

Modelos neurocomputacionales del lenguaje

Francisco Abelardo Robles-Aguirre

RESUMEN

La presente revisión discute la plausibilidad del análisis computacional de hipótesis sobre la relación cerebro-lenguaje. Se diseccionan propuestas provenientes de la lingüística y neurociencias, así como el origen y relevancia de los modelos neurocomputacionales. *Desarrollo:* los modelos computacionales inspirados en el funcionamiento cerebral han desatado un intenso debate al interior de las ciencias cognitivas sobre descripción y explicación de determinados procesos psicológicos, constituyendo el lenguaje uno de los procesos más complejos. La evidencia aportada por la lingüística ha sugerido una visión modular del procesamiento lingüístico con dos componentes generativos fundamentales: elementos léxicos almacenados en memoria y usados como bloques unitarios para la construcción de oraciones; y reglas aplicadas a aquellos elementos para construir formas morfológicas o sintácticas, acordes a la gramática de una lengua almacenados en sitio distinto. No obstante, los estudios neurocientíficos sobre la generación del lenguaje sugieren que ambos componentes funcionan en paralelo, proporcionando una visión de modularidad difusa, con procesamientos distribuidos en diversos circuitos cerebrales utilizando la inhibición recíproca como principal mecanismo de control neuronal, hipótesis conocida como conexionismo. Se exponen diversos modelos neurocomputacionales del lenguaje para mostrar la pertinencia de revalorar la teoría modular del procesamiento lingüístico. Por último, se propone que una teoría del lenguaje ya no puede ignorar las propiedades del sistema en el cual es implementado, puesto que se han descrito un creciente número de características de los sistemas conexionistas que parecen restringir las operaciones que realizan e inclusive las determinan.

Palabras clave: conexionismo, redes neurales, lenguaje, cerebro.

Neurocomputational models of language

ABSTRACT

This review discusses the plausibility of computational analysis of brain-language relations hypotheses. Proposals from linguistics and neurosciences are examined, as well as the origin and relevance of the neurocomputational models. *Development:* computational models inspired on brain dynamics have triggered an intense debate within cognitive sciences about various psychological issues. One of the most thoroughly examined issues has been language and the cognitive processes involved. Linguistic evidence points to serial processing within a modular framework and based on a generative system which uses two kinds of elements: lexical items stored in long-term memory as unitary blocks retrieved to be used as building blocks for sentence construction, and rules that are applied to build morphological or syntactic structures in accordance to the requirements of a particular grammar and stored somewhere else. However, neuroscientific studies on language generation suggest that both components work in parallel, providing a fuzzy modular view of language with parallel processing considering overlapped representations and reciprocal inhibitory mechanisms, pointing to a connectionist view. Several neurocomputational models dealing with the implementation of language processing on brain-like systems are exposed to demonstrate that certain aspects of modular language processing theory have to be revisited. Finally, it is proposed that a theory of language processing can no longer continue to ignore the properties of the system on which it is implemented, as there is a growing number of characteristics of brain-like systems which seem to restrict the operations they perform and even determine.

Key words: connectionism, neural networks, language, brain.

En sentido estricto el lenguaje puede ser definido como un componente interno del sistema mente/cerebro (también llamado I-lenguaje) que constituye el elemento fundamental de la facultad lingüística, y posibilita la utilización de un sistema comunicativo culturalmente específico¹. Así, la cuestión de cómo se organizan en el cerebro las operaciones lingüísticas que han sido descritas en las últimas décadas¹⁻⁵ requiere la postulación de hipótesis del procesamiento del lenguaje, pero no aisladas de las características del sistema sobre el cual se desarrolla ese procesamiento, sino reconociendo cuáles de esas propiedades lo condicionan y de qué modo lo logran.

El acelerado desarrollo de las ciencias computacionales permite hoy en día contar con una herramienta sumamente útil para evaluar las hipótesis planteadas y su instrumentación en un sistema con determinadas propiedades también supuestas. Las simulaciones por computadora son ahora un elemento indispensable para la formulación de conjeturas y valoración de supuestos en prácticamente todos los campos de la ciencia⁶ siendo la piedra de toque para la fundación de las ciencias cognitivas⁷. Es en este marco que la implementación de modelos computacionales inspirados en la arquitectura y funcionalidad cerebral han facilitado las discusiones con respecto a las propiedades cognoscitivas del lenguaje, instrumentación de las operaciones descritas por lingüística y mecanismos y vías propuestas por la psicolingüística y la neuropsicología, generando hipótesis alternativas y ayudando a reformular las teorías clásicas del procesamiento lingüístico.

El presente artículo presenta una breve revisión de los orígenes de este tipo de modelos conexionistas, se discuten los principios básicos y características que comúnmente se toman en consideración para generar simulaciones de procesos cognitivos. A continuación, se exploran algunas propuestas teóricas desde las neurociencias y lingüística que hacen pertinente la exploración de hipótesis del procesamiento lingüístico a través de este tipo de modelos. Después, se exponen algunos modelos conexionistas que se han elaborado para emular la adquisición de vocabulario o flexión verbal en niños. Por último, se discute la utilidad de estos modelos a la luz de la formulación de teorías de procesamiento lingüístico y se enumeran algunas de las dificultades que los conexionistas tienen que superar para

adentrarse en la explicación de la generación del lenguaje.

Orígenes de los modelos conexionistas

Diversas investigaciones en neurociencias de la relación entre distintas conductas y el funcionamiento de estructuras y circuitos cerebrales, han generado la hipótesis de que los fenómenos a los cuales son subyacentes determinadas formas de funcionamiento cerebral son una propiedad *emergente de las múltiples realizaciones* de un sistema neural. Dicha hipótesis es denominada *conexionismo* y ha dado lugar a la construcción de modelos matemáticos conocidos como *redes neurales artificiales* que intentan *reflejar o capturar datos experimentales duros acerca de partes específicas de sistemas nerviosos particulares*⁸ y que hoy forman un nuevo paradigma dentro de las ciencias cognitivas llamado *procesamiento distribuido en paralelo, neurocomputación o computación neural*⁹.

La concepción funcional de emergencia sobre la que se sustentan estos modelos matemáticos tiene sus antecedentes en los trabajos de neurofisiólogos del siglo XIX como JH Jackson o Alexander Bain y en el de neurocientíficos del siglo pasado como AR Luria, Donald Hebb y Karl Lashley⁹.

Alexander R. Luria, trabajó intentando encontrar hallazgos en contra de las posiciones localizacionistas de principios del siglo XX. Sus estudios sobre el funcionamiento de la neocorteza del encéfalo proporcionaron evidencia clínica y neurofisiológica sobre el carácter de distribución de la actividad cerebral⁹.

El fisiólogo canadiense Donald Hebb postuló en 1949; su hipótesis sobre las *asambleas de células*, como un conjunto de neuronas cuya conectividad entre ellas se ve incrementada mientras mayor sea el número de veces que se activen simultáneamente, consolidando circuitos reverberantes de diferentes *patrones* que estaban relacionados con diversas experiencias en el sujeto⁷.

Por otra parte, Karl Lashley elucidó la idea de *equipo-tencialidad* de la neocorteza cerebral que ejemplificaba el funcionamiento distribuido y cooperativo del cerebro⁹.

Fue en 1943, que Warren McCulloch y Walter Pitts elaboraron el primer modelo de redes neurales artificiales, el MCP, capaz de representar activaciones de respuesta con base en reglas simples como las funciones lógicas "Y" u "O" enunciadas en las tablas de verdadero-falso. Estos autores construyeron un modelo con base en resistencias y amplificadores para representar la variabilidad de conexiones sinápticas que denominaron *pesos sinápticos* y de unidades que representaban los somas neurales. Sin embargo, en el modelo MCP, la variación de conexiones debía de hacerse manualmente; es decir, los experimentadores las alteraban para lograr que el modelo cumpliera su función¹⁰.

Recibido: 3 junio 2010. Aceptado: 17 junio 2010.

Departamento de Neuropsicología y Grupos de Apoyo, Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía. Correspondencia: Francisco Abelardo Robles Aguirre. Departamento de Neuropsicología y Grupos de Apoyo, Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía. Insurgentes Sur # 3977. Col. La Fama 14269 México, D.F. E-mail: franciscoara@live.com

Hacia finales de los años cincuenta se realizó un gran esfuerzo para desarrollar estructuras reticulares con capacidad de auto-organización y dispositivos similares al MCP. El modelo más conocido de todos fue el que, en 1962, Frank Rosenblatt construyó y que denominó perceptrón. El perceptrón tenía como unidad de salida un MCP; pero que difería de aquél en la forma de las entradas, la función que podía cumplir y cambiar por sí mismo el valor numérico de algunas de sus conexiones. Las entradas del perceptrón tenían relación con una placa de celdas que podían activarse para generar líneas horizontales y verticales con base en la activación o inactivación de la unidad de salida; podía decirse que el perceptrón las *clasificaba* debido a que podía *percibir*las. Este modelo tenía como característica especial la capacidad de cambiar el valor de sus conexiones de entrada con base en una salida esperada¹⁰.

Sin embargo, en 1967 Marvin Minsky y Seymour Papert, a través de un análisis matemático realizado sobre la funcionalidad de los perceptrones, demostraron que fallaban en distintas tareas, una de ellas, de carácter relativamente sencillo: *la resolución de la tabla de verdad del "O-exclusivo"*. Ello traería como consecuencia limitantes serias en lo que un perceptrón podría resolver y en lo que podría aprender^{11, 12}. El entusiasmo que estos modelos habían despertado terminó, y ante la ausencia, en ese tiempo, de técnicas para entrenar redes con múltiples capas intermedias, los investigadores no continuaron desarrollando modelos conexionistas.

El descubrimiento, a partir de 1985, de técnicas o métodos de entrenamiento para redes neurales con múltiples capas intermedias, permitió el resurgimiento del interés en estos modelos¹². Hacia 1986, Rumelhart, y el grupo de procesamiento distribuido en paralelo (PDP) presentaron claras descripciones y aplicaciones de modelos de capas múltiples lo que hoy se conoce como retropropagación^{9, 11-13}. La idea de la retropropagación consiste en que, una vez que se ha calculado la discrepancia entre la respuesta deseada de una red y la que realmente genera, este valor de discrepancia se adiciona hacia las capas ocultas (es decir, comenzando por las conexiones inmediatamente anteriores a la salida de la red, hasta llegar a las de la entrada) incrementado o decrementando la fuerza de las conexiones según sea necesario¹⁰.

A finales de los ochenta hasta hoy, las ventajas tecnológicas y computacionales, así como los métodos de entrenamiento conceptualizados han generado un nuevo interés en los modelos conexionistas o redes neurales posibilitando nuevas arquitecturas y reglas de funcionamiento, pasando de los expuestos, cuyo aprendizaje es supervisado, a modelos no supervisados.

Características de los modelos conexionistas

Según Rumelhart, *et al*, las redes neurales artificiales proporcionan una visión radicalmente distinta de los conceptos básicos de representación, conocimiento y aprendizaje que caracteriza al paradigma de procesamiento secuencial de la información en las ciencias cognitivas. La representación en los modelos conexionistas se concibe de forma activa y consiste en el patrón de activación existente entre las unidades de la red, en tanto que el procesamiento se refiere a la evolución en el tiempo de los estados de activación de los múltiples nodos o unidades. El conocimiento, por otra parte, está distribuido entre múltiples conectadas entre sí y cada una de estas unidades participa en la representación de diferentes conocimientos, siendo la *interpretación de la realidad fruto del intercambio de señales entre estas unidades*⁹. Por último, el aprendizaje consistirá en *la adquisición de fuerzas de conexión que produzcan adecuados patrones de activación en las circunstancias adecuadas*⁹.

La estructura de estos modelos matemáticos está determinada por las relaciones establecidas entre sus componentes fundamentales: unidades o nodos procesadores neurales; conexiones entre estos; y su organización en capas de unidades.

Las unidades o nodos neurales: están inspirados en la evidencia neurocientífica del funcionamiento de las neuronas biológicas. Así, poseen distintos valores expresados numéricamente tales como la entrada neta, activación, salida y umbral de disparo que tratan de imitar las características de primer orden de las neuronas biológicas^{12, 14} como la recepción de una cantidad de estimulación proveniente de neuronas aferentes, la posibilidad de activarse si esa estimulación es *suficiente* para provocar la despolarización de su membrana y la propagación de un potencial de acción o *disparo* neuronal, generando una señal eferente.

La entrada neta en un nodo neural, es el número que representa la sumatoria del producto de todas las activaciones de unidades que tienen conexiones aferentes con este, por cada una de sus conexiones. La activación es el número que nos indica si la unidad está activa o inactiva, por lo general tiene sólo dos estados (0, 1)¹. El umbral de disparo es otro valor numérico contra el que se ha de comparar la entrada neta, si esta última es mayor que el umbral, se decidirá si la unidad procesadora dispara; es decir, si se manda o no el valor de salida; que es el número que el elemento procesador utilizará como fuerza de *disparo* para propagarse a otras unidades con las que tenga conexión^{14, 15}.

Las conexiones representan invenciones axónicas entre las neuronas biológicas. Las conexiones tienen variabilidad dependiendo de la estimulación y simulan el resultado de los mecanismos celulares de modificación

sináptica de los cuales parece depender el aprendizaje¹⁶. Esta variabilidad se lleva a cabo a través del concepto de peso sináptico o conexión, que es un número que se incrementa o decrementa de acuerdo a una regla de aprendizaje instaurada en el modelo. De esta manera, el peso de la conexión se multiplica por el valor de salida de la unidad preconexión (*presináptica*), este producto proveniente de una sólo unidad preconexión, se suma al de todas las unidades de preconexión para obtener el valor de entrada neta, como ya se mencionó con antelación^{12,14,15}.

Las capas de unidades son agrupaciones de elementos procesadores neurales alineados verticalmente que pueden o no tener conexiones entre ellos, pero que poseen eferencias hacia unidades de otras capas. Se reconocen al menos dos capas en toda red neural: la capa de entrada, y salida, y entre ellas pueden existir la cantidad de capas intermedias que se deseen (figura 1). Las capas de entrada con frecuencia; no son contabilizadas como tales pues sus unidades sólo cumplen con la función de tener un valor de salida o de activación y no llevan a cabo procesamiento alguno^{12,15}.

Las capas de salida son las que elicitan la respuesta de la red neural, y es con base a ellas que puede cuantificarse lo adecuado o inadecuado de su funcionamiento. A la forma esquematizada que adquiere una red neural de acuerdo al número de capas, unidades o elementos procesadores neurales y las conexiones entre estos, se le denomina arquitectura.

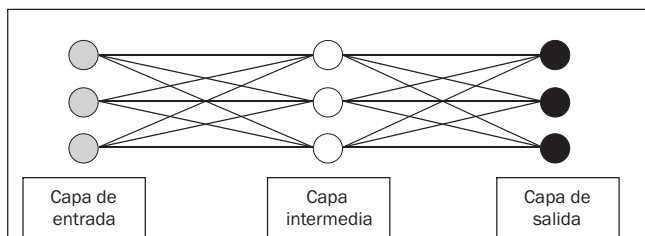


Figura 1. Distintas capas de una red neural. La capa de entrada o nodos de entrada constituye el lugar donde se recibe información. La capa de salida es el patrón de activación en respuesta a la entrada introducida. La capa intermedia es también denominada oculta y es donde recae la mayor carga del procesamiento.

Las capas de salida son las que elicitan la respuesta de la red neural, y con base a ellas se puede cuantificarse lo adecuado o inadecuado de su funcionamiento. A la forma esquematizada que adquiere una red neural de acuerdo al número de capas, unidades o elementos procesadores neurales y las conexiones entre estos, se le denomina arquitectura.

La forma en que los componentes de las redes interactúan es siguiendo básicamente dos reglas:

- Activación o función de salida.

- Función de aprendizaje.

La regla de activación: se refiere a la ecuación que indica el procesamiento llevado a cabo por el elemento procesador neural. Utiliza los valores numéricos propios de la unidad neural y, con base en la comparación de entrada neta y el umbral, determina si existirá o no disparo y forma en que este se dará¹⁷ (figura 2). Un ejemplo es:

$$f(j) = 1, \text{ si } \left[\sum_{i=1}^n e_i w_{ij} \right] > \theta$$

En donde la función de salida de la unidad funcional *j* será igual a 1 si la sumatoria del producto de todas las activaciones presinápticas (*e*) por su correspondiente peso de conexión (*w*), es mayor que el umbral de la unidad *j* (*θ*).

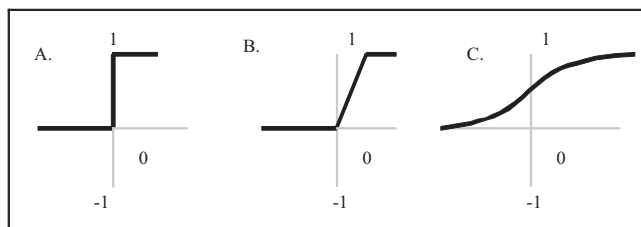


Figura 2. Funciones de activación más comúnmente utilizadas en la instrumentación de redes neurales artificiales. En **A.** está la función tipo escalón; en **B.** la función de umbral lógico; en **C.** una función sigmoide.

La regla de aprendizaje es la ecuación que indica el procedimiento a seguir en una determinada red para precisar si se han de realizar ajustes en los valores numéricos correspondientes a los pesos de las conexiones y la manera de cómo se harán.

La importancia de esta ecuación radica en la posibilidad que abre para que la red pueda ofrecer una solución adecuada o esperada a determinado problema planteado. Esta regla de aprendizaje comúnmente varía con el modelo de que se trate, pero de manera gruesa se habla que existen reglas que implican un aprendizaje supervisado y que permiten a la red un aprendizaje no supervisado¹⁷.

El aprendizaje supervisado consiste en el ajuste de los pesos sinápticos de acuerdo a una salida deseada. Por ejemplo, se espera que las unidades de la capa de salida disparen siempre, que las de la capa de entrada se activen. Si las de la capa de salida no se activan, entonces no se produce la salida deseada y deben ajustarse los pesos hasta que la red lo logre^{14,17}.

En el aprendizaje no supervisado no se utiliza ninguna salida deseada y la red debe ser capaz, por ejemplo, de responder de la misma manera ante distintas formas de activación de las unidades de entrada siempre que estas

varíen muy poco. Así, el ajuste de pesos se obtiene únicamente a partir de la activación de determinadas unidades de la capa de entrada a un cierto número de veces^{12,14,17}.

Aproximaciones cognitivas al lenguaje

Desde el siglo pasado, el estudio del lenguaje se ha desarrollado como un tópico fundamental en el surgimiento de las ciencias cognitivas. La lingüística y la psicolingüística como disciplinas encargadas de la descripción y explicación del fenómeno lingüístico, la primera y de adquisición y expresión de la lengua, la segunda; dieron origen y se constituyeron en parte de la teoría del procesamiento simbólico de la información. De ahí que su abordaje y explicación del lenguaje se circunscribió, desde la revolución Chomskyana hasta la penúltima década, a la utilización de un reservorio de *ítems* de lenguaje en memoria y una serie de reglas que permitían operar sobre esos *ítems* lingüísticos como símbolos⁷.

Ante el advenimiento de modelos conexionistas y estudio de los fenómenos de adquisición de vocabulario o de flexión verbal en la lengua inglesa, se desataron objeciones desde la perspectiva del procesamiento simbólico de la información. Estas se han centrado en lo inapropiado del abordaje a nivel conexionista para lenguaje y cognición para el entendimiento de la organización del procesamiento lingüístico¹⁸. Esto no implica negar que el dispositivo de adquisición de una lengua o la facultad lingüística estén implementados en un sistema de neuronas densamente interconectadas, ni siquiera que algunos aspectos del procesamiento del lenguaje tengan lugar de un modo distribuido, sino simplemente, que el procesamiento lingüístico puede ser mejor entendido si se aborda desde una perspectiva de procesamiento de símbolos manipulados por reglas¹⁹. La crítica más férrea ha utilizado un concepto central de la lingüística Chomskyana, el empobrecimiento de la exposición al estímulo lingüístico, surgido del debate entre Chomsky y el conductismo Skinneriano¹². Los cognitivistas tradicionales sostienen que los modelos conexionistas no proveen las restricciones necesarias para garantizar que las redes encuentren la forma apropiada de procesamiento lingüístico con base en una exposición reducida a los estímulos y de acuerdo a la enorme variabilidad de estos¹⁹.

Sin embargo, el apoyo más sólido a la perspectiva conexionista proviene de investigaciones en neurociencia cognitiva centradas en el lenguaje. Poeppel y Hickok²⁰, concluyen, a partir de un cúmulo de evidencia de trabajos de investigación en el campo de las relaciones cerebro-lenguaje, que el circuito Wernicke-Lichteim-Geschwind, está siendo reformulado para dar cuenta del procesamiento lingüístico en términos de un conjunto de circuitos que consideren a Broca y Wernicke como áreas cerebrales heterogéneas sin una función determinada y específica sino

como agrupaciones de distintas subregiones del giro inferior frontal (GIF) y del giro superior temporal (GST). Estos autores consideran que los modelos actuales incorporan a regiones cerebrales fuera de las áreas perisilvianas clásicas como claves para el lenguaje y no se restringen al hemisferio izquierdo. Friederici²¹, igualmente, resalta las densas conexiones entre el GIF y el GST, a través de la sección dorsal del fascículo arqueado y vía el fascículo superior longitudinal, específicas para el humano, en el contexto de su propuesta del procesamiento lingüístico. Su hipótesis intenta relacionar las descripciones lingüísticas del alemán y inglés con un mapa distribuido de regiones corticales y los tractos que las conectan. Para Friederici^{21,22} el procesamiento semántico y sintáctico es llevado a cabo en amplios circuitos que involucran el GIF y GST, en particular, las áreas de Brodmann 45/47 y el giro medial temporal para el procesamiento semántico y el área de Brodmann 44 y GST para el sintáctico.

Un modelo neurocientífico más reciente del lenguaje, generado a partir de un meta-análisis realizado por Shalom y Poeppel²³, plantea que las regiones frontales tradicionalmente consideradas en el lenguaje, críticamente participan en la síntesis propia de la codificación articulatoria requerida para la producción. Proponen, además, que las regiones temporales que comúnmente se asociaban a la comprensión, parecen estar jugando un papel importante en la memorización de *ítems* léxicos y facilitando su recuerdo. Por último, Shalom y Poeppel³ formulan la idea de que las áreas parietales, (que en el modelo clásico no tenían una participación trascendental), se encargan del análisis de los *ítems* memorizados en el temporal, y sugieren un patrón de procesamiento que va, en cada uno de los lóbulos postulados, desde las zonas más dorsales para las representaciones y operaciones fonológicas, mediales para las morfosintácticas y las inferiores para las semánticas.

En consonancia con la evidencia anterior, la neurociencia computacional ha propuesto modelos descriptivos del procesamiento lingüístico a partir de dos perspectivas disímiles. Una perspectiva localista, en donde nodos o unidades individuales procesan el aprendizaje de palabras y lo almacenan o, por otra parte, desde una perspectiva totalmente distribuida, en donde la representación consiste en patrones complejos de activación. Esta perspectiva asume *a priori* la existencia de nodos distintos para *ítems* diferentes (como elementos léxicos, segmentos o palabras), y del preestablecimiento de densas conexiones entre ellos. Esta arquitectura permite mantener activas representaciones de modo paralelo evitando un solapamiento de la información contenida en estas. La perspectiva de representaciones distribuidas, por otra parte, plantea que las representaciones de *ítems* relevantes emergen como patrones distribuidos con conexiones reforzadas en los nodos de la red, por lo que el mismo conjunto de unidades

o nodos de la capa oculta codifica una variedad de ítems lingüísticos a través de distintos patrones de activación graduados. Esto da como resultado la imposibilidad de separar diferentes representaciones de ítems lingüísticos cuando estos se encuentran activos de manera simultánea²⁴.

Redes neurales artificiales del procesamiento gramatical

En 1986, Rumelhart y McClelland plantearon un modelo clásico conexionista por retropropagación para dar cuenta del desarrollo de la flexión verbal del pretérito para la lengua inglesa¹³ (figura 3). A partir de la evidencia científica en el análisis de *corpus* de expresión oral en niños, dedujeron que los errores en la flexión verbal podían ser explicados por la habilidad de los hablantes para utilizar el sonido de un verbo para predecir la forma de flexión en pasado. Este modelo retaba la visión tradicional del desarrollo de la flexión verbal en inglés que había sido planteada desde la perspectiva de la existencia de reglas simbólicas para la construcción gramatical de la lengua^{1,2} y que, desde una perspectiva mentalista han sido ubicadas como parte del dispositivo cognitivo del lenguaje^{3-5,8} o de la facultad del lenguaje^{1,25-29}. Esto dio inicio al debate por la explicación de los errores en la flexión del pretérito para el habla inglesa. Los datos recabados de la expresión oral describían que los errores tomaban la morfología de una “U” durante el desarrollo del habla¹⁹. En una primera etapa, los niños parecían utilizar muy pocas formas verbales en pretérito, sólo los verbos más con frecuencia utilizados y estos, coincidentemente para el habla inglesa, son irregulares en su mayoría. De modo que los niños parecen tener un desempeño con escasos errores utilizando pocos verbos. En una siguiente etapa, el número de verbos flexionados en pretérito se incrementa de manera considerable y aparecen entonces muchos equívocos en la flexión verbal, en particular, la flexión regular de verbos que son irregulares, fenómeno conocido como *sobrerregularización*. Por último, hacia la adolescencia, la *sobrerregularización* es corregida y la flexión se ajusta a la gramática de la lengua¹⁹.

La visión conexionista de la flexión verbal en pretérito planteada a partir del modelo de Rumelhart y McClelland¹³ presentaba un punto de partida radicalmente distinto del

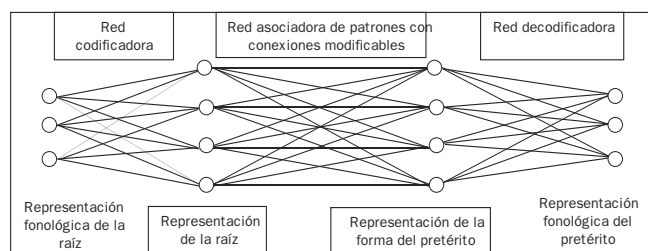


Figura 3. Estructura básica del modelo de Rumelhart y McClelland (1986).

enfoque prominente en las ciencias cognitivas de ese tiempo, pues asumía que la flexión verbal de los verbos regulares e irregulares era llevada a cabo por el mismo tipo de procesos y que estos procesamientos compartían los mismos recursos computacionales. Sin embargo, la aproximación fue criticada por proponer conclusiones sin tomar en cuenta aspectos metodológicos de capital importancia. Por ejemplo, durante la primera etapa de entrenamiento de simulación, utilizaron 10 verbos de alta frecuencia para el inglés, de los cuales 8 eran irregulares, esto es acorde a lo reportado en el desarrollo normal de la flexión. Para la segunda etapa, en cambio, utilizaron 410 verbos donde 80 % eran regulares. De este modo, el modelo no tomaba en cuenta la continuidad en la expansión del vocabulario presente en la adquisición al incrementar inmediatamente el número de verbos utilizados, y más aún, acrecentar de manera desproporcionada el porcentaje de regulares-irregulares presentes en el habla de un menor en la etapa de *sobrerregularización*, puesto que el número de regulares utilizados oscila entre el 45 al 60 % y nunca hasta el 80 %^{18,19}.

Un modelo más reciente, propuesto por MacWhinney y Leinbach³⁰, tomó en cuenta varias de las críticas realizadas al modelo clásico de Rumelhart y McClelland¹³ y empleó un procedimiento de entrenamiento de la red utilizando verbos a partir de un *corpus* de frecuencias de uso del inglés, representaciones fonológicas y de nuevo el algoritmo de retropropagación. Con un entrenamiento continuo hasta la correcta ejecución de la flexión verbal, este modelo no desplegó un perfil de aciertos en “U”. Aunque sí presentó *sobrerregularizaciones* y su posterior resolución, no existió una fase inicial con escasos errores.

Plunkett y Marchman³¹, por otra parte, investigaron la adquisición de la flexión verbal en pasado de una red neural de tres capas que había sido entrenada con un conjunto creciente de verbos del inglés. La estructura de los verbos era corta e implicaba sólo tres fonemas, los verbos eran asignados a uno de cuatro tipos posibles de transformación para generar la flexión correcta sin cambio (ej. *hit-hit*), cambio vocálico (*draw-drew*), cambio arbitrario (*go-went*) y regulares (*look-looked*). Las simulaciones consideraron un entrenamiento creciente utilizando nuevos verbos para emular la expansión del vocabulario. Durante el proceso de aprendizaje el modelo generó *sobrerregularizaciones* afectando su actuación, produciendo una curva de ejecución tipo “U”.

Un enfoque distinto siguió Westermann^{32,33}, al adicionar al proceso de adquisición de vocabulario y flexión verbal, aspecto de desarrollo neuronal que le acompaña y que, al mismo tiempo, condiciona dicha adquisición. Utilizando el *corpus* de inglés de MacWhinney y Leinbach³⁰, se inició el entrenamiento con una arquitectura de red sin capas intermedias, es decir, utilizando únicamente una capa de entrada y otra de salida interconectadas. Una vez

que se alcanzó una ejecución estable, se introdujo una capa intermedia completamente interconectada y se continuó el entrenamiento hasta estabilizar de nuevo su actuación. Este procedimiento se repitió hasta que todas las formas verbales fueron correctamente flexionadas. Estos autores reportaron además el fenómeno de errores en ejecución de la forma “U”.

Los modelos expuestos han intentado explicar la particular morfología de los errores de sobrerregularización observada en niños a partir de una postura típicamente conexionista, en donde los mismos recursos de procesamiento son utilizados para los verbos regulares y para los irregulares, en el entendido de que existe una competencia entre la flexión regular e irregular resultado de que comparten los recursos cognitivos. Esto no implica que los verbos regulares e irregulares sean procesados del mismo modo. De hecho, regulares e irregulares son procesados de forma distinta porque desencadenan distintos patrones de actividad de la red dependiendo de la fonología de la raíz verbal. De este modo, la habilidad de la red para responder a verbos desconocidos es determinada por la similitud fonológica de la nueva raíz a la fonología de las raíces conocidas, y el verbo desconocido será flexionado del mismo modo que el verbo conocido¹⁹.

En esta discusión, resulta importante considerar una de las alternativas teóricas expuestas ante la visión conexionista del procesamiento gramatical de la flexión verbal que se ha vertido desde la posición contemporánea de la lingüística cognitivista tradicional. Pinker y Price¹⁸, en el marco de su propuesta de mecanismo dual (*words and rules*) asumen que las formas regulares de la flexión son producidas por una regla mental (“adicionar -ed”), mientras que las formas irregulares son aprendidas y almacenadas en la memoria. Sin embargo, este almacenamiento de ítems léxicos propios de la irregularidad no contemplaba la existencia de *familias* de irregularidades que comparten elementos fonológicos en la raíz del verbo y/o en el segmento léxico indicativo del tiempo, tales como ‘ring’ y ‘sing’. El hallazgo de que tales *familias* de verbos protegen a sus miembros de la sobrerregularización durante la adquisición indican alguna forma de interacción entre diferentes formas de irregulares. Esta ha sido la razón principal para que Pinker y Ullman³⁴ consideren que el almacenamiento léxico de los ítems irregulares, para formas fonológicamente similares, genera representaciones en solapamiento y, por lo mismo, estas formas se refuerzan entre sí. El lexicón queda entonces definido como un sistema que combina propiedades asociativas de tipo conexionista con representaciones estructuradas semántica, morfológica, fonológica y sintácticamente. Es decir, se concibe como un sistema con asociaciones léxicas para la flexión irregular y reglas para la conformación de la forma correcta del verbo en la flexión regular. Esta hipótesis adicionó un principio de bloqueo

cuando se trataba de decidir entre aplicar un mecanismo para los verbos regulares o para los irregulares ante la llegada de un nuevo verbo. Por ejemplo, cuando el verbo es desconocido ambos mecanismos se encuentran en posibilidad de actuar y es sólo la retrotracción exitosa de una entrada a partir del lexicón asociativo, la que bloquea el mecanismo de aplicación de regla regular. Sin embargo, esta propuesta requería la aceptación de una entrada léxica de activación parcial (ej. verbos desconocidos pero parecidos fonológicamente a un verbo irregular) podría bloquear la aplicación dicha regla regular y ello lleva a preguntarse por qué no se sobrerregularizan los verbos regulares que son similares a los irregulares (como *blink-blinked* con *sink-sank*, *stink-stank* o *sing-sang*). La respuesta de Pinker^{34,35}, fue incluir en el lexicón algunos verbos regulares, e incluso identificar algunos de los factores por los cuales tales formas regulares han de ser almacenadas: **a** cuando se trata de formas regulares que tienen una alternativa irregular (ej. *dreamed/dreamt*) o de **b** formas regulares que tienen semejanza con las irregulares (como *blink*). Esta última adición al esquema planteado originalmente en Pinker y Price¹⁸, se asemeja bastante a las propuestas de Jackendoff^{36,39}, lingüista discípulo de Chomsky, con respecto a flexibilizar los mecanismos basados en reglas hacia la utilización del lexicón de tipo asociativo como base del procesamiento lingüístico y su operación fundamental: la combinación de elementos léxicos almacenados en memoria, hipótesis que ha recibido evidencia a favor desde estudios con resonancia magnética funcional^{40,41,42}.

Si se considera que en las últimas propuestas de la aproximación cognitivista tradicional como en los modelos conexionistas, existe un acuerdo para considerar que existe un componente asociativo implicado en el procesamiento lingüístico, heredado de la base neuronal sobre la que se lleva a cabo el procesamiento (es decir, que el lenguaje es facilitado por la arquitectura del sistema neuronal), queda entonces plantear el debate de la descripción específica de ese componente. Este debate fue esbozado en el apartado anterior al referirnos a la dicotomía entre una perspectiva localista y representaciones distribuidas. A este respecto, cabe destacar el modelo propuesto por Garagnani²⁴, diseñado para emular el aprendizaje de cuatro palabras representadas con un patrón de activación diferenciado. Ubicado dentro de la disputa localismo-representación distribuida, su interés principal fue mostrar que el aprendizaje Hebbiano en una red de cuatro capas ocultas (100 nodos por capa) generaba conjuntos de nodos constituidos como huellas mnémicas diferenciadas anatómicamente, pero también con patrones de representación distribuida (figura 4).

Después de un intenso entrenamiento a sus redes, a partir de más de 2,000 presentaciones, los resultados de su trabajo mostraron mecanismos subyacentes a la

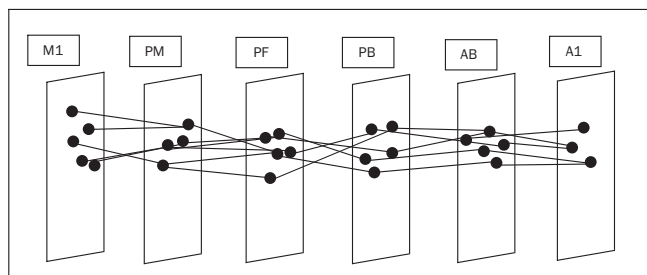


Figura 4. Representación esquemática del modelo de Garagnani, Wennekers y Pulvermüller (2009). Pueden observarse las seis regiones simuladas como capas con conexiones azarosas activadas a partir de un patrón de entrada y uno de salida. M1: corteza motora primaria; PM: corteza promotora; PF: corteza prefrontal inferior; PB: región auditiva terciaria; AB: región auditoria secundaria; A1: área auditiva primaria.

emergencia de esas huellas anémicas. Específicamente, encontraron que existía: **1.** Reclutamiento de nodos y consolidación de sus conexiones creciente durante las primeras etapas definiendo el conjunto de nodos pertenecientes a la huella mnémica de manera simultánea a **2.** Inactivación de los nodos con menor actividad situados a la periferia de los conjuntos nodales de las huellas anémicas en la últimas etapas del entrenamiento. La conjunción de estos fenómenos llevó a la separación gradual de las ensambladas de nodos (huellas), su decremento de tamaño y reducción del solapamiento.

Los hallazgos de ese estudio, aunque no concluyentes, implican que la emergencia espontánea de representaciones léxicas distribuidas en la corteza cerebral, pero diferenciadas anatómicamente, posee tanto componentes de representación distribuida como especialización de conjuntos de neuronas formando circuitos (localismo), situación análoga a la codificación cerebral que ocurre en otros procesos cognitivos.

Consideraciones finales

En el marco de la búsqueda de una explicación óptima del fenómeno lingüístico, la disputa entre alternativas de procesamiento simbólico y conexionismo desarrollada durante las últimas tres décadas ha propiciado que ambas perspectivas se aproximen en sus posicionamientos. Parece cada vez más claro, por ejemplo, que los modelos conexionistas han de dar cuenta de la elección entre opciones de aplicación de un determinado procesamiento, al mismo tiempo que las hipótesis simbólicas tienen que ser más sensibles a los detalles de procesamiento léxico admitiendo una buena dosis de paralelismo. En este sentido, la propuesta de arquitectura paralela propuesta por Jackendoff³⁷, aunque no pretende otorgar una respuesta determinante a dicha discusión, propone un acercamiento desde una teoría lingüística que permite además adentrarse en el procesamiento cognitivo del lenguaje^{28,29,37-39}. Así, por ejemplo, el

procesamiento gramatical implicado en la flexión es, al mismo tiempo, un ítem léxico, una regla de interfase y para así combinar un afijo y nombre o verbo. De este modo, debe admitirse que las piezas de una estructura sintáctica se encuentran almacenadas en la memoria de largo plazo, lo que conlleva un cambio radical con respecto a la visión cognitivista tradicional; palabras, afijos regulares, construcciones y frases ordinarias pueden ser expresadas en un formalismo común, como piezas de una estructura almacenada en memoria. De este modo, el lexicón no sería un componente separado de las reglas que se utilizan para ensamblar las oraciones. La distinción tradicional entre *palabras* o lexicón y *reglas* se viene abajo al reconocer que se trata sólo diferentes tipos de elementos en memoria. De este modo, mientras que los elementos léxicos pueden ser entendidos como reglas de interfase idiosincráticas (interfase entre la estructura fonológica y sintáctica o semántica, por ejemplo), las denominadas *reglas* (como “*adiciona -ed*”) parecen ser reglas de interfase más general (que permiten la formación de la estructura sintáctica a partir de la fonológica, o la semántica a partir de la sintáctica), o estipulaciones sobre las posibles formas de estructuración de un componente u otro³⁷⁻³⁹.

Para el mismo Jackendoff^{36,37}, el acceso léxico en la percepción lingüística no es serial ni sigue un procesamiento típicamente simbólico; una cadena de fonemas activa todas las estructuras semánticas asociadas con ella; sea cual fuere su relevancia con el contexto semántico concreto, y permanecen activas durante un breve período de tiempo en memoria de trabajo. Del mismo modo, en lo que respecta a las estructuras sintácticas que permitan fuentes de generación de oraciones en paralelo ligadas por distintas interfases, con inhibición recíproca entre estas interfases, Jackendoff³⁷ supone mayores ventajas para modelos conexionistas a partir de la posibilidad que tienen de realizar análisis sobre la base de la competencia entre opciones.

Sin embargo, tres problemas elementales parecen interponerse en el camino de los modelos conexionistas y su explicación del lenguaje al pasar a operaciones lingüísticas que van más allá de la flexión o identificación de ítems, aún a pesar de la inclusión de principios de procesamiento simbólico de la información. El primero de ellos tiene que ver con la dificultad para separar la memoria de trabajo de la memoria a largo plazo. Esta separación parece indispensable para dar cuenta de la linealidad requerida durante la construcción de una frase, una vez que los múltiples ítems léxicos han sido activados. Es decir, para poder construir una oración específica como: **1.** *El perro persigue al gato* y una que utilice los mismos elementos pero se identifique como distinta **2.** *El gato persigue al perro*, es necesario que la activación ocurra en dos momentos distintos, quizá inclusive en dos arquitecturas diferentes: la

activación de los patrones de acceso léxico de la memoria de largo plazo y la activación en el orden necesario o de la manera necesaria que codifique un patrón de linealidad determinando que para **1.** *Perro* es un elemento que va antes de *persigue*, mientras que para **2.** Es a la inversa. Un ejemplo más de la necesidad de separar ambos tipo de memoria puede ser sugerido por la aparición de un mismo elemento léxico en dos momentos distintos de la oración. La inexistencia de un modulo aparte de memoria de trabajo impediría identificar correctamente la aparición doble del ítem.

El segundo problema fundamental es la probable imposibilidad de los modelos conexionistas para dar cuenta del aprendizaje en un sólo ensayo a partir de una serie combinatoria de elementos ya aprendidos, pero nunca presentados del mismo modo. Por ejemplo, el que un oyente escuche: *nos vemos a las ocho en el café Pierrot* una sola vez, aún cuando no lo haya escuchado antes, es suficiente para que pueda presentarse al café mencionado a la hora acordada, y no equivocarse presentándose en otro café en donde siempre se ha reunido con esa persona. El problema básico es que los modelos conexionistas tienden a clasificar el nuevo patrón de entrada (ej. la frase) de acuerdo a un patrón parecido ante el cual han sido entrenados, generalizando una respuesta anterior en lugar de generar una nueva respuesta^{37,38}.

El tercer y último problema es el codificar variables que permitan relaciones generales. Por ejemplo, la dificultad para codificar de manera pertinente, además de los fonemas de una palabra o a la palabra como tal, o inclusive una asociación semántica, el que esta palabra pertenezca a una categoría gramatical determinada, por ejemplo, un sustantivo o verbo. Este es un fenómeno descrito como básico para la construcción de oraciones^{37,38}. La identificación de un elemento léxico como categoría determinada permite su utilización diferenciada pero además implica la variabilidad en la morfología de ese ítem y no de su funcionalidad sintáctica. Esta última cuestión convierte al fenómeno más difícil de ser simulado.

La superación de estas dificultades puede abrir el camino para construcción de teorías de la dinámica cerebral durante el procesamiento lingüístico. Esto, como se puede intuir, no es una empresa sencilla. Parece claro, además, que tal teorización no responderá *per se* las cuestiones más intrigantes relacionadas con la producción del lenguaje y que, seguramente, las incipientes propuestas serán falseadas por la investigación neurocientífica en sólo algunos años³⁹⁻⁴³. Sin embargo, la formulación de modelos neurocomputacionales resulta meritoria debido a que hace posible reconstruir modelos cerebrales de procesos cognitivos implicados en el lenguaje y postular cuestionamientos específicos sobre la producción lingüística. Además, la relevancia que la formulación de modelos de la

actividad cerebral puede tener sobre la rehabilitación del lenguaje en las diversas patologías es enorme y permitiría que la intervención incidiera de manera directa en el funcionamiento cerebral alterado propio de la patología de lenguaje.

Quizá sea debido a las dificultades antes descritas, que los dominios del lenguaje en los que los modelos conexionistas han incursionado con cierto éxito son aquellos que hacen un uso mínimo de la estructura morfosintáctica, como el acceso léxico, codificación fonológica o morfología simple. Todas las variantes teóricas de la lingüística, inspiradas en la revolución chomskyana y enmarcadas en el cognitivismo tradicional o procesamiento simbólico han posibilitado las descripciones lingüísticas y las explicaciones estructurales de oraciones como las que componen este texto, pero en más de veinte años de modelado conexionista, ninguno de estos ha sido capaz de dar explicaciones que comprendan una mínima parte de las operaciones referidas por la lingüística.

Empero, quizá la simulación conexionista del lenguaje se pueda considerar como un camino largamente bloqueado que apenas se ha empezado a recorrer en las últimas dos décadas y media. En el contexto de la historia de la ciencia, tal vez veinte años no son una cantidad tan enorme como se puede pensar en un primer momento. Después de todo, desde la publicación de los textos de Saussure a principios de siglo hasta el nacimiento de la lingüística contemporánea con la aparición de *Estructuras sintácticas* de Chomsky transcurrieron mucho más de dos décadas.

Agradecimientos

A la doctora Yaneth Rodríguez Agudelo por su invaluable apoyo durante la escritura del presente artículo y sus continuas observaciones del mismo, así como a la doctora María Lucinda Aguirre Cruz por las sugerencias vertidas luego de la revisión del manuscrito final.

REFERENCIAS

1. Hauser M, Chomsky N, Fitch WT. The faculty of language: What is it, who has it and how did it evolve?. *Science* 2002; 298 (22): 1569-79.
2. Chomsky N. Estructuras sintácticas. México: Siglo XXI Editores, 1984/1994.
3. Chomsky N. Aspectos de teoría de la sintaxis. Barcelona: Gedisa, 1995/1999.
4. Chomsky N. El programa minimalista. Madrid: Alianza Editorial, 1999.
5. Chomsky N. Linguistics and brain science. En Miyashita Y, Marantz A, O'Neil W, editores. Image, language, brain. Cambridge: MIT Press, 2000: 13-28.
6. Casti J. Would be worlds. Nueva York: John Wiley and Sons, 1997.
7. Gardner H. La nueva ciencia de la mente. Barcelona: Ediciones Paidós, 1996.
8. Burgos J. Una reconstrucción neuro-computacional del problema

- de los dos tipos de condicionamiento. En Rangel-Ligia A, Carlos-Lozada Silva M, editores. Contribuciones a la Psicología en Venezuela, Tomo III. Caracas: Fondo Editorial de Humanidades, Universidad Central de Venezuela, 1999: 215-49.
9. Rumelhart D, McClelland J, Hinton GE, Sejnowski TJ, Smolensky R, Williams R, Norman D. Introducción al Procesamiento Distribuido en Paralelo. Madrid: Alianza Editorial, 1992.
 10. Anderson J, Rosenfeld E. Neurocomputing. Foundations of Research. Cambridge: MIT Press, 1988.
 11. Aleksander I, Morton H. Introduction to Neural Computing. Londres: Chapman and Hall, 1990.
 12. Wasserman P. Neural Computing. Nueva York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
 13. Rumelhart D, McClelland J. On learning the past tenses of english verbs. En McClelland J, Rumelhart D & PDP Research Group. Parallel distributed processing: Explorations in the Microstructure of Cognition: Vol. 2. Psychological and Biological Models. Cambridge: Bradford Books/MIT press, 1986.
 14. Haykin S. Neural networks: A comprehensive foundation. Nueva York: Prentice Hall, 1999.
 15. Enquist M, Ghiralanda S. Animal learning & Neural networks. Princeton: Princeton University Press, 2005.
 16. Kandel ER. Mecanismos celulares del aprendizaje y sustrato biológico de la individualidad. En Kandel E, Schwartz J, Jessell T, editores. Principios de Neurociencia. Madrid: McGraw-Hill Interamericana, 2000: 1247-78.
 17. Ponce A. Extracción de reglas en redes neuronales difusas. Guadalajara. Universidad de Guadalajara, 2005.
 18. Pinker S, Price A. On language and connectionism - analysis of a parallel distributed processing model of language acquisition. *Cognition* 1988; 28: 73-93.
 19. Westermann G, Plunkett K. Connectionist models of inflection processing. *Lingue e Linguaggio* 2007; VI.2: 291-311.
 20. Poeppel D, Hickok G. Towards a new functional anatomy of language. *Cognition* 2004; 92: 1-12.
 21. Friederici A. Pathways to language: Fibertracts in the human brain. *Trends in Cog Sci* 2009; 13(4): 175-81.
 22. Friederici A. Broca's area and the ventral premotor cortex in language: Functional differentiation and specificity. *Cortex* 2006; 42: 472-5.
 23. Shalom D, Poeppel D. Functional anatomic models of language: assembling the pieces. *The Neuroscientist* 2008; 14(1): 119-27.
 24. Garagnani M, Wennekers T, Pulvermüller F. Recruitment and consolidation of cell assemblies for words by way of Hebbian learning and competition in a multi-layer neural network. *Cogn Comp* 2009; 1: 160-76.
 25. Chomsky N. Three factors in language design. *Ling Inq*, 2005; 36 (1): 1-22.
 26. Fitch WT, Hauser M y Chomsky N. The evolution of the language faculty: Clarifications and implications. *Cognition* 2005; 97: 179-210.
 27. Chomsky N, Hauser M, Fitch WT. Appendix. The minimalist program. En <http://www.wjn.harvard.edu/~mnkylab>.
 28. Pinker S, Jackendoff R. The faculty of language: what's special about it?. *Cognition* 2005; 95: 201-36.
 29. Jackendoff R, Pinker S. The nature of the language faculty and its implications for evolution of language. *Cognition* 2005; 97:211-25.
 30. MacWhinney B, Leinbach J. Implementations are not conceptualizations: Revising the verb learning model. *Cognition* 1991; 40: 121-57.
 31. Plunkett K, Marchman V. U-shaped learning and frequency-effects in a multilayered perceptron - Implications for child language-acquisition. *Cognition* 1991;38:43-102.
 32. Westermann G. A constructivist neural network learns the past tense of english verbs. En: Proceedings of the GALA '97 Conference on Language Acquisition; Edinburgo: HCRC. 1997; 393-8.
 33. Westermann G. Emergent modularity and U-shaped learning in a constructivist neural network learning the english past tense. En: Gernsbacher, M. y Derry, J, editors. Proceedings of the Twentieth Annual Conference of the Cognitive Science Society;1998;1130-5.
 34. Pinker S, Ullman MT. The past and future of the past tense. *Trends in Cog Sci* 2002; 6: 456-63.
 35. Pinker S. Words and rules: the ingredients of language. Nueva York: Basic Books, 1999.
 36. Jackendoff R. Foundations of language. Oxford: Oxford University Press, 2002.
 37. Jackendoff R. A parallel architecture perspective on language processing. *Brain Res* 2007; 1146: 2-22.
 38. Culicover P, Jackendoff R. The simpler syntax hypothesis. *Trends in Cog Sci* 2006; 10 (9): 413-8.
 39. Culicover P., Jackendoff R. Simpler syntax. Oxford: Oxford University Press, 2005.
 40. Balaguer RD, Rodríguez-Fornells A, Rotte M, Bahlmann J, Heinze H, Münte T. Neural circuits subserving the retrieval of stems and grammatical features in regular and irregular verbs. *Hum Brain Mapp* 2006; 27: 874-88.
 41. Sahin N. Seeking the neural basis of -grammar: English noun and verb morphological processing investigated with rapid event-related fMRI and intracortical electrophysiology (tesis). Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
 42. Sahin N, Pinker S, Halgren E. Abstract grammatical processing of nouns and verbs in Broca's area: Evidence from fMRI. *Cortex* 2006; 42: 540-62.
 43. Pulvermüller F. The neuroscience of language. On brain circuits of words and serial order. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.