

La neurociencia en concordancia con la perspectiva evolucionista¹

Abstract: *Several research results shed new light in understanding the brain as an adaptative organ. This approach integrates perspectives from different disciplines: evolutionary biology, molecular biology, neuropsychology, among them. This paper presents some of the results in the area, emphasizing the changes in the representation and structuring of brain cortex in response to internal and environmental requirements. The paper is divided into four sections: the first presents the evolutionary perspective used; it is introduced to give consistency to the paper. The second section describes the main features of the structure and representation of information at the brain cortex. The third section describes memory as an example of the interlevel approach endorsed by this perspective. The fourth section discusses some of the formal properties of the system used to model the brain as an adaptative organ. The results discussed are tentative but they provide some of the basic features of the field.*

Resumen: *El estudio del cerebro como un órgano adaptativo requiere la integración de perspectivas de diferentes disciplinas, como la biología evolutiva, la biología molecular y la neuropsicología entre otras. En este artículo hacemos una breve presentación de algunos resultados en este campo de investigación, poniendo particular énfasis a los cambios en la representación y la estructura de la corteza cerebral en respuesta a los requerimientos internos y del medio. Con el propósito de darle consistencia al artículo, en la primera sección se presenta la perspectiva evolucionista utilizada. En la segunda, se*

caracteriza la estructura y representación de información a nivel de corteza. En la tercera, se describe la memoria como un ejemplo del enfoque en múltiples niveles involucrado en la perspectiva bajo consideración. En la última sección, se discuten brevemente algunas de las propiedades formales de los sistemas que pueden utilizarse para modelar el cerebro como órgano adaptativo.

Cuando tratamos de entender el cerebro como un órgano adaptativo, es decir, que permite al individuo adaptarse a los requerimientos individuales y del medio, el estudio de ese órgano debe hacerse partiendo del funcionamiento, lo cual implica la incorporación de conocimiento a nivel morfológico. Sin embargo, las herramientas a utilizar para su modelaje y comprensión son bastante complejas. Debido a ello, en este trabajo restringimos nuestra atención a dos aspectos principales: primero, los cambios a nivel de corteza reportados, debido a la estructura de representación de la información utilizada por el cerebro y la interacción de la misma con la información previamente almacenada. Segundo, asumimos la tesis de que una modelación en este sentido involucra la consideración de múltiples niveles. Para ejemplificar esto último utilizamos algunas de las líneas de investigación actuales en lo relativo a la memoria. Los estudios actuales de la memoria muestran que existe continuidad entre el nivel molecular y el nivel neuronal, por un lado, y el nivel mental, específicamente, semántico, por el otro.

Con el propósito de ver la continuidad entre niveles, así como por consistencia interna

del artículo, hacemos una presentación del enfoque evolucionista, tal y como el autor lo entiende, para pasar luego a considerar la naturaleza de la representación utilizada por la corteza, y a ejemplificar el enfoque propuesto. Finalmente, hacemos algunas consideraciones sobre las propiedades formales de los modelos que son apropiados para modelar componentes importantes del enfoque adoptado.

I. Enfoque evolucionista

El enfoque evolucionista afirma que los organismos vivos actuales y sus características son el resultado de procesos de diferenciación y cambio relativamente largos y lentos. Darwin es el constructor por excelencia del modelo de evolución aceptado en este momento. Como señala Coronado (1997), Darwin elaboró su propuesta evolutiva basado en los siguientes elementos: “las diferencias individuales y la lucha por la existencia, la contextualización de algunas de esas diferencias individuales como beneficiosas, perjudiciales o neutras para sus dueños en las inmensamente complejas relaciones de los seres vivos entre sí y con el medio, y la heredabilidad de algunas de esas diferencias individuales”. Darwin aportó diversas pruebas de que los individuos de una especie presentan variaciones individuales importantes. Lo mismo hizo en relación con la lucha por la existencia. Presentó ejemplos de que los individuos que presentan mayores ventajas competitivas que otros tenían una mayor probabilidad de sobrevivir. De igual manera, ejemplificó situaciones en las que las características que daban ventaja a algunos individuos tendían muy frecuentemente a ser heredadas. Es más, Darwin consideró el mecanismo de la selección natural como la vía principal mediante la cual los individuos de las especies pueden perfeccionar sus dotaciones. En efecto, como señala Darwin al final de *El origen de las especies*, “[d]ado que la selección natural trabaja exclusivamente para y por el bien de cada ser, todas las dotaciones corporales y mentales tenderán a progresar hacia la perfección”. Esto supone, como ha sugerido Thoday (1958), que existe una rela-

ción estrecha entre selección natural y progreso biológico, lo cual ha sido uno de los aspectos más problemáticos de la teoría de Darwin.

Así pues, de acuerdo con Darwin, es la selección natural el mecanismo que permite la discriminación de aquellas características que presentan ventajas adaptativas a los individuos de esa especie. Sin embargo, Darwin fue incapaz de encontrar una forma mediante la cual se introducen o presentan esas características (introducción de variación), sobre todo aquellas que en el largo plazo contribuyen al perfeccionamiento de la especie, es decir, las que permiten garantizar que la selección siga funcionando. De acuerdo con él, en determinado momento, cuando se haya alcanzado la perfección u homogeneidad, la selección dejaría de funcionar. Esto último debido a que no habría material sobre el cual pudiera operar la selección. Con respecto a la naturaleza de estas características o variaciones, la posición darwiniana se puede presentar, como dice Ruse, de la siguiente manera: “las respuestas a las cuestiones sobre los cambios evolutivos a gran escala deben encontrarse en nuestros conocimientos de los cambios evolutivos a pequeña escala, que, por ser tan pequeños, normalmente no serían calificados de ‘evolutivos’.” (Ruse, 1977)

Como es sabido fue Mendel el que proporciónó el mecanismo que andaba buscando Darwin. Mendel introdujo como unidad de herencia el “gene” o caracter, definido como unidad de función (Ruse, 1997), es decir, como uno de los factores determinantes de las características de un individuo, heredadas de sus ancestros. Dentro de las contribuciones mendelianas mencionaremos únicamente dos. Primero, haber establecido los principios generales que rigen la variabilidad individual, lo cual se expresa mediante sus dos conocidas leyes (Ley de Segregación, que establece las contribuciones de los progenitores por cada locus, y la Ley de Independencia de los caracteres, que establece que los genes de un locus son independientes de los genes de otros loci). Existen excepciones a esta segunda ley en los que la expresión de ciertos caracteres es una función de los caracteres presentes en otros loci (véase Ruse, 1997). Segundo, haber establecido los criterios que rigen la distribución de las

poblaciones, es decir, dada una población X con n individuos, cuáles son las distribuciones en cuanto a características asociadas con los individuos de esta población, si son conocidos los genes o caracteres de los que se originó esta población. Las distribuciones tienden a respetar la ley Hardy-Weinberg, siempre que se suponga que no existen influencias externas o mutaciones. La introducción de mutaciones inducidas de diversa manera, no modifica sustantivamente el enfoque, sino que más bien tiene la ventaja de mostrar cómo se introduce mayor diversidad en una población, y proporciona el fundamento para esperar que la selección natural siga funcionando.

Sin embargo, esta aproximación hace justicia únicamente a uno de los aspectos del darwinismo: aquel que tiene que ver con la manera como se transmiten caracteres de los padres a los hijos y cómo se introduce la variabilidad individual en una población determinada. Existe otro aspecto, igualmente fundamental, implicado por la teoría de Darwin y que requiere de explicación: el mecanismo real de adaptación de los individuos a los retos que le plantea el medio ambiente. Se puede obtener una explicación mendeliana en el sentido de que la dotación genética heredada contiene todos los elementos necesarios para garantizar la adaptación del individuo al medio. El que tenga los elementos necesarios no es condición suficiente para que el individuo se adapte al medio. La pregunta es más bien sobre el mecanismo específico que está implicado por esta dotación genética para que el individuo se adapte a ese medio. La respuesta debe buscarse, no ya en la genética mendeliana sino más bien en la biología molecular.

No obstante, las relaciones entre la biología molecular y la teoría de la evolución, como señala Frank-Kamenetskii (1997), no son nada fáciles. Lo anterior debido a la amplitud de las aplicaciones o cobertura de la biología molecular y a la naturaleza diferente de ambas. Por un lado, la teoría de la evolución en su forma actual, está fundamentada en la genética de las poblaciones a partir de la cual se pueden unificar disciplinas como Paleontología, Sistemática, Morfología, Etiología y Embriología (Ruse, 1977). Por otro lado, la Biología Molecular es la base para disciplinas

como la Inmunología, la Embriología, las aplicaciones en salud y más recientemente, los estudios neurobiológicos. Sin embargo, consideramos que desde la biología molecular se podría estar en capacidad de proporcionar una respuesta unificada a dos aspectos fundamentales: los factores de transmisión de información de padres a hijos (lo mismo que la variabilidad individual) y, por el otro, mecanismos reales de adaptación, regulación y conservación del individuo. En este sentido, la biología molecular proporciona explicaciones sobre los mecanismos o sistemas de autorregulación, de auto-conservación y de auto-adaptación (para adoptar los conceptos de Troløv (1977)). Estos tres sistemas no son independientes entre sí, sino que los tres nos permiten comprender y explicar por qué las mutaciones y otras adaptaciones tienen la propiedad de preservar identidad interespecífica e individual, por lo menos, en el corto plazo. La transición de una especie a otra, en condiciones naturales es un proceso bastante largo.

El éxito de la biología molecular en la explicación de estos mecanismos radica en la conexión demostrada entre el ADN y el metabolismo, es decir, en el hecho de que el ADN está involucrado en todas las funciones metabólicas que realiza el organismo, como fue mostrado por Watson y Crick en 1953.

Dos de los descubrimientos más apasionantes, en este sentido, lo constituyen, por un lado, el establecimiento de que nuestro ADN sufre cambios significativos durante toda la vida del individuo (Biémont y Brookfield, 1996; Rennie, 1993 para referencias de fácil acceso), y el que los procesos y estructuras del organismo reflejan estructuras jerárquicas. Con relación al primero de estos, los cambios se dan en dos sentidos diferentes: transposición, es decir, saltos de posición de genes dentro de un cromosoma, y retrotransposición, es decir, la modificación del ADN a partir de ARN. Los mecanismos mediante los cuales se llevan a cabo estos procesos han sido bien estudiados. En el primer caso, el gen en cuestión emite el comando para que se sintetice una enzima denominada transcriptasa, la cual es utilizada para desplazarse de un lugar al otro. En el segundo caso, se trata de la enzima denominada transcriptasa inversa, que

sigue el proceso inverso de la duplicación en el modelo estándar. Se ha encontrado además, que estos cambios están en general localizados. Una de las primeras localizaciones de estos cambios que se encontró (Frank-Kamenetskii, 1997), fue el mecanismo utilizado en la producción de linfocitos T. Se trata de un caso típico de transposición. A nivel inmunológico dos clases de linfocitos están involucrados, los detectores de antígenos y los que los combaten. Los primeros son los linfocitos T y los segundos los linfocitos B. El organismo está en capacidad de producir prácticamente un número ilimitado de linfocitos para reconocer un número igualmente ilimitado de antígenos. Los linfocitos T están formados por dos grupos de genes básicos, el V y el J, siendo J el de longitud menor. Se conocen alrededor de 300 genes V y 4 genes J. Parte del mecanismo de producción de linfocitos T se ha establecido: se utiliza un sistema de agrupamientos, lo que nos da inicialmente más de 1000 posibles linfocitos. Pero como se trata de un mecanismo combinatorio y de permutaciones, las posibilidades crecen de manera exponencial, una cota inferior puede ubicarse fácilmente en 1000^2 combinaciones, es decir, un millón de linfocitos. Por otro lado, se han encontrado 2 secuencias de poliaminoácidos que están involucradas en la molécula de inmunoglobina que intervienen en la diferenciación de los linfocitos T, con lo cual aplicando el procedimiento de agrupamiento se pueden obtener aún mayores combinaciones. Un problema que queda por resolver es el mecanismo utilizado por el sistema inmunológico para que el organismo no produzca antígenos para las proteínas propias del organismo. Quizá parte de la respuesta provenga de los comandos que provienen de las estructuras responsables de los sistemas de auto-regulación, auto-conservación y auto-adaptación.

Sin embargo, también se han encontrado (Rennie, 1993) modificaciones significativas del ADN debido a factores ambientales, tales como temperatura y estrés específico. En estas condiciones se han reportado cambios importantes en la frecuencia de transposiciones y retrotransposiciones. Es posible conjeturar que juegan un papel fundamental en los otros procesos adaptativos vitales para el organismo. De igual manera, en el

caso del ser humano es de esperar que desempeñen un papel fundamental en los procesos de memoria y en la dinámica propia de las organización y representación de la información a nivel neuronal. Se trata pues, de mecanismos adaptativos del individuo a los retos personales o ambientales. De igual manera lo anterior es una buena perspectiva para entender la rapidez con la que los organismos se adaptan al medio ambiente en casos de situaciones extremas. Por ejemplo, se puede entender por qué ciertos grupos de organismos, entre ellos las hormigas, desarrollan tan rápidamente resistencia a los insecticidas. Es de esperar que sea en situaciones límites en las que se muestre con mayor dominancia el control por parte de estos subsistemas adaptativos.

Con respecto al segundo factor, la determinación de que la participación de los genes en las estructuras y funciones metabólicas responde a modelos jerárquicos, permite establecer diferentes niveles de flexibilidad en cuanto a la fuerza de los comandos que se pueden establecer y los márgenes de variabilidad permitida. Un ejemplo particularmente ilustrativo lo constituye el proporcionado por Gehring (1995), en el que se muestra que la organización de ojo es jerárquica, la cual involucra alrededor de 3000 genes, pero sólo uno de ellos tiene el comando de decisión más importante, que es precisamente el que se ubica en la cúspide de la jerarquía. Modificaciones en las estructuras jerárquicas intermedias no inducen cambios significativos en los organismos aunque sí cambios menores.

Estos mecanismos de adaptación pueden ser incorporados, como elementos explicativos, dentro de la posición neodarwiniana en el siguiente sentido: la evolución de los organismos, en el sentido de la selección natural, ha dotado a los individuos de ciertas estructuras relativamente flexibles cuya modificación se hace en respuesta a las demandas del medio ambiente o a requerimientos personales. Estos componentes tienen la posibilidad de modificarlas, aunque estas modificaciones no se transmiten, pero sí, quizá, la capacidad de flexibilizarlas cada vez más en las generaciones futuras. Es decir, existen estructuras que son más fácilmente modificables que otras, lo cual supone la existencia de cierta organización

de flexibilidad en los componentes principales del organismo. Este enfoque es el propuesto por Waddington, del cual tomamos la siguiente cita:

La selección de la capacidad de reaccionar al medio ambiente, está vinculada a constituciones genéticas que poseen ciertas modificaciones características que pueden producirse fácilmente y otras que solo pueden producirse con dificultad; las alteraciones fortuitas de los alelos en la naturaleza tendrán por ello alguna tendencia a producir uno u otro de estos tipos preseleccionados de adulto. (Waddington, 1956)

II. El cerebro como órgano adaptativo

Como indicamos anteriormente, uno de los problemas principales de los enfoques dominantes en las neurociencias es que se enfrentan al estudio del cerebro como el órgano por excelencia resultado de la selección natural, es decir, como producto final, y no como el órgano que está en función de los procesos adaptativos del organismo a los retos que plantea el medio, y por lo menos, en el caso del ser humano, los requerimientos personales, y que, por tanto, posee su propia dinámica en respuesta a estos requerimientos. Cuando se estudia desde este punto de vista, es de esperar compatibilidad entre la base molecular, es decir, el ADN y el funcionamiento neuronal. También es de suponer que no exista incompatibilidad en la estructura organizativa del cerebro y del organismo en general, es decir, los principios organizativos del organismo deben ser similares a los del cerebro. De igual manera es esperable que el ADN esté directamente involucrado como soporte de los procesos neuronales. De hecho, hay algunos estudios específicos que muestran que esto es así, aunque no han sido extendidos a otros casos. Uno de estos casos será presentado en la sección tercera.

Un grupo importante de neurobiólogos están realizando investigaciones tomando como base un enfoque más funcional que anatómico del cerebro, y han comenzado a trabajar, desde hace algunos años, en la visualización de perspectivas que hagan viable este enfoque. La posición adoptada en esta sección es la propuesta por Merze-

nich y Jenkins (1993), Merzenich y deCharms (1998), Singer (1998) y von de Malsburg (1998).

Para Merzenich y deCharms los resultados encontrados dentro de la neurofisiología sugieren una perspectiva de representación neuronal que presenta cinco características principales:

1. **La corteza cerebral está cambiando constantemente en cuanto a los patrones de activación en presencia de diferentes factores, alterando "las funciones representacionales de la corteza".** Hay dos factores que juegan un papel fundamental en este proceso: la atención y la expectativa. Ambos parecen funcionar como atractores (el sentido utilizado en el modelaje de sistemas caóticos), es decir, que tienen la propiedad de reorganizar todas las funciones cerebrales orientándolas hacia la meta, objeto de la atención o de la expectativa. Por ejemplo, en el caso de las expectativas, se han encontrado "cambios en el campo receptivo en la dirección del objeto esperado o evento, o en la dirección del foco atencional". Sin embargo, estos factores no son los únicos que inducen cambios significativos en la corteza cerebral. Desde hace algún tiempo, los neurobiólogos han estudiado algunos procesos como la habituación y sensibilización en algunos organismos pocos complejos, como la *Aplysia californica* (Churchland, 1989). Se han encontrado diferencias significativas en el funcionamiento neuronal en presencia de estos procesos. La habituación supone que el organismo se ha familiarizado con el objeto o el estímulo correspondiente, mientras que en la sensibilización expresa la reacción del organismo ante un estímulo no familiar. En el caso de la habituación se observa una disminución considerable en el paso de los cationes de calcio (Ca^{++}) al interior de la membrana neuronal, es decir, en la cantidad de canales abiertos, mientras que en el caso de la sensibilización se ha observado el efecto contrario.

Lo anterior significa que la habituación y la sensibilización no son puramente estados o procesos neuronales, sino que reflejan estados del individuo, donde es el organismo como un todo el que está habituado o que es sensible a ciertos estímulos. Es decir, que el individuo responde como organismo ante el medio, y las manifestaciones a nivel neural son el resultado de este proceso adaptativo.

Ahora bien, como señalan Merzenich y deCharms, para conocer la actividad actual de las neuronas necesitamos conocer su historia pasada. Esto significa que los modelos conceptuales que proponamos para comprender la dinámica de la corteza cerebral, son en primer lugar temporales y, en segundo lugar, con una o varias funciones que asignan pesos significativos a las representaciones pasadas. En tercer lugar, atractores (atención, expectancia, etc) que reorientan la dinámica de la corteza. Sobre esto volveremos en cada uno de los puntos con el propósito de hacer explícitos los principios generales de modelaje de la dinámica de la corteza cerebral.

Finalmente, cambios importantes en el remapeo de las funciones y áreas cerebrales han sido reportados (Ramachandran y otros, 1998; Merzenich, 1998; Florence y otros, 1998) en casos de amputaciones. Por ejemplo, se ha encontrado que en amputaciones de brazos en algunos pacientes se observa que las áreas cerebrales del lóbulo frontal que controlan las funciones del brazo han sido remapeadas y ocupadas por las funciones que controlan el rostro, aunque de manera inestable, es decir, el área conserva funciones básicas del brazo amputado, de tal manera que el individuo puede sentir el órgano amputado. A este fenómeno se le llama "miembros fantasmas". Por ejemplo, cuando se estimuló por tacto ciertas regiones de la cara, uno de estos pacientes reportó que estaba sintiendo en su mano amputada. Como reportan Ramachandran y otros (1998), la representación de funciones a nivel de corteza cerebral ha sido utilizada para desarrollar terapias para los "miembros fantasmas" con un importante grado de éxito.

2. Todas las representaciones en la corteza cerebral tienen lugar contra el trasfondo de la continuidad y del contenido generado internamente. Esta característica hace referencia al rol que desempeñan aspectos como la atención, la expectativa, ensamblaje mental, planeamiento, motivación y la emoción (placer, dolor, ansiedad, etc.) entre otros, en los procesos perceptivos y de decisión, así como en nuestras acciones. Como ha sido señalado por Damasio (1994), pero principalmente por LeDoux (1996), lo que está ocu-

rriendo en nuestra mente en un momento determinado juega un papel fundamental en la discriminación de los fenómenos objeto de percepción, de decisión o de acción en ese momento. En una palabra no hay actividad neuronal sin este trasfondo.

Cuando pensamos en el modelaje de la dinámica de la corteza cerebral debemos agregar un nivel, que denominamos trasfondo o *background*, a los elementos explicitados anteriormente. Podemos ahora reinterpretar lo dicho en el punto anterior en relación con la expectancia y la atención, de la siguiente manera: existe un conjunto de funciones que permiten la selección del nivel de trasfondo de las variables que tomarán predominancia en un momento determinado. La o las variables seleccionadas funcionarán como atractores y pondrán en marcha la dinámica de la representación y actividad de la corteza, pero preservando continuidad en la experiencia, en la forma expresada en el siguiente punto.

3. Continuidad en el tiempo de las funciones del sistema nervioso. La experiencia perceptual y la aperceptual (para utilizar una expresión kantiana) son también fundamentalmente temporales. Esta continuidad debe reflejarse de alguna manera en el sistema nervioso y en la dinámica de la representación de la corteza neuronal. La explicación de cómo esto es posible constituye una de las formas del problema del ligamiento ("binding problem") que está siendo abordado por los neurobiólogos en este momento (Churchland y Llinás, 1998). Desde nuestro punto de vista, estos problemas de ligamiento son condiciones *sine qua non* para la adaptación del individuo a su medio, por lo cual es posible conjeturar que su soporte esté dado por sistemas mucho más básicos, es decir, que pueden estar basados en sistemas adaptivos soportados por bases moleculares. Si esto es así tenemos una indicación de que ambos niveles de descripción (el neuronal y el molecular) no son tan independientes como podría suponerse.

Las características 4 y 5 no agregan elementos nuevos que deban ser tomados en consideración en la modelación, sino más bien el modo en que debe llevarse a cabo la representación.

4. El ensamblaje o red neuronal como unidad básica de representación. Se han presentado varios argumentos por parte de los neurobiólogos en relación a que no es adecuado partir de la neurona como la unidad básica de representación, sino más bien, de la red de neuronas. Uno de los argumentos más fuertes es el denominado representación distribuida, que obtiene su apoyo de aquellos casos en los que lesiones en algunas áreas focales no alteran totalmente el desempeño del individuo en esa área. Uno de los ejemplos más frecuentemente citado es el de la remoción de partes del cerebro de una rata para determinar en qué momento olvida la ruta de salida de un laberinto (Bridgeman, 1991). Considero que es plausible seguir el rastro a fenómenos de este tipo a nivel molecular, es decir, tomando en consideración el tipo de proteínas sintetizadas para coadyuvar o mantener estos procesos. Estos se muestran a nivel neuronal como procesos distribuidos. Aunque en este momento las redes son aceptadas ampliamente no existen todavía muchos modelos biológicos que reflejen de manera adecuada esta propiedad, debido quizá a las complejidades involucradas en el modelaje.

Este hecho está directamente relacionado con los anteriores, en el sentido de que facilita la modelación de los sistemas que cumplan estas características. Es mucho más fácil la visualización de los cambios entre redes que entre neuronas individuales. Uno de los asuntos abiertos en relación con este enfoque es el de las estructuras que tienen las redes neuronales y el mecanismo de propagación utilizado. Se han ensayado varias alternativas (Rumelhart y McClelland, 1986), sin embargo, falta mucho por realizar. La siguiente y última característica delimita en parte el ámbito de las posibilidades de exploración en esta línea.

5. La representación a nivel neuronal es relacional. En lo que tiene que ver con el modelaje computacional de las redes neuronales, se asume el principio de que todas las neuronas de un nivel se conectan con todas las del nivel siguiente. Normalmente, no se consideran conexiones entre neuronas del mismo nivel. Estos modelos basados en este supuesto se denominan combinatorios. Al indicar que la representación

es relacional se quiere decir varias cosas: primero, que el mecanismo de conectividad es selectivo y no todos contra todos (combinatorio), como normalmente se indica o se supone. Segundo, el funcionamiento de la red como un todo no depende de los aportes individuales de cada una de las neuronas exclusivamente, sino de los procesos de sincronización (los cuales pueden ser muy diferentes y complejos) a los cuales son inducidas las neuronas. Dentro de ellos, factores como los atencionales, como se recordará, juegan un papel principal. Tercero, los aportes de cada una de las neuronas depende del proceso de sincronización de toda la red, y quizá de otros factores. Una manera de visualizar esto, como señalara Smolensky (1986), es ver la red neuronal como sometida a un proceso térmico en el que la actividad de las neuronas dependerá del nivel térmico alcanzado por la red como un todo. Esto quizá pueda observarse en los cambios en la permeabilidad de la membrana a los iones y cationes involucrados en el procesamiento neuronal. Cuarto y fundamental, la representación de los diferentes aspectos de un objeto visual "tales como su forma, composición espectral, localización en el espacio y movimiento, son procesadas en áreas corticales separadas y no continuas" (Singer, 1998), lo cual implica un nivel importante de especialización, y presencia de varios niveles para garantizar su integración y recuperabilidad (una forma del problema del ligamiento).

Según lo expuesto hasta el momento, un modelo de funcionamiento del cerebro que responda a procesos adaptativos, es decir, competitivos, presenta las siguientes características: está basado en un fondo de continuidad de la experiencia (temporal) del individuo. Existen atractores, igualmente fundamentales para la sobrevivencia del organismo, que están en capacidad de organizar y focalizar toda la actividad neuronal. La organización de la corteza cerebral presenta varias estructuras (redes neuronales) jerárquicas en sus comandos, las cuales inducen en las neuronas específicas diferentes procesos de sincronización que le dan sentido a la riqueza y complejidad del procesamiento neuronal. Estas estructuras jerárquicas también cuentan con los mecanismos necesarios para hacer que la corteza cerebral tenga

un carácter dinámico en su procesamiento y representación de los objetos, así como el carácter relacional que presenta. Finalmente, como se trata de procesos adaptativos, la nueva información está permeada por la experiencia pasada del individuo y por los intereses específicos que posea. Se trata pues, de un conjunto de sistemas complejos pero listos para responder a los retos que le plantee el ambiente en el cual se desenvuelve el individuo, lo cual le da el carácter de una máquina de auto-organización y basada en la coincidencia (Merzenich y deCharms, 1998) y orientada constantemente al aprendizaje.

Como puede observarse la caracterización anterior supone la existencia de niveles diferentes de comando que controlan la actividad neuronal. Trataremos de explorar brevemente estos aspectos en la próxima sección, poniendo énfasis en el conocimiento neuronal asociado con la existencia de niveles y su estructura en el caso específico de la memoria. Pero digamos primero unas palabras en cuanto al tipo de enfoque que se desea proponer.

Los esfuerzos explicativos recientes se enmarcan dentro de lo que se conoce como modelos emergentes. Esta es una aproximación típicamente *bottom-up*, es decir, que trata de producir un fenómeno de interés (emergencia de una propiedad) en términos de estructuras de más bajo nivel. Por ejemplo, el fenómeno de la conciencia a partir de diferentes niveles, comenzando por el neuronal, pasando a la red neuronal y a varios otros niveles intermedios. Sin embargo, el destino de estos modelos no es el apropiado si se excluyen las aproximaciones *top-down*. Señalemos dos razones para ello:

El papel que desempeñan los factores ambientales en las respuestas adaptativas del organismo. Es decir, la atención y la expectativa no surgen de manera espontánea sin ninguna motivación externa, sino que por el contrario, éstas están causalmente conectadas a factores ambientales.

Las estrategias de almacenamiento de los registros sensoriales reflejan estrategias *top-down* muy claras. Ya hemos señalado el proceso de separación utilizado por la corteza en el caso de las imágenes visuales. Es decir, existe un procedi-

miento de alto orden que descompone el objeto en características espaciales, de forma, etc., y establece el mecanismo para preservar la integridad del objeto almacenado (Singer, 1998).

III. La memoria: un ejemplo de interacción

El estudio de la memoria, entendida como la capacidad de seleccionar, almacenar y recuperar información sobre los eventos u objetos, constituye uno de los mecanismos más importantes para la adaptación del organismo al medio ambiente, y por tanto, cumple una función esencial en el aprendizaje (entendido éste último como medio adaptativo). Pero igualmente, constituye uno de los ejemplos más interesantes, en el que convergen diferentes niveles en su explicación: por un lado, la descripción del fenómeno a nivel psicológico, los niveles neuronal y molecular, por el otro.

De los tres mecanismos mencionados, los de selección y recuperación han sido los menos estudiados hasta el momento. Sin embargo, los criterios esbozados en la sección anterior nos pueden proporcionar una guía importante para analizarlos en un futuro. El mecanismo de almacenamiento ha sido el más ampliamente estudiado. Aunque todavía no se conoce lo suficiente sobre el procedimiento utilizado, se dispone de algunos resultados interesantes en relación con ello. La dificultad aquí reside en la complejidad del fenómeno a estudiar. En efecto, el proceso de almacenamiento es muy complejo y se conocen varios tipos de memoria, algunos de ellos, por ejemplo, están relacionados con conceptos o categorías, con reglas gramaticales y semánticas mientras que otros están relacionados con habilidades motoras (sobre este último véase Wickelgren, 1998). Los estudios mejor conocidos son los asociados con conceptos. Aquí se habla de al menos tres clases diferentes de memoria: la de corto plazo, la de mediano plazo y la de largo plazo. Finalmente, cada uno de estos difiere en intensidad, es decir, en cuanto a la cantidad y calidad de la memoria.

Aun así hay algunos estudios interesantes que indican la manera cómo se está abordando el problema de la memoria, en lo relacionado con la

integración de niveles (limitándonos a los conceptos o categorías). Queremos señalar brevemente los principales.

1. Como se indicó anteriormente, el proceso de almacenamiento utilizado por el cerebro es relacional. Un objeto es descompuesto en sus características semánticas y almacenadas de esta manera (Fernández y otros, 1999). De igual manera, (Caramazza y Sheldon, 1998) el cerebro utiliza las categorías animado-inanimado como una de las principales estrategias de almacenamiento, es decir, es dominio específico. Esto significa que esta categoría tiene representación a nivel de cerebro. Los estudios que soportan esta posición derivan de pacientes que habían sufrido deterioros cerebrales importantes debido a infecciones causadas por el virus Herpes Simplex, traumas, accidentes o neurocirugías en regiones relacionadas con la memoria. Los estudios muestran que las categorías para los seres vivos encuentran su ubicación en el lóbulo izquierdo. Dado que los mecanismos de representación, reconocimiento, etc., de instancias dentro de esta organización categorial están apoyados neuronalmente, son susceptibles de ser afectados selectivamente. Estos estudios sugieren, pues, que no es posible prescindir del nivel semántico para explicar el fenómeno del almacenamiento de los conceptos.

2. Uno de los trabajos más interesantes relacionados con la memoria tiene que ver con el esclarecimiento de la conversión de experiencias en memorias de largo plazo. Las técnicas de tomografía por emisiones de positrones (PET) y las imágenes de resonancia magnética funcional (fMRI) están dando sus frutos en cuando a la determinación de las áreas involucradas en este proceso. Schacter y Wagner (1999) reportan algunos de los resultados recientes en lo relacionado con las áreas de almacenamiento y recuperación de información proveniente tanto de conceptos como de experiencias. Por ejemplo, se ha encontrado que de manera sistemática intervienen principalmente tres regiones, el lóbulo temporal medio (MTL) izquierdo anterior y posterior, y el hipocampo. Aunque se ha encontrado, en menor medida, que en la recuperación de la

información también interviene el lóbulo frontal derecho e izquierdo. Se requiere, no obstante, el perfeccionamiento de estas técnicas para registrar aspectos más finos de la activación neuronal.

Como señala Rugg (1998), estos descubrimientos abren nuevos campos de investigación en aspectos como los siguientes: la relación entre el hipocampo y el lóbulo temporal medio y las áreas relacionadas. Segundo, la manera cómo operan estas áreas de manera serial o de manera paralela. Tercero, cuál es la arquitectura que soporta la formación de la memoria. En relación con esto último, Schacter y Wagner (1999) señalan algunas teorías al respecto. Una de ellas afirma que tanto el hipocampo como el MTL codifican el mismo tipo de información declarativa, "la cual soporta la recuperación y reconocimiento posterior de eventos y hechos". Pero existen otras alternativas que enfatizan el carácter relacional y distribuido del proceso de información y de formación de la memoria.

3. Una tercera línea de investigación en relación con la memoria, centra su atención en los mecanismos de fortalecimiento de las conexiones que garantizan la formación de la memoria en el largo plazo, lo que se denomina "Potenciación de largo plazo" (LTP) (Bliss, 1998; Barinaga, 1999). Una de las estrategias utilizadas centra su enfoque en los receptores del glutamato (un neurotransmisor). Tanto los receptores como los neurotransmisores son estructuras proteicas sintetizadas por genes. Tradicionalmente, se había puesto énfasis en uno de estos receptores, denominado NMDA. Sin embargo, recientemente la atención de los investigadores se está dirigiendo hacia el otro de los receptores, el AMPA. Varios investigadores, como señala Barinaga (1999) señalan que han encontrado "evidencia incontrovertible de que los receptores AMPA en general" constituyen la clave para entender el fortalecimiento de las conexiones. En este caso, es relevante el estudio de las propiedades bioquímicas de este receptor que lo hacen apropiado para mantener las conexiones en el largo plazo. Un segundo aspecto tiene que ver con las interacciones entre las dos clases de receptores del glutamato. Con relación a este último, no es muy

claro en este momento cómo se relacionan. Uno de los problemas es que AMPA no es tan abundante como NMDA y parece requerir mayores cantidades de glutamato para que sea activado. Una de las investigaciones más fascinantes, y en las que se puede encontrar un intento de respuesta a estas preguntas deriva del estudio de ciertos mecanismos moleculares que podrían estar involucrados. Esta posibilidad la exploramos en el siguiente párrafo.

4. Finalmente, Lisman y Fallon (1999) presentan algunos de los resultados de una línea de investigación que comienza a finales de la década de los 80. Esta consiste en clarificar los mecanismos moleculares involucrados en la creación y el mantenimiento de las memorias. Se trata de encontrar los mecanismos de expresión de genes involucrados. Se recordará que cuando un gen se expresa, previo a su expresión se inicia la síntesis de una proteína específica, la cual desempeña o puede desempeñar una función importante a nivel metabólico. Aun cuando se acepta que existen varios mecanismos involucrados en la creación y mantenimiento de las memorias (las potenciaciones de largo plazo), uno de los blancos de las investigaciones se centra en una molécula denominada CAMKII, la cual se encuentra normalmente inactivada, pero es activada cuando hay un incremento en los canales de Ca^{2+} . Cuando ésta es activada cambia sus propiedades químicas y no requiere más la presencia de Ca^{2+} para activarse, lo cual permite que los canales AMPA "sean funcionalmente ensanchados por medio de CAMKII". Sin embargo, cuando es inhibida después de la LTP, no tiene ningún efecto esta última. Ello lleva a pensar que nuevas síntesis de proteínas también están involucradas, así como algunos elementos de control: el principal de ellos es el denominado CREB, un gen de restricción. Por ejemplo, se ha encontrado que cuando no se presenta esa síntesis de nuevas proteínas sólo se produce memoria de corto plazo, es decir, el fortalecimiento de las conexiones de corto plazo. Si esto es así, tendría importantes implicaciones para la comprensión y eventual cura de algunas enfermedades neurodegenerativas en las que la memoria es afectada de manera significativa, principalmente, Alzheimer.

IV. Reflexiones en torno al modelaje de sistemas adaptativos

Hemos introducido, hasta el momento, dos aspectos muy importantes sobre los procesos adaptativos. El primero de ellos relacionado con la naturaleza de la representación de la corteza cerebral, y el segundo relacionado con un enfoque de múltiples niveles como estrategia para explicar y modelar los fenómenos asociados con el cerebro como órgano adaptativo. Uno de los aspectos que deben ser investigados con mayor profundidad tiene que ver con el modelaje matemático de estos sistemas y con la explicitación de las propiedades formales que estos presentan.

En una primera aproximación, y desde el punto de vista de sus propiedades, se distinguen dos clases generales de sistemas formales: los lineales y los no-lineales. En términos muy generales, los sistemas lineales son aquellos en los que las salidas se pueden correlacionar exhaustivamente con las entradas. Es decir, la estructura interna de las funciones (o vectores) cumple con las dos propiedades siguientes: $f(cx) = cf(x)$ y $f(x \text{ operador } y) = f(x) \text{ operador } f(y)$. Como puede observarse los sistemas lineales presentan la característica de ser sumativos, es decir, cada variable contribuye de una manera específica y determinada en el funcionamiento del sistema como un todo. Como ha mostrado Jordan (1986), un número muy importante de sistemas de procesamiento distribuido en paralelo, es decir, aquellos que suponen la existencia de varios niveles, pueden ser reducidos a sistemas lineales, es decir, se puede construir un procedimiento que permite eliminar los niveles propuestos, y reemplazarlos por sistemas de un único nivel. El criterio general es que existe una correlación del tipo especificado entre las entradas y las salidas independientemente de los niveles propuestos.

Sin embargo, es de esperar que la memoria como fenómeno adaptativo, por ejemplo, no sea posible modelarla con sistemas lineales. Efectivamente, se recordará que la información almacenada es modificada por las nuevas experiencias, y a su vez, lo almacenado es la base para la interpretación de las nuevas experiencias. De igual manera, la estructura de la corteza cerebral

con las características indicadas no cumple, en general, con las propiedades de los sistemas lineales. Así que es importante mirar en la dirección de los sistemas no lineales.

Los sistemas no lineales son aquellos, por complemento, en los existen factores que hacen imposible determinar cuál será el valor de función en las distintas corridas del sistema. Los sistemas no lineales incluyen una clase muy amplia, dentro de los cuales se ubican sistemas caóticos, y los sistemas caóticos con atractores. La determinación de los sistemas de utilidad en la neurociencia debe ser una cuestión empírica. Sin embargo, ya hemos mencionado que la atención y la expectativa son dos variables fundamentales en la dinámica de la representación de la corteza, así como en la memoria, y por tanto, cumplen el rol de atractores. Por ello, se puede anticipar que los sistemas que son de mayor utilidad en las neurociencias son los caóticos con atractores.

Se requiere investigar aquellas características que sean empíricamente justificables y que permitan una mejor delimitación de los sistemas no lineales de utilidad en las neurociencias. Algunas de las propiedades formales que hemos indicado incluyen el que los modelos deben, aparte de la escogencia de los atractores, ser al menos parcialmente jerárquicos y con un nivel importante de distribución funcional, es decir, contener varios niveles y los esquemas de comando. Este último viene determinado por la estructura temporal descrita. Pero además, cada uno de los niveles debe cumplir con un conjunto de restricciones que vienen determinados por los elementos de soporte. Por ejemplo, la memoria es uno de los elementos fundamentales de la estructura temporal. La memoria tiene sus propios mecanismos de soporte que vienen dados por un conjunto de restricciones impuestas por la estructura temporal, el dominio específico sobre el que versa, por mecanismos moleculares y celulares que soportan el proceso de almacenamiento y recuperación, y la disponibilidad de la información.

Así pues, la modelación del cerebro como órgano adaptativo supone sistemas formales de una gran complejidad, sin embargo, es importante realizar experimentos con el propósito de in-

troducir las restricciones que nos permitan proponer modelos más flexibles y adecuados al fenómeno en cuestión.

Nota

1. El autor desea agradecer a los compañeros del grupo de filosofía y neurobiología por la lectura del borrador de este artículo y sus observaciones. También deseo agradecer de manera muy especial al profesor Luis Guillermo Coronado, por la lectura del artículo y por sus valiosas sugerencias y observaciones críticas.

Bibliografía

- Barinaga, M. (1999) "New Clues to How Neurons Strengthen Their Connections". En *Science*. Vol. 284, Junio 11.
- Barnett (editor). (1956) *Un Siglo después de Darwin*. Versión española (1982). Madrid: Alianza Editorial.
- Biémont y Brookfield. (1996) "Los genes saltadores: Patrimonio modificable." En *Mundo Científico*. Julio-Agosto.
- Bliss, T. (1998) "The Saturation Debate". En *Science*. Vol. 281, Septiembre 25.
- Bridgeman. (1991) *Biología del Comportamiento y de la Mente*. Madrid: Alianza Editorial.
- Butts y Hintikka (eds). (1997) *Foundational Problems in the Special Sciences*. Dordrecht-Holland: D. Reidel Publishing Company.
- Caramazza y Sheldon. (1998) "Domain-Specific Knowledge Systems in the Brain: The Animate-Inanimate Distinction". En *Journal of Cognitive Neuroscience*.
- Churchland y Llinás. (1998) *The Mind-Brain Continuum: Sensory Processes*. Mass.: The MIT Press.
- Churchland, P.S. (1989) *Neurophilosophy. Towards a Unified Science fo the Mind-Brain*. Mass.: The MIT Press.
- Coronado, G. (1997) "Evolución Darwiniana y Revolución Industrial". En Zamora, A., ed. cit.
- Damasio y Damasio. (1998) "Making Images and Creating Subjectivity". En Churchland y Llinás. ed. cit.
- Darwin, C. (1978) *El Origen de las Especies*. España: Editorial Espasa-Calpe.
- Florence y otros. (1998) "Large-Scale Sprouting of Cortical Connections After Peripheral Injury in

- Adult Macaque Monkeys". En *Science*, 6 de Noviembre.
- Frank-Kamenetskii. (1997) *Unraveling DNA: The most Important Molecule of Life*. Addison-Wesley.
- Gehring. (1995) "De la mosca el Hombre: un mismo supergen para el ojo." En *Mundo Científico*, Diciembre.
- Jordan, M.I. (1986) "An Introduction to Linear Algebra in Parallel Distributed Processing". En Rumelhart y McClelland. ed. cit.
- Lisman and Fallon (1999) "What Maintains Memories?" En *Science*, Vol 283, 15 de Enero.
- Merzenich. (1998) "Long-term Change of Mind". En *Science*, 6 de Noviembre.
- Merzenich y deCharms. (1998) "Neural Representations, Experience and Change". En Churchland y Llinás. ed. cit.
- Ramachandran y otros. (1998) "Illusions of Body Image: What They Reveal About Human Nature". En Churchland and Llinás. ed. cit.
- Rennie, J. (1993) "Los nuevos giros del ADN." En *Investigación y Ciencia*, Mayo.
- Rugg, M. (1998) "Memories are Made of This". En *Science*, Vol. 281, 21 de Agosto.
- Rumelhart y McClelland. (1986) *Parallel Distributed Processing. Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1. Foundations*. Massachusetts: The MIT Press.
- Schacter y Wagner. (1999) "Remembrance of Things Past". En *Science*, Vol. 285, 3 de Septiembre.
- Singer, W. (1998) "Neuronal Synchronization: A solution to the Binding Problem?" En Churchland y Llinás, ed. cit.
- Smolensky, P. (1986) "Information Processing in Dynamical Systems: Foundations of Harmony Theory". En Rumelhart y McClelland, ed. cit.
- Tiedge y otros. (1999) "RNA, Whither Goest Thou?" En *Science*, Vol. 283, 8 de enero.
- Trolov, T. (1977) "Organic Determinism and Teleology in Biological Research". En Butts y Hintikka, ed. cit.
- Waddington, C. H. (1958) "Teorías de la Evolución". En Barnett, ed. cit.
- Wickelgren, I. (1998) "The Cerebellum: the Brain's Engine of Agility". En *Science*, Vol. 281, Septiembre.
- Zamora, A. (Compilador) (1997) *El Otro Laberinto. Tecnología, Filosofía, Historia*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Celso Vargas

Instituto Tecnológico de Costa Rica