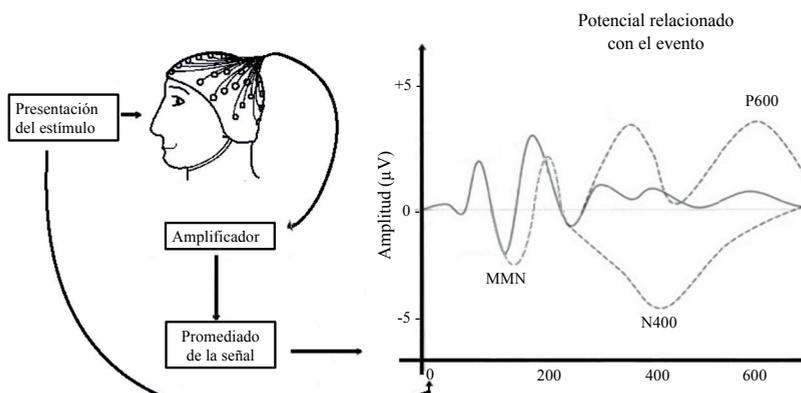


Figura 2.6. Representación de la metodología para la obtención de ERP, forma de onda promedio idealizada y principales componentes relacionados con el procesamiento del lenguaje (adaptada de Osterhout *et al.*, 1997, y Beres, 2017).

- *MMN (mismatch negativity)*: es un desplazamiento negativo de la onda que aparece en la corteza auditiva, bilateralmente, al cabo de 150-250 ms, cuando se nos presenta un estímulo diferente de los anteriores (se relaciona con el procesamiento auditivo; su amplitud disminuye y su latencia se prolonga en personas enfermas y mayores).
- *P200*: aparece en el mismo intervalo temporal, pero tiene amplitud positiva. En general, se relaciona con el procesamiento de alto nivel y la atención. Si el estímulo es una frase, aparece en las áreas de Broca y Wernicke, y tiene que ver con la identificación de clases de palabras.
- *N400*: es una deflexión negativa que aparece en la zona centroparietal, entre 300 y 500 ms tras la presentación del estímulo, cuando existen incongruencias contextuales con los estímulos precedentes. Si son oraciones, se relaciona con la integración semántica y el establecimiento de la concordancia gramatical.
- *P600 (amplitud positiva tras 500-600 ms)*: aparece ante errores, ambigüedades o incoherencias de carácter sintáctico, pero también ante anomalías semánticas o pragmáticas.

La EEG es el sistema más antiguo y posiblemente el más utilizado en neurolingüística, así como el más accesible económicamente y el que se instala más fácilmente. Además, lo que pierde en resolución espacial lo compensa en resolución temporal, puesto que detecta los cambios en los potenciales con una sensibilidad de milésimas de segundo.

Por su parte, la *electrocorticografía* (EcoG) capta mejor las ondas eléctricas neuronales y permite asignar la actividad a zonas concretas del cerebro, porque suprime la barrera del cráneo, al colocarse los electrodos directamente en la corteza cerebral (figura 2.7). Esta herramienta, unida a una interfaz computacional (*brain-computer interface, BCI system*) que se ha desarrollado muy recientemente (el primer caso fue presentado por Vansteensel *et al.*, en 2016), permite transformar la actividad neuronal en habla real, convirtiendo en fonemas ciertos patrones de actividad en la superficie cortical (Ramsey *et al.*, 2018). Sin embargo, para utilizarla es necesario efectuar una trepanación craneal, una intervención quirúrgica invasiva que hace que este método sea aplicable solo para personas cuya patología lo justifique.

La *magnetoencefalografía* (MEG), por su parte, registra los campos magnéticos que acompañan a la actividad eléctrica de las neuronas tras su paso por el cráneo y el cuero cabelludo. A esas medidas directas se les aplican procedimientos de reconstrucción de la fuente que permiten realizar una representación anatómica de las áreas de la corteza que se han activado. La ventaja de los campos magnéticos, frente a la actividad eléctrica, es que no sufre distorsiones al atravesar los tejidos biológicos; pero su principal limitación es la bajísima intensidad del campo magnético del cerebro, 10^8 o 10^9 veces menor que la del campo magnético terrestre o la de un frigorífico casero. De hecho, solo las dendritas apicales de las neuronas

piramidales consiguen ser registradas por los numerosos sensores del casco de un magnetoencefalógrafo. Aunque este aparato es mucho más costoso que el EEG (en todos los sentidos: económico, tecnológico y por su dificultad de uso) y requiere que el participante guarde una inmovilidad casi absoluta (hasta un pestañeo puede generar interferencias), ofrece una excelente resolución temporal y cierta información espacial. Por ello se ha convertido en otra de las fuentes habituales de información para estudios sobre el lenguaje, como muestra la revisión de Frye y su equipo (2009) o la más reciente de Dikker y sus colegas (2020).

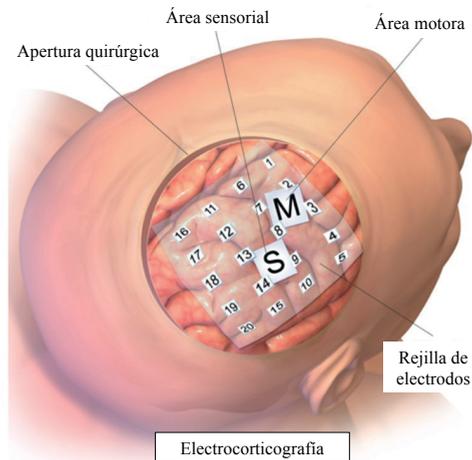


Figura 2.7. Red de electrodos intracraneal para electrocorticografía. ©BruceBlaus

Por último, tanto la estimulación eléctrica como la magnética pueden utilizarse para investigar el cerebro generando pulsos electromagnéticos que, al aplicarse sobre (o dentro de) la cabeza del participante, desencadenan una corriente eléctrica capaz de alterar el comportamiento previo de las neuronas en esa zona (figura 2.8). La estimulación eléctrica transcraneal (tDCS) puede ser invasiva, aplicada en el interior del cerebro (como tratamiento para enfermedades como el párkinson), o no invasiva, aplicada con electrodos sobre el cuero cabelludo (se emplea con frecuencia para el tratamiento logopédico de la afasia, o para la depresión y otros trastornos psiquiátricos [metaanálisis de Corrales-Quispicra *et al.*, 2020; Palm *et al.*, 2016, y Kekic *et al.*, 2016]). Con población sana se ha utilizado en tareas lingüísticas de denominación, fluidez verbal, lectura, etc. (más detalles en la revisión de Monti y sus colegas, 2013). La estimulación magnética transcraneal (TMS) se utiliza, por ejemplo, para comprobar, antes de las intervenciones quirúrgicas indicadas en las

epilepsias graves o los tumores cerebrales, las repercusiones funcionales (lingüísticas o de otro tipo) del área que se vaya a someter a cirugía (una revisión sobre su uso en estudios lingüísticos en la obra de Miniussi y sus colaboradores, 2010).

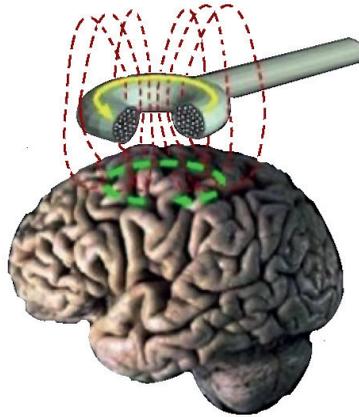


Figura 2.8. Estimulación magnética transcranial (adaptada de Eric Wassermann, 2009).

2.2.2. *Técnicas de base metabólica*

La otra posibilidad para descubrir qué zonas del cerebro se activan en el momento de realizar una determinada tarea es averiguar dónde es mayor el consumo metabólico. En este caso, se trata de medidas indirectas basadas en la premisa de que la actividad neuronal desencadenada por los procesos cognitivos incrementa el consumo de oxígeno y glucosa en las zonas activas del cerebro (es lo que se conoce como *acoplamiento neurovascular*). Los cambios en el nivel de oxígeno en sangre provocan variaciones en el magnetismo de la hemoglobina, que son captadas en una resonancia magnética, y también diferencias en la absorción o la reflexión de rayos de luz infrarroja, detectadas, a su vez, por los métodos ópticos. Pero para observar el consumo de glucosa es necesario inyectar al sujeto un *trazador*, esto es, una sustancia radiactiva capaz de visibilizar esa actividad, como se detallará a continuación. Todas estas técnicas ofrecen una buena resolución espacial, pero peor resolución temporal que las derivadas de la actividad eléctrica, ya que dependen de procesos metabólicos desencadenados después de la activación neuronal.

La técnica estrella en neuroimagen del lenguaje es, posiblemente, la imagen por *resonancia magnética funcional* (fMRI). Como muestra de ese predominio,

los estudios publicados utilizando esta metodología en un solo año permitieron la realización de un metaanálisis sobre más de cien referencias (Price, 2010). Para obtener representaciones gráficas utilizando fMRI es necesario, en primer lugar, generar mediante grandes imanes un potentísimo campo magnético (al principio era de medio tesla –T–, pero desde 2010 hay máquinas de 7 T; las más habituales son de 3 T, unas 60 000 veces el campo magnético de la Tierra), capaz de polarizar los átomos de hidrógeno del cuerpo, incluido el cerebro; a continuación, un sistema de radiofrecuencia envía una onda de radio que consigue desestabilizarlos; por fin, la máquina detecta el momento en que estos átomos vuelven a alinearse con el campo magnético. En el ámbito médico, y con fines diagnósticos, se utiliza generalmente la resonancia magnética estática; la que nos interesa a los lingüistas es la calificada como *funcional*, porque se registra mientras el sujeto realiza alguna tarea. Existen infinidad de experimentos que utilizan fMRI para estudiar el lenguaje, en sus diversas facetas: tiene una buena resolución espaciotemporal, no es invasiva y resulta relativamente accesible económicamente. Sin embargo, también presenta limitaciones: la máquina genera un ruido notable (de al menos 90-110 dB), lo que hace imprescindible la protección auditiva y dificulta la presentación de estímulos sonoros. Aunque se están haciendo muchos esfuerzos para solventar esta limitación (Ljungberg *et al.*, 2021), y desde hace años se han publicado trabajos con los estímulos presentados auditivamente (por ejemplo, Holmes *et al.*, 2021), lo cierto es que en la bibliografía sobre procesamiento lingüístico predominan las tareas basadas en la lectura.

La otra gran técnica tradicional entre las de base metabólica es la *tomografía por emisión de positrones* (PET). Requiere que el sujeto ingiera, inhale o se inyecte unos trazadores radiactivos que, aunque han de tener una vida muy corta (son sustancias que se desintegran al poco de su creación: el oxígeno O^{15} , tarda un par de minutos en hacerlo, mientras que la fluordesoxiglucosa, F^{18} , llega a permanecer activa casi dos horas), no dejan de presentar cierto carácter invasivo. Además, para ser producidos requieren un acelerador de partículas (un ciclotrón), lo cual, unido al escáner, encarece enormemente la instalación. A pesar de ello, se ha utilizado en estudios lingüísticos muy variados y, aprovechando que es silenciosa, especialmente en el ámbito auditivo, para estudiar la percepción de los sonidos del habla y el procesamiento fonológico (Johnsrude *et al.*, 2002). Para ver una presentación general de las investigaciones sobre el lenguaje que utilizan esta técnica, puede leerse el capítulo de Horwitz y Wise (2008) en el *Handbook of the Neuroscience of Language*.

Algunos estudios han comparado las ventajas y los inconvenientes de estas dos técnicas, PET y fMRI, para analizar la activación cerebral durante tareas lingüísticas. La figura 2.9 proviene de uno de ellos (Devlin *et al.*, 2000), cuya conclusión es que la fMRI requiere cierta cautela, porque pierde sensibilidad en zonas próximas a bolsas de aire, como ocurre en áreas críticas para el lenguaje, como el polo temporal y la superficie posterolateral de los giros temporales medio e inferior (véase

también Veltman *et al.*, 2000). No obstante, la información combinada de ambas técnicas ofrece datos consistentes, y se ha convertido en una tendencia en alza en los estudios neurolingüísticos.



Figura 2.9. Ejemplo de representaciones gráficas obtenidas mediante técnicas de base metabólica. Áreas cerebrales activadas (zonas oscuras) ante una misma tarea de categorización semántica mediante técnicas de PET (a) y fMRI (b) (adaptada de Devlin *et al.*, 2000: 593).

La resonancia magnética también está en la base de unas técnicas que permiten visibilizar no ya la actividad neuronal, sino la sustancia blanca del cerebro, que compone las fibras mielinizadas de los axones que conectan las neuronas. Se pueden obtener así representaciones de las conexiones neuronales, las redes que unen diferentes áreas del cerebro: son las imágenes de *resonancia magnética por difusión* (dMRI) y las imágenes con *tensor de difusión* (DTI), que constituyen las técnicas de *tractografía*. Tanto la dMRI como la DTI captan la disposición de los protones del agua en el cerebro. Los axones de las neuronas están recubiertos por una capa aislante, la mielina, que limita las posibilidades de difusión del agua en su interior y, por tanto, influye en el alineamiento de esos protones. Los cambios de dirección en los protones son detectados por el escáner y, tras aplicar una compleja computación, acaban representándose como líneas de colores (figura 2.10).

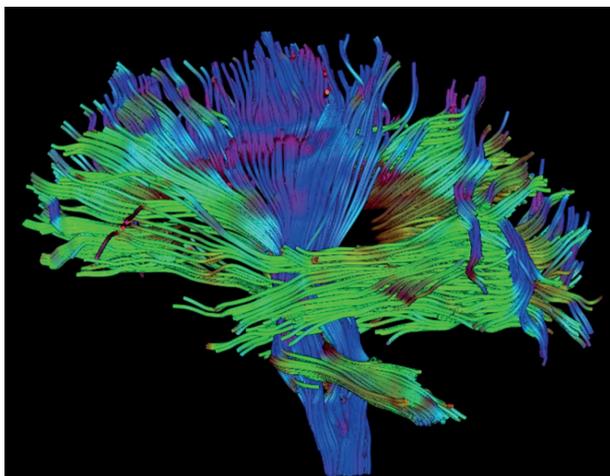


Figura 2.10. Reconstrucción tractográfica de las conexiones neuronales mediante imágenes de tensor de difusión (DTI), vista lateral. ©Aaron Filler

La tractografía es la técnica que ha permitido crear el Human Connectome Project, un gran reto internacional en neurociencia, abordado entre 2009 y 2014, cuyo objetivo fue crear y compartir la “matriz de conexiones” del cerebro humano. Uno de sus resultados es el *conectoma del lenguaje* (Dick *et al.*, 2014, Vassal *et al.*, 2016, Przeździk *et al.*, 2019), utilizado para estudiar el procesamiento del lenguaje en múltiples grupos de hablantes, tanto monolingües como bilingües (Mitsuhashi *et al.*, 2020; Mohades *et al.*, 2012; García-Pentón *et al.*, 2014 –con hablantes de español y euskera–; Hämäläinen *et al.*, 2017; Pliatsikas *et al.*, 2020, etc.).

El último grupo de técnicas de neuroimagen funcional basadas en los cambios metabólicos tiene una base óptica: la *espectroscopía funcional del infrarrojo cercano (fNIRS)* y la *tomografía óptica difusa de alta densidad (HD-DOT)*. Ambas miden las variaciones en la absorción o la reflexión de rayos de luz infrarroja producidas por los cambios en el nivel de oxígeno en la sangre. En sus revisiones sobre las aplicaciones de estas técnicas a los estudios lingüísticos, tanto Peelle (2017) como Quaresima y su equipo (2012) o Scherer y sus colaboradores (2009, en español) destacan sus principales ventajas: aunque no sobresalgan por la resolución espacial (mejor en HD-DOT que en fNIRS) ni por la temporal, son equipamientos relativamente asequibles, silenciosos y con cierto grado de portabilidad que permite a los participantes algún movimiento mientras realizan la tarea e, incluso, la interacción con otras personas (figura 2.11). Por eso se han utilizado para investigar el desarrollo del lenguaje en bebés y niños, así como en poblaciones que no pueden ser sometidas a imágenes por resonancia magnética, como los implantados cocleares, y en estudios de comprensión de habla sin interferencias de ruido.