

# LA ORDENACIÓN PIRAMIDAL DEL CEREBRO Y EL ENJAMBRE DE LA CONCIENCIA. SEGUNDA PARTE

José Luis Díaz

## SUMMARY

The present paper offers a particular emergence, dual aspect, and dynamic system theory of the neural correlate of consciousness. The theory is grounded on two successive hypotheses supported with empirical evidences and concepts from the neurosciences, approximations to the sciences of complexity, and philosophical arguments. The first hypothesis is that consciousness emerges along with the highest level of brain function, i.e., at the intermodular domain of the whole organ. This hypothesis is upheld by two necessary requisites; the first is the generalized impression in neuroscience of the brain as an information-handling device, and that this property enables every mental activity, including consciousness, to take place. This concept is verified on several empirical grounds. If we take the synapse as a binary code of information, the computation capacity of the brain is in the order of 100 million Megabits. Even such enormous figure is limited and misleading because the synapse manifests not only two, but three possible informational states (excitation, rest, and inhibition), because there are subliminal potentials, and also a compact intracellular information machinery. Moreover, the informational requirement of consciousness is accurately delivered by Kuffler and Nichols' five ruling principles of brain function: (1) The brain uses electrical signals to process information; (2) Such electrical signals are identical in all neurons; (3) The signals constitute codes of codification and representation; (4) The origin and destiny of the fibers determines the content of information; (5) The meaning of the signals lies in the interactions. Even though the reference to *representation*, *content*, and *meaning* implies higher cognitive properties, it seems necessary to add a sixth principle for a more judicious neural implication in regard to consciousness. This principle is that information is processed in the brain in six levels of complexity, undergoing a gradual gain in density, integration, congruity, and capacity in each consecutive stratum. The six levels are the following: (1) *Organismic*, the integration of the nervous system with the rest of the organism systems; (2) *Organic*, the integration of the different modules in the whole brain; (3) *Modular*, the set of brain modules and their interconnections; (4) *Intercellular*, the designs and functional bindings among neuron cells; (5) *Cellular*, the set of brain cells, particularly neurons; (6) *Molecular*, the chemical components that mediate the transmission of information.

In this fashion, the second requisite to uphold the emergence of consciousness lies in establishing that the different levels of brain organization constitute a pyramidal arrangement. Certainly, the number of elements is greater in the lower levels, while the

integration of information is progressively enhanced in the upper levels. Moreover, this neuropsychological pyramid insinuates both an ascending cascade whereby the lower orders stipulate and influence the upper ones, and a progressive and convergent functional enrichment ultimately resulting in the *qualia*, *feeling*, and *awareness* attributes of consciousness. Information flows horizontally in each level, but it also overflows vertically in both directions. This pyramidal scheme is applied to clarify two particular aspects of brain function that are closely linked to consciousness: the electrical activity and the engram of memory. Such inquiry makes clear that a qualitative jump manifested by the emergence of various and dissimilar novelties occur at each layer of brain operation based upon a mass coordination. It seems feasible to envision the engram, and conceivably every other mental representation, as a plastic pattern involving all levels and aspects of brain operation, including the pinnacle where consciousness consolidates as the subjective aspect of the uppermost brain function.

As a result of the proposed stratified and pyramidal scheme of brain functions, the first hypotheses is strengthened and specified. Thus, presumably consciousness and the neural capacities correlated to it constitute two associated aspects emerging from such particular functional hierarchy at the organic level of the brain by the efficient connection of its modules. It would not be required that all the modules of the brain become interrelated during a conscious processing, but that they would be functionally available while some of them become progressively active by intermodular articulation thereby making possible the arising and unfolding of conscious mental operation streams. In order to reinforce this notion the visual system is invoked since the scene that is consciously perceived emerges from the coordination of some 40 modules that separately appear to operate unconsciously. At the moment that such high-hierarchy and complex function presumably appears, it would achieve a conscious correlate and become altogether able to exert a descending causality and supervene the operation of the lower orders, which, among other capacities, would permit voluntary action to take place.

In order to specify the first hypothesis asserting that consciousness emerges at the organic level of the brain along with the proficient inter-modular connectivity, a second hypothesis is formulated and justified in neuroanatomical, neurophysiological, and complexity science terms. The supposition is that the specific neural correlate of consciousness may be a function similar to a bird flock or an insect swarm orderly binding the operations of different modules in a cinematic, hipercomplex, coherent, and synchronic stream. The human brain contains some 400 cortical

and subcortical modules functioning as partially specialized stations that potentially interchange particularly codified information through some 2500 fibers or intermodular pathways. The hypothesis requires that information complexity undergoes a further and substantial gain of attributions through the concise and prolific connectivity of the different modules. In this regard, it is supposed that a stream of coherent activation is constituted in the conscious brain by the intermodular dynamics and that such dynamics may acquire global patterned properties in a similar way as bird flocks and so-called *intelligent* swarms achieve unanimously shifting dynamics. This particular idea is supported with complexity science models of the remarkable performances of large groups of birds and insects and with the known behavior of massive populations of neurons. In so far as this would be a complex function operating at the limits of equilibrium resulting from local dynamics of the brain subsystems, the self-organization of high level brain functions justifies the notion that a dynamic coupling among modules can and may result in complex cognitive properties and consciousness.

Intermodular brain dynamics is conceived here as an emergent, unbound, synchronic, hypercomplex, highly coherent, and tetradiimensional process capable to navigate, steer, swirl, split, and flow throughout the brain and thereby connect very diverse systems in a fast and efficient manner. In the same way, its putative subjective correlate, the conscious process, can be conceived as an emergent, voluntary, unified, qualitative, and narrative process capable to access, coordinate, and integrate multiple local information mechanisms. The hypothesis poses that the conscious transformation of information is correlated, moment to moment and point to point, with the intermodular processing that evolves in the manner of a bird flock or swarm dynamics. It is finally posed that brain intermodular dynamics correlated to consciousness consolidates by the convergence of an ascending bottom-up organization of the different ranks of brain operation, and by the descending top-down influx of the social, cultural, and environmental information where the individual is immersed.

**Key words:** Consciousness, brain, emergence, brain correlate of consciousness, brain functional hierarchy, brain modularity, brain connectivity, dynamical systems, dual aspect theory.

## RESUMEN

El presente trabajo plantea una teoría emergente y dinámica sobre el fundamento nervioso de la conciencia basada en dos hipótesis sucesivas que se apoyan en evidencias provenientes de las neurociencias, en aproximaciones a las ciencias de la complejidad y en varios argumentos filosóficos. La primera de las hipótesis es que la conciencia emerge junto con el nivel más elevado de la función cerebral, es decir, en el lindero intermodular del órgano completo. Para fundamentar esta idea se establecen dos requisitos necesarios, el primero es el concepto generalizado en las neurociencias del cerebro como un órgano especializado en operar información y que en ello radican las actividades mentales, incluyendo a la conciencia. El concepto se justifica por varias razones. La capacidad de cómputo del cerebro, tomando a la sinapsis como un código binario de información, sería del orden de los 100 millones de Megabits. Esta enorme cifra es aún limitada y engañosa, pues la sinapsis tiene tres estados posibles, excita-

ción, reposo e inhibición, además de que existen señales subumbras y una densa maquinaria molecular de información intracelular. Para ilustrar el requisito *informacional* de la conciencia es oportuno referir la teoría de la función cerebral expresada por Kuffler y Nichols en cinco principios rectores: (1) El cerebro usa señales eléctricas para procesar la información; (2) Las señales eléctricas son idénticas en todas las neuronas; (3) Las señales constituyen códigos de decodificación y representación; (4) El origen y destino de las fibras determina el contenido de la información; (5) El significado de las señales está en las interconexiones. Aunque al mencionar *representación*, *contenido* y *significado* se implican propiedades cognoscitivas y conscientes, es necesario agregar un sexto principio en el sentido de que la información es procesada en el cerebro en los siguientes seis niveles de complejidad, en cada uno de los cuales sufre una ganancia cualitativa de integración, densidad y alcance: (1) *Organísmico*: La integración del sistema nervioso en el resto de los sistemas corporales; (2) *Orgánico*: La integración de los diversos módulos cerebrales en el encéfalo; (3) *Modular*: El conjunto de los módulos cerebrales y sus interconexiones; (4) *Intercelular*: Los diseños y enlaces funcionales entre neuronas; (5) *Celular*: El conjunto de las células cerebrales; (6) *Molecular*: Los componentes químicos del cerebro que intervienen en la transmisión de información.

De esta suerte, el segundo requisito para fundamentar la emergencia de la conciencia estriba en establecer que los niveles de organización cerebral están constituidos de una manera piramidal, pues el número de sus componentes es mayor en los niveles inferiores en tanto que la integración de la información es sucesivamente mayor en los niveles superiores. Además, la pirámide neuropsicológica insinúa tanto una cascada ascendente por la cual los órdenes nerviosos inferiores estipulan e influyen en los superiores como un enriquecimiento funcional progresivo por la convergencia de estratos ascendentes en una síntesis que desemboca en el *sentir* y el *percibir* propios de la conciencia. La información fluye horizontalmente en cada nivel, pero también lo hace verticalmente en ambos sentidos. Este esquema se aplica para esclarecer dos aspectos particulares de la función cerebral ligados funcionalmente a la conciencia: el proceso eléctrico y el engrama de la memoria. En cada nivel ocurre un brinco cualitativo manifestado por la emergencia de una novedad resultante de una coordinación en masa y es consecuente concebir al engrama y a la representación mental como una modificación plástica a todos sus niveles y en varios de sus aspectos, incluyendo el vértice consciente.

De acuerdo al procesamiento estratificado de información y al esquema piramidal de la función cerebral se refuerza y especifica la primera hipótesis en el sentido que la conciencia y las aptitudes neurológicas correlacionadas con ella constituyen dos aspectos que surgen de esa jerarquía funcional en el nivel orgánico del cerebro enlazado por la eficiente conexión entre sus módulos. No sería necesario que todos los módulos del cerebro se activen durante el procesamiento consciente, pero sí que se encuentren disponibles en tanto algunos de ellos se van activando sucesivamente y dando lugar a secuencias de operaciones conscientes. Para respaldar esta idea se revisa el sistema visual en el cual la escena que vemos conscientemente surge de la coordinación de unos 40 módulos del cerebro que por separado operan de forma inconsciente. Una vez que surge esta función de alta jerarquía que suponemos correlacionada con la conciencia ésta se encontraría en la aptitud de ejercer una causalidad descendente y modificar la operación de los órdenes más básicos, lo cual explicaría, entre otras cosas, la conducta voluntaria.

Para afinar la primera hipótesis en el sentido de que la conciencia surge en el nivel orgánico gracias a la *conectividad intermodular*, se establece la segunda con el alegato de que el *correlato* nervioso más específico de la conciencia puede ser una función similar a una bandada de pájaros o a un enjambre funcional que enlaza de manera cinematográfica, hipercompleja, coherente y sincrónica a diversos módulos cerebrales. Esta hipótesis se justifica con datos neuroanatómicos, neurofisiológicos y de las ciencias de la complejidad. El cerebro humano contiene aproximadamente 400 módulos corticales y subcorticales que funcionan como estaciones parcialmente especializadas que potencialmente intercambian sus operaciones mediante unas 2500 fibras o haces intermodulares. La hipótesis requiere que la complejidad de la información sufra una ganancia substancial de atribuciones por la conectividad de los módulos. En este sentido se supone que en el cerebro consciente ocurre un flujo coherente de activación constituido por una dinámica intermodular que puede adquirir las propiedades globales de una bandada de pájaros o un enjambre inteligente. Esta noción se fundamenta tanto en modelos del notable comportamiento unificado de grandes conjuntos de aves o insectos realizados en las ciencias de la complejidad, como en el comportamiento cooperativo de poblaciones masivas de neuronas. En tanto función propia de un sistema complejo fuera del equilibrio resultante de dinámicas locales estipuladas en los subsistemas, la auto organización de pautas funcionales de alto nivel del cerebro justifica la idea de que un acoplamiento dinámico entre módulos pueda llegar a manifestar capacidades cognitivas superiores como es la conciencia.

La dinámica intermodular del cerebro puede concebirse como un proceso emergente, auto-ordenado, desatado, sincrónico, *hipercomplejo*, altamente coherente y *espaciotemporal* apto para navegar, pulular, girar, escindirse o afluir a través del encéfalo y enlazar sus diversos subsistemas de forma veloz y efectiva. De la misma manera, su putativo reverso subjetivo, es decir el procesamiento consciente, es un desarrollo emergente, atento, voluntario, unificado, complejo, cualitativo y narrativo capaz de acceder, coordinar e integrar múltiples mecanismos de información locales. La hipótesis plantea que la transformación consciente de información se correlaciona momento a momento y término a término con el procesamiento que se despliega entre módulos cerebrales en forma de una dinámica tipo parvada o enjambre. En tanto sistema emergente, la dinámica intermodular del cerebro surgiría por la convergencia de la organización ascendente (*bottom-up*) de los diversos niveles de operación del encéfalo y por el influjo descendente (*top-down*) del contexto social y ambiental de la información en los que el individuo está inmerso.

**Palabras clave:** Conciencia, cerebro, emergencia, *correlato* nervioso de la conciencia, jerarquía funcional del cerebro, *modularidad cerebral*, *conectividad cerebral*, sistemas dinámicos, teoría del doble aspecto.

## LA EMERGENCIA DE LA CONCIENCIA

De acuerdo al esquema piramidal es patente que, en tanto procesamiento de información, sería descamulado e improductivo situar a la memoria, en tanto conjunto de propiedades cognoscitivas, fuera o al margen de los niveles estructurales y funcionales del

sistema nervioso que hemos definido. Sería igualmente estéril definir a la conciencia como una propiedad emergente por fuera de tal ordenación. Esto ocurre de hecho cuando simplemente se plantea que la conciencia emerge de la actividad cerebral sin considerar cómo lo hace o discernir en cuál nivel de su escalafón ocurre. La alternativa que podemos esbozar en referencia al esquema piramidal es de hecho más cómoda y digerible que la de postular un emergente de naturaleza imprecisa sólo en términos fenomenológicos y consiste en pensar que la conciencia y las propiedades neurológicas correlacionadas con ella constituyen dos aspectos surgidos de esa jerarquía funcional. El reto de interés en esta hipótesis sería doble: el deslindar precisamente en cuál nivel de organización se debe ubicar al procesamiento consciente de información y penetrar el mecanismo nervioso correlacionado con el procesamiento consciente. Antes de abordar el segundo reto, es necesario hacer un intento de acotar la primera incógnita utilizando varios argumentos empíricos.

Existe un gran cúmulo de evidencia en el sentido de que no estamos conscientes directamente de los eventos y estímulos sensoriales, sino que nos hacemos conscientes de ciertas operaciones que realiza el cerebro sobre las representaciones nerviosas de esos eventos y estímulos. Esto implica que los niveles más básicos de la jerarquía piramidal operan de manera inconsciente. No sólo significa que las neuronas individuales no requieren ser conscientes, sino también que muchas de las operaciones que podemos considerar propiamente mentales en el sentido de que consisten en representaciones y transfiguraciones de información se procesan fuera de la conciencia, lo cual está muy bien documentado en las ciencias cognitivas (Velmans, 1991). Este ámbito de la información constituye lo que se ha dado en denominar el «inconsciente cognitivo», aunque para no confundir el postulado con la teoría psicoanalítica, con la cual puede haber cierto traslape de interés, es conveniente puntualizarlo sencillamente como el procesamiento inconsciente de información cognitiva.

Para ilustrar mejor este postulado podemos invocar al sistema visual, ampliamente analizado por Zeki en 1993. Existen unos cuarenta módulos nerviosos en la parte caudal del cerebro que reciben información de la retina. Cada uno de ellos procesa predominante pero no exclusivamente un tipo de información de la escena ante los ojos, como líneas, colores, texturas, orientación. Los módulos están densamente conectados entre sí y del engranaje y coordinación entre ellos surge o emerge, de una manera aún no dilucidada, la escena que vemos. Este arreglo de estados sucesivos que resulta en un evento consciente parece ser la regla para todas las funciones mentales pues la información más

elemental se procesa en sectores específicos que se conocen hoy día con bastante precisión. Sin embargo, las funciones mentales superiores requieren necesariamente de la conexión entre estos módulos. Dehaene, Sergent y Changeux (2003), han propuesto que el procesamiento de la información visual desemboca en un estado cerebral global al transcurrir mediante conexiones recíprocas entre módulos desde un procesamiento inconsciente hasta la percepción consciente. La tarea consciente no reside entonces en algún lugar específico, sino que es una función dinámica y no lineal de enlace entre lugares concretos cuya actividad *intramodular* y circunscrita no es necesariamente consciente. Según lo afirma Ward (2003), la conciencia puede surgir más adecuadamente de oscilaciones sincrónicas que ocurren a través del encéfalo en vez de las oscilaciones locales que se presentan cuando un área sensorial codifica un estímulo determinado.

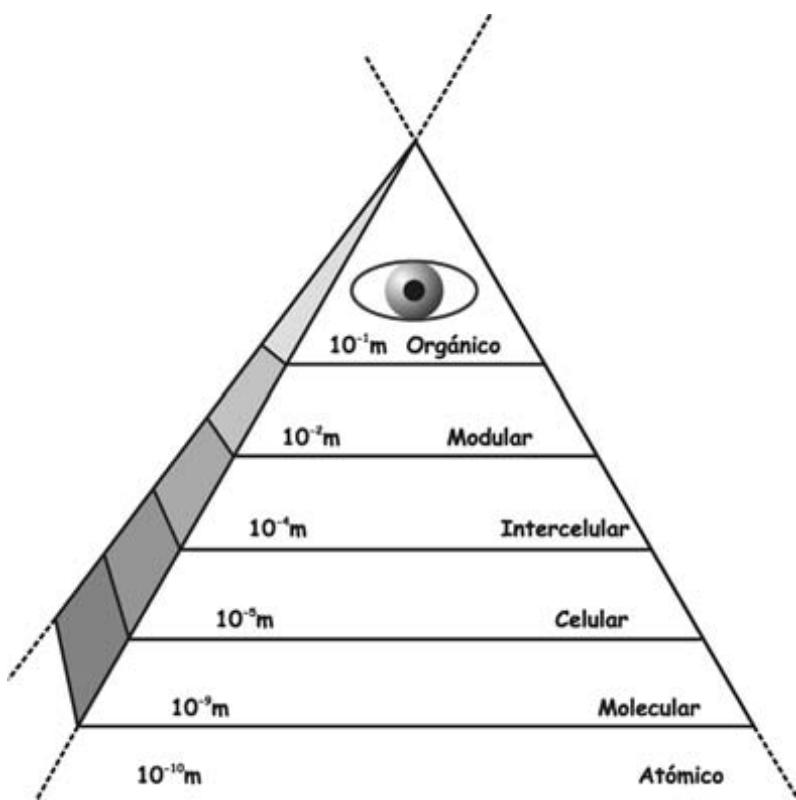
Después de sugerir que el enlace funcional entre los módulos visuales ocurre en forma de un acoplamiento cercano a los 40 Hz del EEG, Crick y Koch (1990) presentaron evidencias de que la actividad en la zona primaria de recepción visual en la corteza occipital del cerebro opera de manera inconsciente. Es sólo cuando esta información se comunica con otros módulos cerebrales, particularmente frontales, que se toma conciencia de la visión (Crick y Koch, 1995). Es entonces en el nivel intermodular, propiamente del órgano cerebral funcionando como un todo, donde podemos establecer que ocurre o emerge el aspecto consciente del procesamiento de la información cognitiva. Existen nuevas evidencias empíricas que respaldan esta aseveración. Los neurólogos de la Universidad de Lieja han mostrado mediante tomografía de emisión de positrones (PET) que durante el estado vegetativo en el que se mantiene la sensibilidad pero se opaca la conciencia, ocurre una disminución de la *conectividad* entre las cortezas de asociación y especialmente entre las zonas frontales y el cíngulo (Laureys y cols., 1999). Los autores consideran que este hallazgo refuerza la hipótesis de que la conciencia es una propiedad emergente de las redes nerviosas funcionales del cerebro. En un abordaje muy distinto, el grupo de Giulio Tononi en la Universidad de Wisconsin ha detectado mediante estimulación magnética transcraneal y electroencefalografía que el estímulo se propaga ampliamente durante el sueño MOR, en tanto que no se difunde en el sueño de ondas lentas (Massimini y cols., 2005). Dado que las ensueños se asocian a la fase MOR del sueño, en tanto que casi no se reportan en la fase de ondas lentas, se puede colegir que la conciencia requiere de una propagación de señales entre zonas corticales. No es necesario, desde luego, que todos los módulos del cerebro se activen durante el procesamiento consciente.

te de información, pero sí que se encuentren funcionalmente disponibles en tanto algunos de ellos se van activando sucesivamente y dando lugar a secuencias de operaciones conscientes.

Esta idea de emergencia de la conciencia como un aspecto de la función cerebral en un alto nivel de integración jerárquica puede ilustrarse con un modelo derivado de la pirámide cerebral planteada antes. El diagrama aparece en la figura 1 y consiste en una pirámide de niveles de organización nerviosa en cuya cúspide y vértice se esboza un ojo que simboliza a la conciencia como el aspecto subjetivo del nivel más alto de integración cerebral.

La pirámide es sugerente de varias propiedades destacables y pertinentes a la hipótesis intermodular y en particular a la hipótesis del enjambre o de la parvada que detallo abajo. La primera de tales propiedades es el escalamiento funcional que adecuadamente insinúa una cascada causalmente ascendente por la cual los órdenes nerviosos inferiores estipulan e influyen en los superiores. La pirámide graduada expresa el enriquecimiento funcional circunscrito y progresivo en el sentido de que en un estrato superior convergen y cristalizan funciones inéditas que dependen del estrato inferior trabajando en conjunto. En particular, la pirámide plantea la integración y la convergencia de estratos jerárquicamente organizados en una síntesis ascendente, sucesiva y creciente que en determinado momento desemboca en ese *sentir* y ese *percibir* de la información que son propios de la conciencia.

En segundo lugar, las diversas caras de la pirámide pueden pensarse como aspectos de su estructura y su función. Arriba hemos explorado varios de ellos: un aspecto estructural, otro de manifestaciones eléctricas, un tercero del engrama de la memoria. Aunque se nos presenten como fenómenos distintos que requieren diferentes técnicas de registro y perspectivas de análisis, los múltiples aspectos de la pirámide están funcionalmente enlazados, pues son manifestaciones diversas de un proceso de naturaleza psicofísica. Finalmente, en tercer lugar, el ojo en el vértice de la pirámide simboliza a la conciencia y bien se podría decir que ésta emerge de todos los arreglos jerarquizados que le dan origen, disposiciones necesariamente constituidas por elementos nerviosos, es decir por material viviente sensible y excitable, acomodado y articulado en grados cada vez más altos de organización. Ahora bien, como veremos a continuación, además de producirse por la cascada ascendente de propiedades emergentes cada vez más elaboradas, una vez que surge aquella función de alta jerarquía que identificamos con la conciencia ésta se encuentra en la aptitud de ejercer una causalidad descendente y modificar la operación de los órdenes más básicos.



**Fig. 1.** Representación piramidal de las jerarquías nerviosas que dan origen a una función de alto nivel en la que surge y por la que opera la conciencia.

### EL ENJAMBRE INTERMODULAR DEL CEREBRO COMO POSIBLE CORRELATO NERVIOSO DE LA CONCIENCIA

Para el mejor entendimiento del fundamento nervioso de la conciencia no basta con postular su nivel de emergencia en la pirámide cerebral, en este caso el nivel orgánico, pues es necesario, de acuerdo a la propia teoría que aquí desarrollo, elaborar una hipótesis más específica del mecanismo nervioso que hace posible tal ocurrencia.

Esta es la hipótesis: el fundamento, la contrahaz o el *correlato* nervioso de la conciencia puede ser una función similar a una bandada de pájaros o a un enjambre que enlaza de manera cinematográfica, hipercompleja, coherente y sincrónica a los diversos módulos cerebrales. En tanto sistema dinámico y en virtud de su complejidad, la función de alto nivel adquiriría propiedades emergentes provistas ya de las aptitudes más distintivas y enigmáticas de la conciencia, como lo son la autoconciencia, el conocimiento o la voluntad. Me aboco ahora a justificar y sostener esta hipótesis con varias evidencias de las neurociencias y algunos argumentos provenientes de las ciencias de la complejidad.

El justificante neuroanatómico de la propuesta es el

siguiente. En el nivel de organización cerebral que hemos llamado modular existen al menos 400 sectores, áreas o módulos relativamente especializados en el cerebro. Estos incluyen a las áreas de la corteza cerebral delimitadas por Brodmann y que se han mantenido con su nomenclatura y numeración por casi un siglo, pero además a las regiones celulares o «núcleos» subcorticales que puedan estar involucrados en las funciones conscientes. No sabemos con precisión cuáles lo están y cuáles no, pero según ha argumentado convincentemente Roy John (2002) en su meticulosa hipótesis del origen nervioso de la conciencia, es justificado suponer que buena parte de los núcleos subcorticales del telencéfalo de reciente adquisición filogenética estén involucrados en funciones mentales conscientes.

Siguiendo con la neuronatomía, pero ahora en referencia a las conexiones posibles y existentes entre estos módulos, se puede calcular que si cada uno de ellos estuviese directamente conectado con el resto, existirían unas 80.000 proyecciones, haces o vías nerviosas en el cerebro, en tanto que en la actualidad están descritas solamente unas 2500 y no debe haber muchas más. A esta impresionante restricción en el acoplamiento

o, como se dice ahora, en la *conectividad* nerviosa, podemos concebirla de manera similar a como se establece una ruta de camiones urbanos en el sentido de que entre dos sectores de una ciudad no debe uno de tomar más de dos o a lo sumo tres camiones distintos. De la misma forma, entre dos módulos cualesquiera del cerebro, no parecen mediar más de dos o tres sinapsis o relevos de información. Como cabe esperar por un diseño tan económico y eficiente, este acomplimiento intermodular debe ser un trazado que ha sido rigurosamente seleccionado a través de una prolongada encefalización.

La tendencia tradicional de especular sobre cuáles regiones cerebrales contribuyen a la conciencia ha sido gradualmente reemplazado por consideraciones sobre la integración y la complejidad de la información, como sucede con la hipótesis del «núcleo dinámico» de la conciencia de Tononi y Edelman (1998). Esta hipótesis propone que la experiencia requiere niveles elevados de complejidad nerviosa definidos por cambios pautados en la conectividad de los componentes funcionales del cerebro. De acuerdo a lo predicho por la hipótesis y mediante técnicas electroencefalográficas, Burgess, Rehman y William (2003) cuantificaron mayor complejidad nerviosa en el momento que los sujetos llegaron a percibir la imagen tridimensional oculta en un esterograma en relación a los momentos previos en los que contemplaban el mismo diagrama pero sin haber logrado discernir aún la imagen tridimensional.

En lo que se refiere al fundamento neurofisiológico de la propuesta se debe decir que los módulos cerebrales ejecutan operaciones bastante singulares en referencia a sus contenidos y que despachan los resultados de su ejecución a otras áreas o módulos. La especialización de los módulos es un asunto complicado pues no es el caso que cada módulo realice una sola operación particular, sino que ejecuta predominante pero no exclusivamente una función, de tal manera que hay otros sectores celulares que realizan la misma función, o al menos que se activan con estímulos o tareas similares (Shallice, 1988). Esta especialización parcial y distribución restringida provee a la función cerebral de una característica muy peculiar marcada por su maleabilidad biológica, es decir por lo que se denomina en las neurociencias la plasticidad cerebral, la capacidad de que varios módulos puedan desarrollar las funciones primarias de algún otro. En cualquier caso, en lo que se refiere a la comunicación entre los módulos es posible concebir que en el cerebro viviente y consciente ocurre un flujo coherente de activación en cada momento. Llamemos a ese flujo *la dinámica intermodular del cerebro* y pensémoslo e imaginémoslo ahora como una bandada de pájaros o un enjambre inteligente, lo cual constituye el meollo funcional de la

hipótesis y requiere de una argumentación correspondiente a las ciencias de la complejidad y algunos hallazgos de las neurociencias.

Las bandadas o parvadas de pájaros, junto con la conducta de las escuelas de peces, los enjambres de insectos o las estampidas de ciertas manadas de mamíferos, conforman espectaculares acontecimientos dinámicos a la vez naturales y sociales que han llamado fuertemente la atención de los físicos. Los desplazamientos de la parvada o del enjambre constituyen una unidad en el sentido de que todos los individuos navegan al unísono y realizan simultáneamente los mismos giros e idénticas piruetas a grandes velocidades. La parvada mantiene su cohesión global mientras se desplaza en direcciones diversas o evade obstáculos. Por análisis de videotapes y de películas de parvadas en movimiento se ha descartado la hipótesis de que un pájaro líder sea el que encabeza o inicia la coreografía de la parvada, pues los giros ocurren en todos los individuos en lapsos inferiores al tiempo de reacción que llevaría el percibir el movimiento del supuesto líder y de secundar su acción. De esta forma se puede hablar no sólo de un movimiento unificado, sino también de un fenómeno claramente emergente, en el sentido de que la parvada se comporta como un solo individuo conformado por cientos o miles de unidades que actúan al unísono y de acuerdo con reglas y directrices que por el momento no son bien conocidas. De acuerdo con los modelos computacionales disponibles (Reynolds, 1987) es probable que los pájaros simplemente se alineen con sus vecinos. La conducta global sería entonces un efecto agregado de las trayectorias contingentes de los individuos. El movimiento de la parvada simulada por Reynolds surge de un modelo distribuido en el que cada actor individual navega en estricto arreglo con su ambiente local inmediato. Sin embargo, no existe aún una teoría acabada de cómo es que un grupo enorme de pájaros individuales de movimiento potencialmente desordenado se transforma en una parvada unificada durante un deslizamiento tan rudo y conexo como aparatoso. Es muy probable que se trate de una dinámica propia de un sistema complejo fuera del equilibrio y esto es precisamente lo que parece particularmente interesante como modelo de la conciencia para explicar las propiedades fenomenológicas a partir de sistemas dinámicos posiblemente existentes en el cerebro como ocurren en el comportamiento confederado de ciertas especies animales.

La dinámica de la parvada es un ejemplo notorio de propiedad emergente en el sentido de que una conducta muy compleja surge de un grupo de leyes locales relativamente simples y no lineares. Esto da como resultado una dinámica global característica de la con-

ducta de los grupos de seres vivos que se desarrolla en los límites del equilibrio y no es ni totalmente azarosa ni totalmente previsible, es decir, de una cinemática llamada «caótica» en las ciencias de la complejidad. Una de las características de los modelos artificiales de la vida es precisamente la emergencia de efectos macroscópicos como resultantes de dinámicas locales estipuladas en los subsistemas. Esta aproximación ha tenido un gran éxito en la ciencia cognitiva basada en redes *conexionistas* con sus capacidades de aprendizaje sin una supervisión central (Churchland, 1995). La teoría de los sistemas dinámicos no lineares, conocida como teoría del caos, ha permitido estudiar la auto organización de pautas funcionales del cerebro reconstruidas por series electroencefalográficas de tiempo (Stam, 2005). La dinámica detectada en sujetos humanos durante la vigilia habitual se caracteriza por una complejidad elevada y una sincronización rápidamente fluctuante distintivas de una cinética que Stam denomina «crítica» por ser cercana a transiciones de fase.

De gran relevancia para nuestra hipótesis es también la llamada *inteligencia del enjambre* (*Swarm Intelligence*) que ha resultado un enfoque novedoso y promisorio de la *inteligencia artificial*, en especial de la *vida artificial*, es decir la simulación de propiedades vivientes en programas de la computadora. La inteligencia del enjambre es la propiedad de un sistema de conductas colectivas por medio de la cual los agentes interactivos, que no son necesariamente individuos inteligentes, se relacionan entre sí y con su medio causando la emergencia de pautas globales coherentes con verdaderas capacidades cognitivas no sólo en el sentido de resolución de problemas, sino incluso de memoria (Bonabeau y cols., 1999). De esta manera es posible conceptualizar a un enjambre como un conjunto de agentes que a través de su comunicación mutua y su relación con el ambiente logran conjuntamente resolver problemas que no son capaces de solventar individualmente. Tareas tan conocidas como las columnas de hormigas que acarrean hojas o remueven obstáculos son ejemplos al caso e implican la ocurrencia de una memoria colectiva. Es decir: el enfoque de la inteligencia del enjambre provee de una posible plataforma de exploración de conductas colectivas que resuelven problemas sin la necesidad de un control centralizado o de una representación global. Tal conducta emergente autónoma justifica la idea de que una conexión funcional y dinámica entre módulos basada en la actividad de enormes poblaciones de neuronas pueda llegar a poseer capacidades cognitivas superiores como lo son la inteligencia, el conocimiento y la conciencia.

Ahora bien, a diferencia de las bandadas y los enjambres, el cuerpo y el cerebro no están conformados por agentes móviles sino relativamente fijos, como son

las neuronas o los módulos cerebrales. Sin embargo, podemos plantear que a través de sus comunicaciones se pueden constituir enjambres de actividad, verdaderas pautas espaciotemporales de actividad nerviosa (Díaz, 1997) o, según la elocuente metáfora de Cajal (Alvarez Leffmans, 1974) «bulliciosas colmenas». En «*La Sabiduría del Cuerpo*» el eminente fisiólogo Walter Cannon había intuido hace 70 años que la cooperación fisiológica de tejidos distantes a través de las señales nerviosas y moleculares provee de una especie de inteligencia flotante al organismo. Jesper Hoffmeyer (1997) define a este tipo de enjambres funcionales y densamente traslapados del cuerpo humano como *semióticos*, supongo que no en el sentido literal de que estén dotados de semántica, pero sí en el de que constituyen redes ordenadas de señales y de signos, fundamentos ambos de los significados.

Uno de los investigadores que más ha contribuido al estudio del comportamiento dinámico de grandes poblaciones de neuronas es Walter Freeman de la Universidad de Berkeley quien utiliza una aproximación «mesoscópica» o de mediano alcance para detectar campos de actividad EEG asociados a estímulos condicionados (Freeman, 2005). Sus modelos sugieren que la neocorteza se estabiliza funcionalmente en una actividad crítica auto organizada que permite la formación prácticamente instantánea de campos cooperativos mediante transiciones de fase que pueden abarcar desde unas cuantas columnas hasta todo un hemisferio. Como sucede con el «campo neuronal» que resuena en una variedad de estructuras cerebrales planteado por Roy John (2002) como sostén nervioso de la conciencia, los «campos cooperativos» de Freeman son particularmente compatibles con el comportamiento que se podría esperar de un enjambre coherente de actividad neuronal.

## EL ENJAMBRE CEREBRAL COMO SISTEMA DINÁMICO Y EL PROCESAMIENTO CONSCIENTE DE INFORMACIÓN

El punto que importa sostener ahora en consecuencia de estas evidencias y conjeturas es que, al adquirir características de bandada o enjambre, la dinámica intermodular del cerebro emularía ciertas propiedades y requerimientos del procesamiento consciente de información (cuadro I).

Por ejemplo, en referencia al requisito de la disponibilidad global (Chalmers, 1997) y en similitud con la coreografía de la parvada o con el talento del enjambre, se puede suponer que la dinámica intermodular del cerebro sea un proceso intensamente dinámico y por ello apto para navegar, pulular, girar, escindirse o afluir a través del encéfalo y enlazar sus diversos

**CUADRO I. Compatibilidad entre la dinámica intermodular del cerebro y el proceso consciente**

Función	Dinámica intermodular del encéfalo	Procesamiento consciente
Disponibilidad global	Proceso tipo parvada o enjambre capaz de navegar, pulsular, girar, escindirse o afluir a través del encéfalo	Capaz de acceder, coordinar e integrar múltiples mecanismos de información locales
Sistema dinámico	Proceso emergente, desatado, sincrónico, hipercomplejo, altamente coherente y tetra-dimensional	Proceso emergente, voluntario, unificado, complejo, cualitativo, narrativo
Sistema jerárquico	Emerge por la organización ascendente ( <i>bottom-up</i> ) del encéfalo y al influjo descendente ( <i>top-down</i> ) del contexto ambiental de la información	Neurológicamente maleable ( <i>bottom-up</i> ) y dependiente ( <i>top-down</i> ) del contexto social y ecológico de la información

subsistemas de forma veloz y efectiva. En concordancia necesaria con esta propiedad, el procesamiento consciente es capaz de acceder, coordinar e integrar múltiples mecanismos de información locales, como sucede, por ejemplo cuando se unifican una imagen mental, un pensamiento y una emoción en un recuerdo particular, cuatro operaciones originalmente segregadas en distintos substratos y módulos nerviosos que se reúnen en un sólo contenido de conciencia.

Ahora bien, tanto la dinámica intermodular del cerebro como el procesamiento consciente muestran propiedades típicas de un sistema dinámico unitario (Meintzer, 1994) en el sentido de que, en similitud con el comportamiento de una parvada o enjambre, la dinámica intermodular constituiría un proceso emergente, desatado, sincrónico, hipercomplejo, altamente coherente y tetradimensional. Por su parte el procesamiento consciente es un proceso emergente, voluntario, unificado, complejo, cualitativo y narrativo. En conjunto las dos capacidades explicarían la unidad, trayectoria, coordinación y asignación de información consciente. Dadas estas características concurrentes suponemos que se trata de dos caras de la misma moneda que, aunque han determinado aproximaciones, abordajes y perspectivas científicas diferentes, deben ser esencialmente complementarias. He venido planteando desde hace lustros esta solución de doble aspecto al problema mente-cuerpo derivada de Baruch Spinoza (Díaz, 2000).

Finalmente, la hipótesis de la dinámica intermodular tipo enjambre puede llegar a tener una comprobación empírica en cada uno de sus dos aspectos, el fenomenológico-subjetivo y el neurofisiológico-objetivo, lo cual eventualmente haría posible una correlación entre ellos en tiempo real. En efecto, se puede suponer que la dinámica intermodular pueda ser visualizada en un futuro no muy lejano con imágenes cerebrales cinéticas, o mejor aún, *cinemáticas*. Una película en tiempo real de la resonancia magnética funcional (fMRI) del cerebro, por ejemplo, revelaría la actividad dinámica entre zonas cerebrales específicas como lo vaticinan varias investigaciones actuales. El grupo de investigación del INSERM en París ha propuesto una técnica de dos pasos mediante fMRI para identificar

redes funcionales de gran escala en el cerebro activo (Bellec y cols., 2005): en primer lugar se identifican las regiones que muestran una actividad temporal homogénea atada al estímulo y luego se encuentran las interconexiones funcionales comparando las correlaciones entre estas regiones contra un fondo de ruido. Bartels y Zeki (2005) del University College en Londres han propuesto que el curso temporal de la actividad particular de cada subdivisión cortical en condiciones naturales conforma una suerte de huella por la cual es posible mapear su distribución espacial y eventualmente detectar su conectividad y su papel funcional. Los autores han puesto a prueba su hipótesis usando fMRI en voluntarios mirando una película de James Bond, y en cuyos cerebros se identifican voxels pertenecientes a distintas subdivisiones funcionales. Además de esto, la correlación entre actividades temporales de regiones distantes encontradas en los sujetos reflejan su conformación de conexiones. Esta «cronoarquitectura» de la corteza cerebral puede llegar a desarrollarse como una técnica útil para detectar la dinámica intermodular del cerebro en el futuro próximo.

Al tiempo que se registra la transformación dinámica intermodular del cerebro, el proceso consciente podría ser evaluado con un análisis narrativo de los informes verbales en primera persona, como lo hemos planteado en otra parte (Díaz, Díez Martínez y Paniagua, 1998). La correlación momento a momento de estos dos registros podría establecer una aproximación psicofisiológica novedosa para desentrañar a un nivel de integración personal las relaciones entre conciencia y cerebro al cotejar una perspectiva en tercera persona (el registro de la dinámica intermodular cerebral) con otra en primera persona (el informe verbal estandarizado).

## EL ORIGEN CONVERGENTE DE LA CONCIENCIA

En conformidad con otras sugerencias (Meintzer, 1994) he propuesto ahora que para cumplir con los requerimientos que plantea la fenomenología, los sistemas biológicos involucrados en la modulación y transmisión de información consciente deben ser sistemas di-

námicos del más alto nivel de integración cerebral. Estos no consistirían sólo en la actividad general de neuronas específicas ni en la actividad organizada de vastas redes neuronales, sino que es crucial para su comprensión y *modelaje* la especificación de módulos cerebrales activados, de las conexiones entre ellos y, en particular, de las energéticas pautas que los deben enlazar a lo largo del tiempo.

Desde el momento en el que emerge por la actividad dinámica intermodular del cerebro, un proceso de conciencia tiene un desarrollo en el tiempo durante el cual ocurre una evolución discreta, advertida, alerta, explícita y lúcida de contenidos mentales, como ocurre en el modelo del procesamiento consciente desarrollado con anterioridad (Díaz, 1996) y que corresponde a un modelo derivado del concepto de William James de «la corriente de la conciencia». Según la hipótesis que específico ahora, el desarrollo del proceso consciente se correlacionaría momento a momento y término a término con el procesamiento de información que se desenvuelve entre módulos cerebrales en forma de una dinámica tipo parvada o enjambre.

Desde luego es necesario advertir que la dinámica intermodular por sí misma no podría explicar totalmente a la conciencia a no ser que esté organizada en la totalidad del cerebro, el cerebro en el organismo vivo y éste en interacción con su medio social y ecológico. Es decir, en tanto sistema emergente, la dinámica intermodular del cerebro surgiría por la organización ascendente (*bottom-up*) de los diversos niveles de operación del encéfalo y por el influjo descendente (*top-down*) del contexto social y ambiental de la información en el que el individuo está inmerso. De la misma manera y por la misma razón el procesamiento consciente es por una parte neurológicamente maleable desde la base de la pirámide y por otra dependiente del tejido social y ecológico de la información.

El credo emergentista tradicional se ve en este caso restringido por una noción de doble aspecto, pues lo que emerge no es una función descarnada, sino, por el contrario, encarnada en la función nerviosa más formada. La fusión sucesiva y el efecto mutuo de los diversos elementos representa, al final de peldaños sucesivos de organización cada vez más compleja, la aparición de algo completamente nuevo: una función nerviosa de alta jerarquía dotada de un aspecto mental de alto orden. La pléyade de los elementos nerviosos así engarzados acaba por fundirse y crear una función inédita de naturaleza psicofísica vigorosamente trascendente.

En efecto, postulo aquí de manera directa y recia una capacidad causal de la conciencia. Dado que la conciencia no está concebida como un epifenómeno o un producto colateral, sino como el aspecto

fenomenológico del emergente más encumbrado de los sistemas cerebrales, una vez que surge, este componente adquiriría no sólo capacidades dinámicas y vigorosas de navegación semejantes a una bandada de pájaros o a un enjambre en el encéfalo, sino propiedades causales «hacia abajo» (o *top-down*) en la jerarquía cerebral. De esta forma, una decisión conscientemente tomada, un deseo conscientemente aceptado, una creencia conscientemente ejercida, en tanto poseen un aspecto neurofisiológico de la más alta jerarquía, pueden y deben influir en una cadena de eventos nerviosos que desemboquen en cambios fisiológicos, comportamientos, expresiones y acciones. Para que esto ocurra es necesario postular que el procesamiento consciente tenga efectos causales sobre los sistemas motores del encéfalo y éstos sobre los sistemas musculares que controlan el movimiento. Todo ello es verosímil porque el procesamiento consciente se considera un aspecto del procesamiento neurológico del más alto nivel de integración, un fenómeno con plenas capacidades causales y productivas sobre el funcionamiento de los sistemas neurológicos, musculares o neuroendócrinos de menor jerarquía.

Por añadidura, esta capacidad expresiva de los sistemas conscientes a través del movimiento, del lenguaje y la acción del individuo tiene efectos diversos y potencialmente trascendentes sobre el sistema social y cultural. Esto es particularmente patente para las actividades creativas que se producen primero como un procesamiento consciente y luego se plasman o expresan mediante actos, expresiones, teorías científicas, productos de arte o técnica hacia el medio social, cultural y ecológico afectándolo en mayor o menor medida.

La presente hipótesis puede reconciliar dos corrientes relevantes al tema de la conciencia que se han mostrado tradicionalmente antagónicas y aun hostiles en su entendimiento. Por una parte la corriente biológica adjudica íntegra o predominantemente el fenómeno consciente a la operación del cerebro, sin la cual, en efecto, la conciencia no puede concebirse fuera de dimensiones espirituales en el terreno de la teología y sobre las que no puedo discurrir acertadamente pues, de acuerdo con la propia teoría que expongo, se me dificulta concebir una conciencia descarnada. Por otro lado las ciencias sociales consideran a la conciencia como un producto de la sociedad, de la ideología, de los valores, del lenguaje y, en una palabra, de la cultura en la que el individuo se gesta y expresa, lo cual es también un hecho sobresaliente de su naturaleza. El antropólogo Roger Bartra (2005) postula intrépidamente un «exocerebro» para identificar a este conjunto simbólico del medio social en estrecha conjunción causal con la conciencia subjetiva. La tesis planteada en el presente modelo es que la conciencia no es concebible sin

el concurso histórico, fáctico, sistemático, consonante y constante de ambas esferas, la cerebral de índole biológica y la cultural de carácter social. De hecho, según se postula aquí, es la convergencia de los dos factores lo que determina a la conciencia.

Por su naturaleza el proceso consciente existe y cursa dotado de tres principios unificados, el neurobiológico, el fenomenológico y el cultural, que hacen de él una fuerza distintiva de la vida en este planeta que constituye finalmente la historia, es decir que la determina y es determinado por ella como parte esencial de su devenir. La conciencia surge y existe como un fenómeno vital abocado al mundo interno del individuo y al mundo externo de la comunidad y el ambiente humanos. Este devenir lúcido, esta cinematográfica espontánea a la vez biológica y social es lo que provee a la conciencia de características psicológicas tan sorprendentes como la libertad de acción, la capacidad de conocimiento o la introspección. De esta manera la conciencia se erige como un verdadero epicentro de la personalidad y de la cultura humanas.

### Agradecimientos

Este trabajo fue elaborado durante dos comisiones que disfruté, antes de incorporarme a él y proveniente del Instituto de Neurobiología, al Departamento de Historia y Filosofía de la Medicina, Facultad de Medicina, ambos de la Universidad Nacional Autónoma de México. Agradezco a los dos grupos, en especial al doctor Carlos Viesca del segundo de ellos, su apoyo al proyecto que dio origen al presente trabajo.

### REFERENCIAS

1. ALVAREZ LEEFMANS FJ: *Las Neuronas de don Santiago*. Pangea Editores, México, 1994.
2. BARTELS A, ZEKI S: The chronoarchitecture of the cerebral cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society London Biological Science*, 360:733-750, 2005.
3. BERTRA R: El exocerebro: una hipótesis sobre la conciencia. *Ludus Vitalis*, 23:103-117, 2005.
4. BELLEC P, PERLBARG V, JABDI S, PELEGRINI-ISSAC M, ANTON JL y cols.: Identification of large-scale networks in the brain using fMRI. *Neuroimage*, 29:1231-1243, 2006.
5. BONABEAU E, DORIGO M, THERAULAZ G: *Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems*. University Press, Oxford, 1999.
6. BURGESS AP, REHMAN J, WILLIAMS JD: Changes in neural complexity during the perception of 3D images using random dot stereograms. *International J Psychophysiology*, 48:35-42, 2003.
7. CHURCHLAND PM: *The Engine of Reason, the Seat of the Soul*. MIT Press, Cambridge, 1995.
8. CHALMERS DJ: *The Conscious Mind*. Oxford University Press, Oxford, 1996.
9. CRICK F, KOCH C: Toward a neurobiological theory of consciousness. *Neurosciences*, 2:263-275, 1990.

10. CRICK F, KOCH C: Are we aware of neural activity in primary visual cortex? *Nature*, 375:121-123, 1995.
11. DEHAENE S, SERGENT C, CHANGEUX JP: A neuronal network model linking subjective reports and objective physiological data during conscious perception. *Proceedings National Academy Science USA*, 100:8520-8525, 2003.
12. DIAZ JL: The stream revisited: A process model of phenomenological consciousness. En: Hameroff S, Kaszniak A, Scott A (Eds.). *Toward a Scientific Basis of Consciousness*. MIT Press, Cambridge, 1996.
13. DIAZ JL: A patterned process approach to brain, consciousness and behavior. *Philosophical Psychology*, 10:179-195, 1997.
14. DIAZ JL, PANIAGUA R, DIEZ MARTINEZ E: El texto fenomenológico como objeto de análisis de los procesos conscientes. *Salud Mental*, 21:14-26, 1998.
15. DIAZ JL: Mind-body unity, dual aspect, and the emergence of consciousness. *Philosophical Psychology*, 13:393-403, 2000.
16. FREEMAN WJ: A field-theoretic approach to understanding scale-free neocortical dynamics. *Biological Cybernetics*, 92:350-359, 2005.
17. GOODMAN A: La teoría de la unidad orgánica: el problema mente cuerpo replanteado. En: Diaz JL, Villanueva E (eds.). *Mente Cuerpo*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1996.
18. HOFFMEYER J: *Semiotics Around the World*. Proceedings of the Fifth Congress of the International Association for Semiotic Studies. Irmengard Rauch, Gerald F Carr (eds.). Mouton de Gruyter pp. 937-940, Berlín/Nueva York, 1997.
19. JOHN ER: The neurophysiology of consciousness. *Brain Research Reviews*, 39:1-28, 2002.
20. KUFFLER SW, NICHOLLS JG: *From Neuron to Brain*. Sinauer Associates, Sunderland, 1976.
21. LAUREYS S, GOLDMAN S, PHILLIPS C, VAN BOGAERT P, AERTS J y cols.: Impaired effective cortical connectivity in vegetative state: preliminary investigation using PET. *Neuroimage*, 9:377-382, 1999.
22. LEVINE J: Materialism and qualia. The explanatory gap. *Pacific Philosophical Quarterly*, 64:354-361, 1983.
23. LEVY N, HORN D, RUPPIN E: Associative memory in a multi-modular network. *Neural Computation*, 11:1717-1737, 1999.
24. MAINZER K: *Thinking in Complexity. The Complex Dynamics of Matter, Mind, and Mankind*. Springer-Barlag, Nueva York, 1994.
25. MASSIMINI M, FERRARELLI F, HUBER R, ESSER SK, SINGH H, TONONI G: Breakdown of cortical effective connectivity during sleep. *Science*, 309:2228-2232, 2005.
26. REYNOLDS CW: Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model. *Computer Graphics*, 21:28-34, 1987.
27. SCOTT A: *Stairway to the Mind*. Springer-Verlag, Nueva York, 1995.
28. SHALLICE T: *From Neuropsychology to Mental Structure*. Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
29. STAM CJ: Nonlinear dynamical analysis of EEG and MEG: review of an emerging field. *Clinical Neurophysiology*, 116:2266-2301, 2005.
30. TONONI G, EDELMAN GM: Consciousness and complexity. *Science*, 282:1846-1851, 1998.
31. VELMANS M: Is human information processing conscious? *Behavioral Brain Sciences*, 14:651-726, 1991.
32. WARD LM: Synchronous neural oscillations and cognitive processes. *Trends Cognitive Science*, 7:553-559, 2003.
33. ZEKI S: *A Vision of the Brain*. Blackwell Scientific Publications, Londres, 1993.