

Contribución Original

Luis Antonio Pando-Orellana,^{1,2}
 María de Lourdes Cabrera Muñoz,³ Sofía Díaz de Cintra,⁴
 Pedro Valencia Mayoral,³ Erwin Chiquete⁵

Modelo matemático de la relación funcional neuronal, basado en la microestructura

Mathematical model of neuronal functional relationship, based on microstructure

¹Departamento de Cardiopediatria. Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez, Ciudad de México, D.F.; México.

²Centro para la Atención de Lesiones Cerebrales (CPALC). Ciudad de México; México.

³Departamento de Patología. Hospital Infantil de México Federico Gómez, Ciudad de México; México.

⁴Laboratorio de Fisiología. Instituto de Investigaciones Biomédicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México; México.

⁵Departamento de Neurología y Psiquiatría. Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, Ciudad de México; México.

Resumen

Introducción: Desde los estudios de Ramón y Cajal, hasta las técnicas más modernas para el estudio de la microestructura neuronal, se evidencia que la organización de la citoarquitectura neuronal corresponde a un orden espacio-tiempo potencialmente predecible.

Objetivo: Determinar si existe correlación entre la disposición anatómica de las neuronas de la corteza visual primaria del cerebro humano con la distribución vectorial prevista en un modelo físico-matemático descrito con anterioridad.

Métodos: De 10 estudios post mortem de pacientes pediátricos que fallecieron de enfermedades que no distorsionaran la arquitectura normal del encéfalo, se tomó un fragmento de la corteza occipital a nivel de la cisura calcarina derecha y otro de iguales dimensiones de la izquierda. Las preparaciones se observaron en un microscopio con óptica planar apocromática. En las células se efectuaron mediciones del tamaño del soma, longitud de la dendrita apical, densidad de las ramas basales, densidad de las espinas en tres segmentos de 50 μm en la dendrita apical y basal, longitud de la espina y diámetro de su cabeza, y el diámetro de las dendritas apical y basal. Estas mediciones permitieron calcular el número real de espinas en cada segmento de 50 μm .

Resultados: El tamaño del soma, la longitud de la dendrita apical y la densidad de las dendritas basales aumentan entre los 7 días a los 14 años de edad ($p<0.01$). La densidad de las espinas (sp) en la dendrita apical presenta cambios significativos en su patrón de distribución a lo largo de la dendrita apical, con mayor densidad en los segmentos medial (1.14 sp/ μm) y terminal (1.13 sp/ μm). La densidad de las espinas en los 3 segmentos basales estudiados presentaron aumentos

significativos en los niños de 7 días en un promedio de 1.5 sp/ μm , en relación a los 15 meses (0.63 sp/ μm) y a los 14 años (0.58 sp/ μm). La comparación entre la densidad de espinas medida en 150 sp/ μm de la dendrita apical comparada, con la basal, mostró reducciones significativas del 59% a los 14 años y 31% a los 15 meses. Sin embargo, a los 7 días se encontró aumento significativo del 29% en promedio. Con esta información se propone un modelo matemático que explica la correlación entre la morfoestructura de la corteza visual primaria y su función, como un paradigma de estudio de las llamadas funciones corticales superiores.

Conclusiones: Ya que las conexiones neuronales de la corteza cerebral de los humanos se distribuyen morfológicamente en forma convergente/divergente, entonces la integración cortical puede ser analizada mediante el estudio de campos vectoriales neuronales.

Palabras clave

Citoarquitectura, espacio, funciones corticales superiores, modelo matemático, neuronas, tiempo, vectores.

Abstract

Introduction. From studies of Ramón y Cajal to the most modern techniques for the study of the neuronal microstructure, it is evidenced that the organization of the neuronal cytoarchitecture corresponds to a potentially predictable space-time order.

Objective: To determine if there is a correlation between the anatomical arrangements of neurons in the human primary visual cortex with the vector distribution inferred in a mathematical model described previously.

Methods: From 10 postmortem studies of pediatric patients who died from diseases that would not distort the normal architecture of the brain, equal fragments were taken from the right and left occipital cortex at the level of the calcarine fissure. The preparations were observed in an optical planar apochromatic microscope. Measurements were carried-out on the soma size, length of the apical dendrite, density of basal branches, density of dendritic spines in three segments of 50 μm in the apical basal dendrites, length of the dendrite spine and head diameter, and diameter of apical and basal dendrites. These

measures allowed to calculate the actual number of spines on each segment of 50 μm .

Results: The size of the soma, length of the apical dendrite and density of basal dendrites increase between 7 days to 14 years of age ($p<0.01$). The density of spines (sp) in the apical dendrite presents significant changes in their pattern of distribution along the apical dendrite, with greater density in medial (1.14 sp/ μm) and terminal (1.13 sp/ μm) segments. The spines density in the 3 basal segments studied presented significant increases in children aged 7 days in an average of 1.5 sp/ μm , in relation to 15-months old (0.63 sp/ μm) and to 14-years old (0.58 sp/ μm). The comparison between thorns density measured at 150 sp/ μm of the apical dendrite compared with baseline showed significant reductions of 59% at age 14 years and 31% at age 15 months. However, at an age of 7 days it is found a significant increase of a mean 29%. With this information a mathematical model is proposed that explains the correlation between the morfoestructura of the primary visual cortex with its function, as a paradigm of study of the so-called higher cortical functions.

Conclusion. Since the neural connections in the cerebral cortex of humans are morphologically distributed in a convergent/divergent manner, then cortical integration can be analyzed by the study of neuronal vector fields.

Keywords

Cytoarchitecture, higher cortical functions, mathematical model, neurons, space, time, vectors.

Correspondencia:

Dr. Luis A. Pando.

Departamento de Cardiología Pediátrica. Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez, INCICH, Juan Badiano No. 1 Col. Secc. XVI, 14080, México, D.F.
E-mail: drpando@hotmail.com

Introducción

El estudio de las funciones cerebrales superiores (FCS) ha ocupado la atención de numerosos investigadores; sin embargo, hasta la fecha constituye una de las grandes preguntas a esclarecer en el campo actual de la neurociencia.¹⁻¹¹ Dentro de las FCS, o funciones corticales superiores, se encuentra el pensamiento, la memoria, la inteligencia, la capacidad de abstracción, la integración neuroperceptiva, y el afecto, entre otros.¹² El estudio de cada una de estas funciones es sumamente complicado y para cada una de ellas se han desarrollado diversos modelos de estudio.^{1,3,13-27} Una de las FCS que ha sido explorada de manera consistente debido a la relativa facilidad de su abordaje y que ha sido la que corresponde a la variedad de fenómenos sensorreceptivos: el área visual, la auditiva, la olfativa, la táctil y la propioceptiva, son estructuras relacionadas a las actividades sensoperceptivas y la forma en que se integran estas vías en la corteza humana plantea enormes dificultades para su entendimiento. De hecho, ésta dificultad para disecar y comprender un fenómeno biológico, ha suscitado la aparición de toda una corriente de investigación dentro de la biología.^{1-6,10,11,27-35} Además dentro de la práctica clínica, el médico se encuentra confusión de conceptos que dificultan la interpretación adecuada a las manifestaciones clínicas que están asociadas al área cortical correspondiente.² Es decir, a diferencia de la relativamente fácil localización de la lesión en casos de síntomas y signos motores, es muy difícil entender por qué un paciente es disléxico, por qué alucina, o por qué tiene pérdida parcial de alguna de las funciones corticales sensoperceptivas.

Un medio para responder a éstas interrogantes ha sido el desarrollo de modelos matemáticos de las FCS. Esto obedece a la estricta necesidad de establecer un enlace entre el mundo de las matemáticas y el de la biología, especialmente con la medicina, en donde a la fecha, se realiza un esfuerzo integrador entre la biología molecular y la forma en que ésta se manifiesta a través de

un fenómeno perceptible.^{2,3,13-17,20-34,36-50} Por otra parte, la corteza visual ha sido objeto de numerosos estudios, particularmente a nivel morfológico y fisiológico en diversos modelos animales, lo que ha dado por resultado un buen conocimiento estructural de esta parte de la corteza y su función,^{1-4,6,7,9,10,14-16,18,19,34} aunque no se ha integrado del todo ambos aspectos en modelos operativos y en el ser humano, aún el aspecto morfológico dista de estar completamente estudiado.

En 1986 se propuso un modelo matemático de investigación sobre la sensopercepción visual.⁵¹ Este modelo utiliza el principio de convergencia/divergencia del flujo de información a través del cerebro;^{10,13,17,18,20-25,27,28,30-33,35,37,41,43-50,52} la proposición de la existencia de factores (proteicos) que específicamente modifican la permeabilidad de la membrana frente a la estructuración de una red de canales asociados que se crean a través de disposiciones geométricas. Esta configuración geométrica daría por resultado la integración tridimensional del estímulo. El tercer principio en el que se apoya este modelo matemático es el papel de la energía iniciado por el estímulo externo y sostenido por una fuente de radiación interna que permite a este flujo energético transferir la información mediante tensores sin menoscabo de su magnitud y su sentido.^{11,17,20,22,23,26,27,32,35-41,43,46,48-50,53,54} Finalmente, el modelo contempla además la posibilidad de que las proyecciones geométricas generadas estén reguladas en el dominio del tiempo.⁵¹

Hasta donde sabemos, los estudios morfológicos de la corteza visual en humanos están incompletos y los modelos matemáticos aplicados para correlacionar a la estructura con la integración de los estímulos en esta área son aún incipientes o no explican la fenomenología física y molecular de forma exhaustiva. El tratar de esclarecer el problema de integración cortical visual eventualmente podría facilitar el entendimiento de otras FCS o bien, el elaborar otros modelos que nos permitan explicar estos fenómenos. El trayecto que sigue una señal inicial a través de una red de interconexiones neuronales puede ser estudiado

mediante la aplicación de campos vectoriales basado en la anatomía real de las redes normales existentes en el humano.⁵⁴

Existen modelos matemáticos que intentan explicar la manera en que la integración de los estímulos se realiza en la corteza cerebral y por otro lado, existen descripciones de la morfología de la corteza. Correlacionar ambos aspectos se ha hecho en animales de experimentación, pero no en humanos, en donde la complejidad de las interconexiones neuronales corticales se multiplica.

El objetivo de este estudio fue el de establecer si existe correlación entre la disposición anatómica de las neuronas de la corteza visual del cerebro humano con la distribución vectorial prevista en un modelo físico-matemático descrito con anterioridad. La hipótesis fue que, si morfológicamente se distribuyen las conexiones neuronales de la corteza cerebral de los humanos en forma convergente/divergente, entonces la integración cortical puede ser analizada mediante el estudio de campos vectoriales neuronales.

Métodos

De 10 estudios post mortem, se tomó un fragmento de 0.4 x 0.4 x 0.4 cm de la corteza occipital a nivel de la cisura calcarina derecha y otro de iguales dimensiones de la cisura calcarina izquierda. El primer fragmento se colocó de inmediato en un recipiente que contenía una mezcla de dicromato de potasio y ácido ósmico. El segundo fragmento se fijó en formol al 10% amortiguado con buffer de fosfatos. El primer fragmento se envió al Laboratorio de Fisiología, en el Instituto de Investigaciones Biomédicas de la UNAM, en donde se procesó con la técnica de Golgi. El segundo fragmento se procesó en el Departamento de Patología del Hospital Infantil de México Federico Gómez, en forma rutinaria.

Los tejidos se tomaron de pacientes que murieron sin enfermedades que distorsionaran la arquitectura normal del encéfalo, tales como desnutrición de tercer grado, infecciones del SNC, neoplasias primarias o metastásicas del SNC, encefalopatía hipóxica crónica extensa, hemorragias del SNC o malformaciones congénitas del SNC. La edad de los pacientes estuvo en el rango de 2 a 16 años; se incluyeron pacientes de ambos sexos. El tiempo máximo post mortem permitido para la realización de este estudio fue de 6 h.

Las laminillas se observaron en un microscopio fotónico con óptica planar apocromática (PlanApo) de 40x y 100x inmersión, además de retículas oculares calibradas y un micrómetro ocular (Olympus OSM-4) y se proyectaron en un monitor de televisión. Se tomaron fotografías en blanco y negro en papel de 11 x 7 cm, de los campos observados a 10x en forma secuencial, a diferentes niveles de profundidad del corte (*Figura 1*). Sobre las fotografías se elaboraron diagramas de interconexión dibujando los contornos de las células y axones y contándolos por cuadro y puntos de intersección (*Figura 2*). Además, se proyectó en un monitor y sobre la pantalla de televisión se colocó una hoja transparente cuadriculada, previamente diseñada y librada con cuadros de un micrómetro (μm) de lado, para contar el número de conexiones por área y el número de interconexiones neuronales. En las 36 células se efectuaron las siguientes mediciones: 1) tamaño del soma, 2) longitud de la dendrita apical, 3) densidad de las ramas basales, por el método de anillos concéntricos, 4) densidad de las espinas en tres segmentos de 50 μm en la dendrita apical y en una dendrita basal, 5) longitud de la espina y diámetro de su cabeza en 18 espinas largas en cada segmento apical y basal, y 6) el diámetro de las dendritas apical y basal. Estas

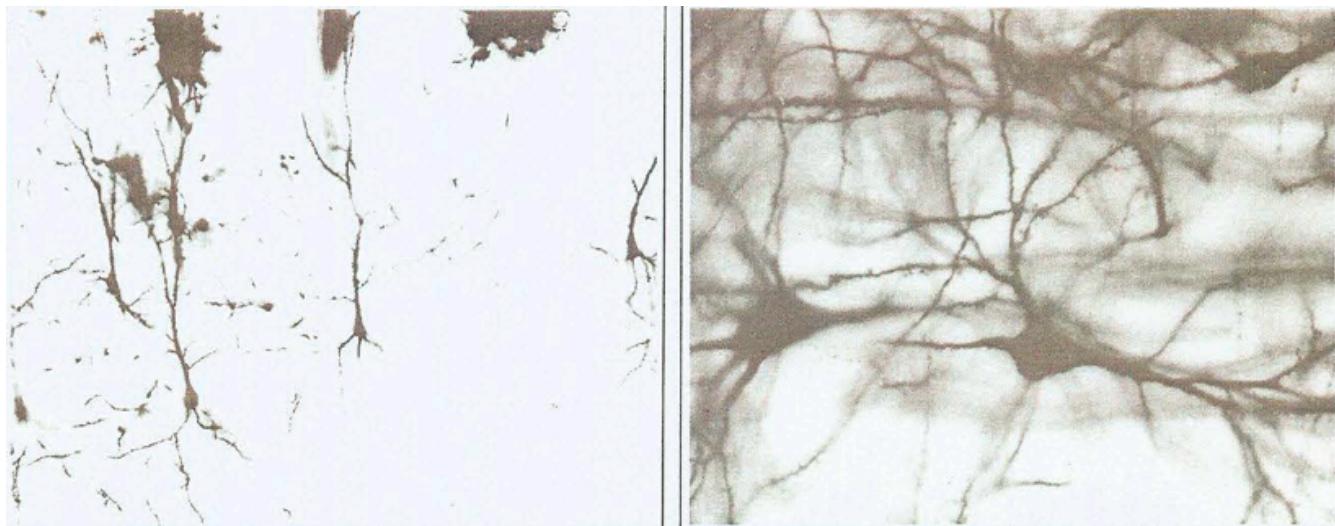


Figura 1. Microfotografías con microscopía optica de células de la corteza visual primaria que fueron estudiadas morfológicamente en el presente estudio.

mediciones permitieron calcular el número real de espinas en cada segmento de 50 μm .

Los resultados se recolectaron en hojas tabulares y se analizaron con el método de chi cuadrada para proporciones esperadas. La distribución de las neuronas que se obtuvo de los dibujos, se agrupó en patrones de semejanza, se marcaron con puntos y se les aplicó, a los patrones obtenidos, un análisis vectorial de distribución.⁵⁵ Los resultados se compararon con los informados en modelos semejantes.

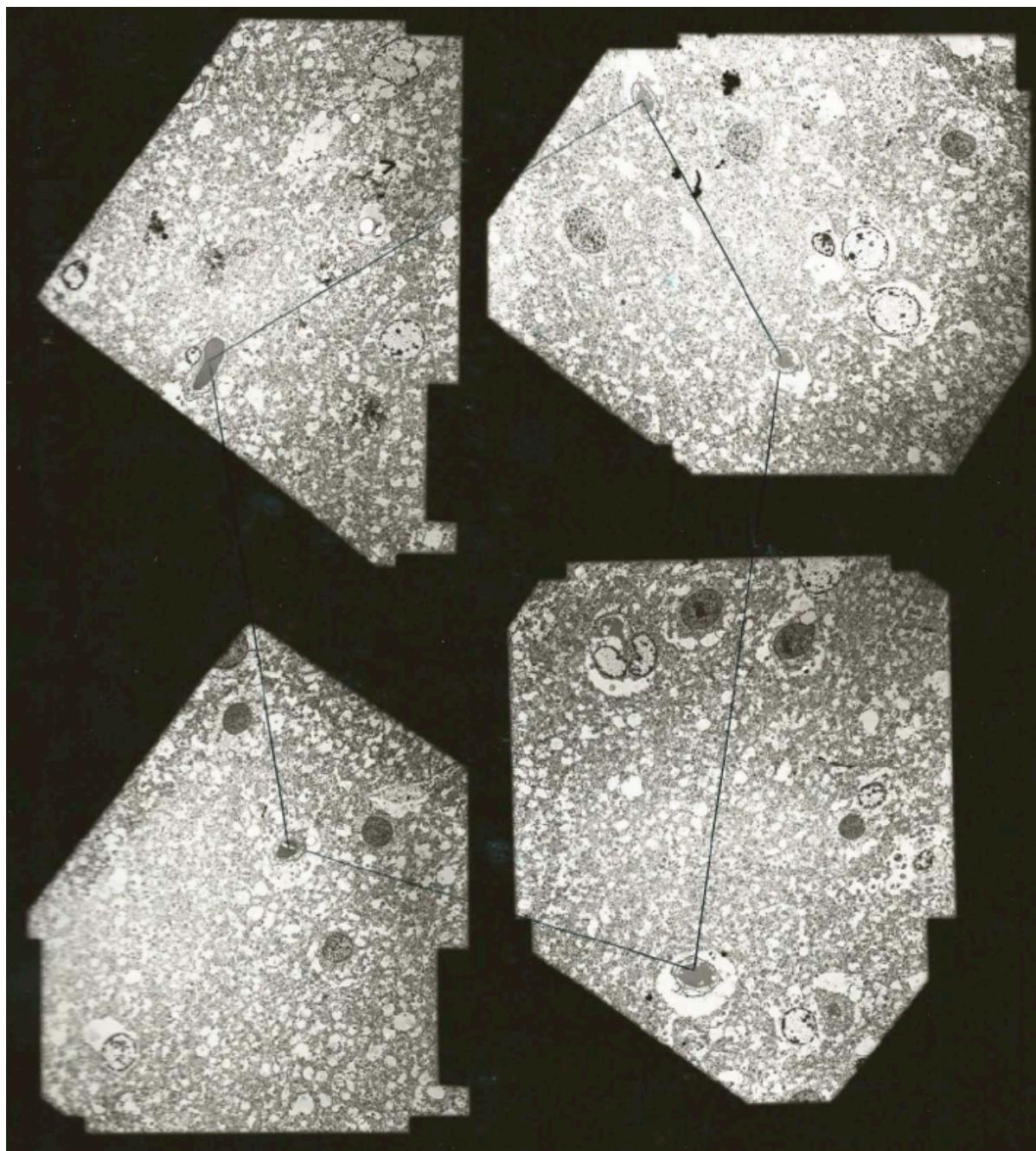


Figura 2. Microfotografías que muestran los trazos sobreimpuestos de la relación geométrica entre los cuerpos celulares.

Resultados

Nuestros resultados revelaron lo siguiente: a) el tamaño del soma, la longitud de la dendrita apical y la densidad de las dendritas basales aumentan entre los 7 días a los 14 años de edad ($p<0.01$), b) la densidad de las espinas (sp) en la dendrita apical presenta cambios significativos en su patrón de distribución a lo largo de la dendrita apical, con mayor densidad en los segmentos medial (1.14 sp/ μm) y terminal (1.13 sp/ μm), c) la densidad de las espinas en los 3 segmentos basales estudiados presentaron aumentos significativos en los niños de 7 días en un promedio de 1.5 sp/ μm , en relación a los 15 meses (0.63 sp/ μm) y a los 14 años (0.58 sp/ μm), d) la comparación entre la densidad de espinas medida en 150 sp/ μm de la dendrita apical comparada, con la basal, mostró reducciones significativas del 59% a los 14 años y 31% a los 15 meses. Sin embargo, a los 7 días se encontró aumento significativo del 29% en promedio.

Estos resultados sugieren que las células piramidales de la capa III cortical presentan distinta densidad de espinas debido al patrón de desarrollo diferencial de las aferencias sinápticas, así como de la respuesta postsináptica a los distintos neuromoduladores corticales como el GABA, el VIP y la somatostatina, identificados experimentalmente en mayor proporción en esta capa cortical.

Discusión

El presente estudio sugiere que ya que las conexiones neuronales de la corteza cerebral de los humanos se distribuyen morfológicamente en forma convergente/divergente, entonces la integración cortical puede ser analizada mediante el estudio de campos vectoriales neuronales.

El estudio de las funciones cerebrales superiores (memoria, integración visual, inteligencia, afecto, etc.) es sumamente complejo. La forma en que estas funciones se integran en el sistema nervioso constituye un problema de difícil solución.

Se han descrito varios métodos para abordar algunos de estos problemas. Entre ellos se ha escogido la corteza visual y el estudio de la integración a este nivel por muchos grupos de trabajo; esta área se ha elegido por el acceso relativamente fácil desde el punto de vista funcional y porque estructuralmente las neuronas en esta zona se distribuyen en forma ordenada y constante, lo que ha generado un gran volumen de información sobre esta región. Se ha intentado establecer la integración de esta área con modelos matemáticos en animales de experimentación; por otra parte, la microanatomía de la zona se conoce bien en diferentes especies animales y en el mundo humano desde los estudios de Cajal. Todos estos trabajos se han hecho en animales e individuos que han sido expuestos por períodos variables a estímulos visuales continuos.

En niños la microanatomía no está bien descrita. Hasta donde sabemos, no hay ningún estudio que correlacione las teorías matemáticas de integración con la microanatomía de la corteza humana.

El objetivo de este estudio fue únicamente describir la disposición de las neuronas de la corteza visual de los niños con sistema nervioso central mielinizado, ya estimulado (que ya ha visto), sin enfermedades asociadas y analizar (no extrapolar) si la disposición neuronal sigue un orden determinado; una vez establecido el acomodo neuronal en esta

zona de la corteza se intentó correlacionar esta distribución anatómica con un modelo de integración matemático ya enunciado, que predice una disposición neuronal en forma convergente/divergente (*Figuras 3 y 4*).

Sobre el modelo matemático

Contemplamos un continuum tetradimensional cuyos puntos (I, II, III, etc.) los agrupamos en $X_1, X_2, X_3, X_4 - X_k$. Representa la integración visual o de cualquier otra función cortical en forma tetradimensional (3 dimensiones + tiempo). En donde X_k representa funciones continuas

y diferenciables (continuas por una constante y diferenciables porque cada punto está representado por entidades matemáticas, números o grupos de números que tienen un significado en el proceso de unir elementos). Consecuentemente si hemos de salvaguardar la individualidad de cada punto en dicha transformación, alguna propiedad debe permanecer intransformable. Tal propiedad debe ser a su vez expresada en un número. La propiedad mencionada es invariante o escalar; sin embargo hablamos en este caso de un campo con principio de invarianza en transformación continua, es decir $\phi(X_k)$. En cualquier arreglo o

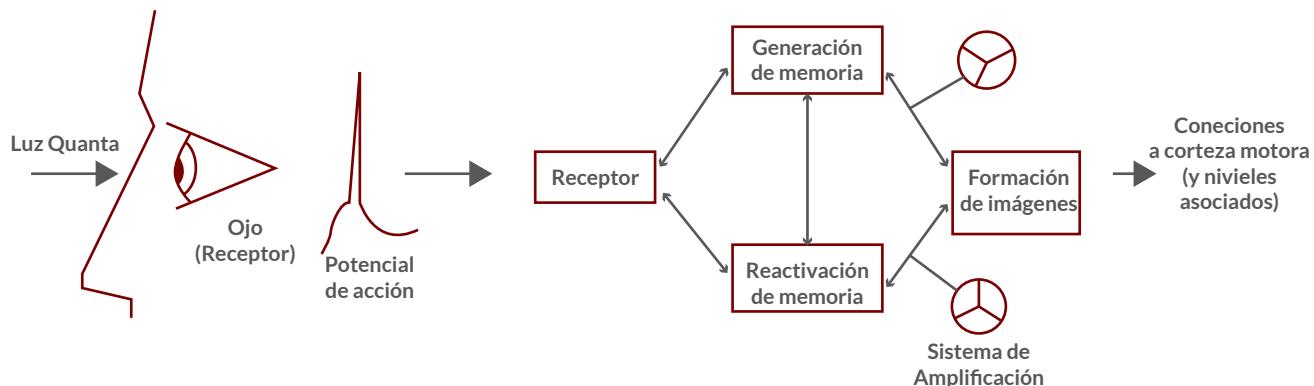


Figura 3. Diagrama que muestra la transformación de un estímulo fótico y su amplificación en el encéfalo, generando la formación de una imagen y un recuerdo asociado.

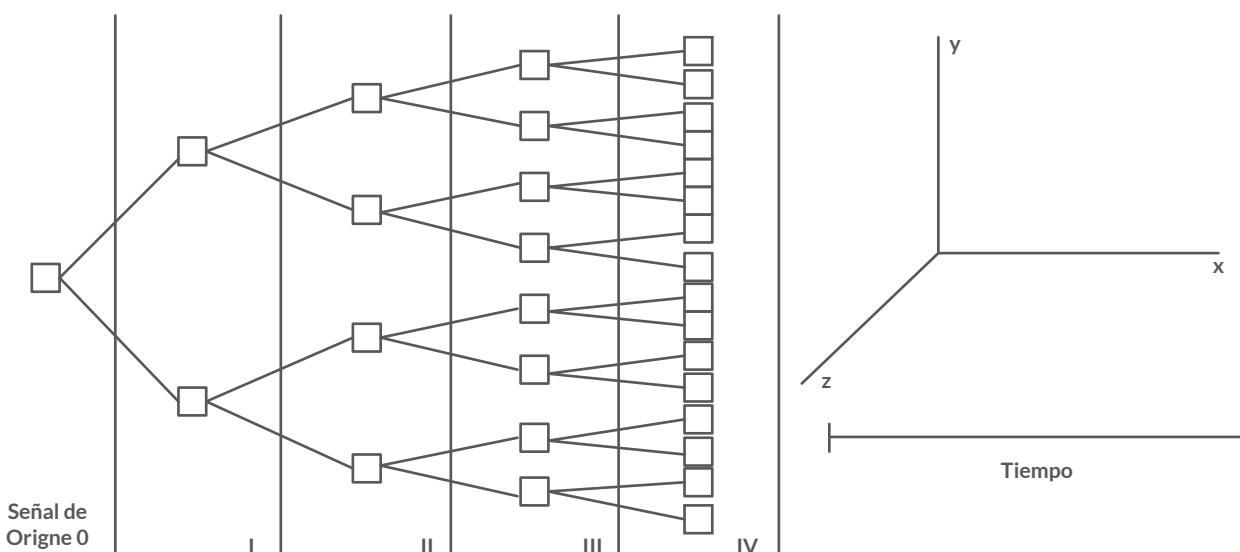


Figura 4. Diagrama que muestra el fenómeno de amplificación de la información mediante el principio convergencia/divergencia en el dominio del tiempo.

sistema o encuadre nos da el incremento de ϕ (al proceder hacia algún punto vecino). La entidad descrita por estas derivadas parciales es llamada gradiente de ϕ y está dada por un agrupamiento de números *1 y se define como un campo vectorial covariante. La naturaleza de la entidad es que existe una cuarteta de números asignados a cada punto, variando de uno a otro. Esto implica la existencia de una especie de contra-parté definida como vector contravariante representado por B_k que va transformándose en un sentido contrario en la misma forma que δ_{kk} ; de tal manera que en un mismo punto se dan varios vectores en parte covariantes y en parte contravariantes para las 4 cantidades o dimensiones, lo que constituye un tensor.

Los tensores pueden ser sumados o sustraídos o linealmente combinados con coeficientes escalares si se refieren al mismo punto continuum (*). Pueden existir tensores cuyos componentes desaparezcan (tensor cero). En geometría elemental, una transformación lineal de las coordenadas es llamada transformación afín o geometría afín: cuando no estamos hablando de tensores, la asociación de vectores puede subsistir como transformación coordinada, a esto se le denomina desplazamiento paralelo o vectores transferidos en paralelo, representado por τ y pueden establecer un mapeo de vectores del mismo género en puntos vecinos. Un mapeo lineal entre un punto con 4 funciones y las áreas vecinas requiere de 64 coeficientes. (nota: son $\infty 6$ puntos vecinos). Podemos establecer el desplazamiento en paralelo de cualquier densidad de tensor utilizando los siguientes principios o guías:

- Que el desplazamiento se realice con todos sus factores.
- Que la invariante no ha de cambiar con el desplazamiento.
- Que la densidad vectorial no ha de modificarse con el desplazamiento.

Recordad que estamos hablando de tensores de campo.

La cuestión de la integrabilidad

Es una forma de expresar el hecho de que el resultado de transferir X_k de P a Q dependerá del camino. Si la transferencia es independiente del camino decimos que la conexión afín es integrable o no integrable dentro de cierta región. (*2) Si es integrable depende de la desaparición o extinción de cierto tensor denominado tensor de curvatura (o de Riemann-Christoffer). Por supuesto existe la situación contraria en la que se da el caso no integrable. Consideramos entonces que tenemos: Seis campos vectoriales de carga electromagnética con cuatro dimensiones cada uno a los que se tiene que calcular el valor de τ (sin determinantes de extinción). La integrabilidad es una importante restricción de la afinidad. En cada paso intervienen las leyes de conservación de la energía (termodinámica). De esta manera se obtiene un trayecto poligonal en el límite de las verdaderas infinitesimales que también puede ser seguido a la inversa (es decir, dx_k). Si transferimos un vector contravariante indicando la dirección de la curva en cualesquiera de sus puntos P hacia un punto Q , obtendremos un vector que indique la dirección de la curva en Q .

Nuestra construcción aporta un estándar de comparación en las longitudes de cualesquiera de las secciones de esta curva; es decir, el número de pasos involucrados en esta curva. Tal curva se constituye desde $\infty 6$ puntos (cada lado del "cubo" neuronal) para $\infty 3$ dimensiones + tiempo. Estas curvas se denominan geodésicas. Dichas curvas $\infty 3$ partiendo de un punto, cubren un área finita vecina solo una vez y existirá sólo una curva conectando los puntos dados P y Q .

Cualquier curva puede ser representada dadas sus 4 coordenadas como funciones de un parámetro continuo representado por la letra λ . (en muchos casos podemos escoger una función monotónica de λ y esto se expresa: $dx_k/d\lambda$. Los valores de los vectores deben ser proporcionales en áreas vecinas y la ecuación debe claramente enunciar que dx_k/ds , (significa las derivadas con respecto a λ , ds es la medida de la longitud de una sección infinitesimal) es paralelamente transferido a lo largo de la geodésica.

La materia necesariamente debe respetar las 4 leyes de la conservación de la energía y por otro lado, hacer de nuestras ecuaciones de campo, ecuaciones compatibles (diferentes de $2x + 2y = 5$). Ambas situaciones serán respetadas si ubicamos nuestras ecuaciones en un contexto de variación.

El texto anterior explica el proceso de amplificación y de la transferencia de información de acuerdo con la *Figura 4*. Es importante señalar las virtudes que el modelo ofrece:

1. La explicación del principio de convergencia/divergencia.
2. El planteamiento de la importancia de umbrales modificados en la interacción neurotransmisores-neurorreguladores-receptores-síntesis protéica (plasticidad) —modificación de umbral; específica para cada estímulo visual (o de cualquier otra índole): generando memoria para la reproducción de la información.
3. La reproducción y amplificación de la para la estructuración de geodésicas y posteriormente de imágenes holográficas en la corteza cerebral de acuerdo con el punto anterior (Figura 5).
4. La aplicabilidad para un modelo de integración visual o de cualquier otra índole, por ejemplo, modelo de integración emocional.

Conclusión

Ya que las conexiones neuronales de la corteza cerebral de los humanos se distribuyen morfológicamente en forma convergente/divergente, entonces la integración cortical puede ser analizada mediante el estudio de campos vectoriales neuronales. Las implicaciones a nivel de los problemas de aprendizaje y la medicina conductual son evidentes desde el momento en que pueden empezar a establecerse correlaciones, estructura, función, manifestaciones clínicas (fisiopatología) que re-planteé una psiconeurofarmacología más racional en términos de selectividad de subpoblaciones neuronales, al tiempo que las terapias psicológicas y educativas (incluyendo lenguaje) se individualicen en función de la fisiopatología específica del caso: optimizando el equipo del individuo y su contexto psico-social.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que en este estudio no existen conflictos de interés relevantes.

Fuentes de financiamiento

Este estudio fue financiado esencialmente con presupuesto provisto por el Centro para la Atención de Lesiones Cerebrales (CPALC, S.C.). Ciudad de México; México.

El Dr. Pando es director del CPALC. El Dr. Chiquete declara haber recibido compensaciones por consultorías de las compañías Sanofi-Aventis, Ferrer Grupo, Genzyme y Novartis Farmacéutica. Todos los autores declaran, sin embargo, que no existe conflicto de interés directo sobre el tópico tratado en este estudio, para ninguno de los autores.

Referencias

1. Desimone R. The role of attention in modulating visual processing in extrastriate cortex of the macaque, En: E. Martínez-Uriegas (Ed.), The Cuernavaca workshop on vision. UNAM, Cuernavaca, 1987. pp. 35-36
2. Gilbert CH. Mechanisms of processing in primary visual cortex. En: E. Martínez-Uriegas (Ed.), The Cuernavaca workshop on vision. UNAM, Cuernavaca, 1987. pp. 3-4.
3. Klein S. Sillabus for Cuernavaca Workshop on vision. En: E. Martínez-Uriegas (Ed.), The Cuernavaca workshop on vision. UNAM, Cuernavaca, 1987. pp. 23-24
4. Livingstone M. Segregation of form, color, movement and depth processing: Anatomy, physiology, psychophysics, art and illusion. En: E. Cuernavaca, 1987. pp. 11-13.
5. Matsubara JA, Cynader MS, Swindale NV. Anatomical properties and physiological correlates of the intrinsic connections in cat area 18. *The Journal of Neuroscience*. 1987; 7: 1428-1446.
6. Peters A, Kara DA. The neuronal composition of area 17 of rat visual cortex. II. The nonpyramidal cells. *The Journal of Comparative Neurology* 1985; 234: 242-263.
7. Peters A, Kara DA. The neuronal composition of area 17 of rat visual cortex. IV. The organization of pyramidal cells. *The Journal of Comparative Neurology* 1987; 260: 573-590.
8. Peters A, Walsh M. Study of the organization of apical dendrites in the "somatic" sensory cortex of the rat. *Com Neur* 144: 253-368.
9. Phillipson OT, Kippatrick IC, Jones MW. Dopaminergic innervation of the primary visual cortex in the rat and some correlations with human cortex. *Brain Research Bulletin* 1987; 18: 621-633.
10. Schiller PH. The on and off channels of the visual system. En: E. Martínez-Uriegas (Ed.), The Cuernavaca workshop on vision. UNAM, Cuernavaca, 1987. pp. 26.
11. Wilson JCH. Passive cable properties of dendritic spines and spiny neurons. *The Journal of Neuroscience* 1984; 4: 281-297.
12. Freedman AM, Kaplan HI: Modern Synopsis of Psychiatry. Williams & Wilkins, Baltimore, 1984.
13. Babloyantz A. Self-organization phenomena resulting from cell-cell contact. *J Theor Biol* 1977; 68: 551-561.
14. Bergen JR. Early extraction of motion and texture information in human and machine vision. En: E. Martínez-Uriegas (Ed.), The Cuernavaca workshop on vision. UNAM, Cuernavaca, 1987. pp. 38-39.
15. Colonnier M. The tangential organization of the visual cortex. *J Anat Lond* 1964; 98: 327-344.
16. Feldman RJ, Bryan SD. Steps toward a system for processing biological images. En: (Ed.), Processing biological images. pp. 409-426.
17. Fischer H. Photons as transmitter for intra-and intercellular biological and biochemical communication. The construction of a Hypothesis. En: F. A. Popp, G. Becker, H. Konig y W. Peschka (Eds.), Electromagnetic bio-information. Urgan & Schwarzenberg, Munich, Viena, Baltimo, 1979. pp. 175-180.
18. Marroquin JL. A probabilistic approach to computational visión. En: E. Martínez-Uriegas (Ed.), The Cuernavaca workshop on vision. UNAM, Cuernavaca, 1987. pp. 25.
19. Pentland AP. Recovering 3-D description of snape using massively parallel networks. En: E. Martínez-Uriegas (Ed.), The Cuernavaca workshop on vision. UNAM, Cuernavaca, 1987. pp. 10.
20. Popp FA. Einige moolichkeiten fur biosingnale fur mteuerung des zellwachstums. *Arch Geschwulstforschung* 1974; 44: 295.
21. Popp FA, Ruth B. Untersucnungen zur ultraschwaschen lumineszenz aus biologischen systemen unter berucksichtung del bedeutung fur die arzneimittelforschun. *Arzeimittel Forsch* 1977; 27: 933.
22. Popp FA, Schaumloffel P, Bohm K, Herrmann J, Kramer J. Biosignale zur steuerung des zellstoffwechsels. Eine Resonanzhypothese der karzinogenese. *Munch med Wschr* 1974; 116: 381-384.
23. Presman AS. Electromagnetic fields and life. Plenum Press, Lonon, New York, 1970.
24. Rajewski B. Zur Frage des physikalischen nacnweises del gurwitsch strahlung (sogenannte mitogenetische strahlung). En: F. Dessauer (Ed.) *Zehn jahre forschung auf dem medizinisch physikalischen grenzgeblet*. Thieme Varlag, Stuttgart, 1931.
25. Ruth B, Popp FA. Experimentelle untersuchungen zur ultraschwachen photonemission biologscher systeme. *Z Naturforsch* 1976; 31c: 741.

26. Streitwieser, A. Molecular orbital theory for organic chemist, John Wiley & Sons. New York. 1961.
27. Sung SS. A possible biophotochemical mechanism for cell communication. En Popp FA, Becker G, Koning HL, Peschka W (Eds.), Electromagnetic bio-information. Urban & Schwarzenberg, Munich, Viena, Baltimo 1979. pp. 151-174.
28. Bedi KS, Tomas YM, Davies CA, Dobbing J. Synapse to neuron ratios of the frontal and cerebellar cortex of 30 day old and adult rats undernourished during early postnatal life. The Journal of Comparative Neurology 1980; 193: 49-56.
29. Braak E, Heiko B. On three types of large nerve cells in the granular layer of the human cerebellar cortex. Anat Embryol 1983; 166: 67-86.
30. Gabbott PLA, Samogyi P. Quantitative distribution of GABA-inmunoreactive neurons in the visual cortex (area 17) of the cat. Exp. Brain Res 1986; 61: 323-331.
31. Gersch M. Informationsübermittlung mit hilfe neurosekretorischer peptide als ediatoren, Naturwissenschaften 1977; 64: 417-426.
32. Hildebrand JG, Kravitz EA. Transmitter biochemistry of single, identified neurons. En: L. i.p.m.a.n. symposium (Ed.), Energy, regulation and biosynthesis in molecular biology. Verlag de Gruyter & Co. Berlin, 1974. pp. 293-307.
33. Kumaki K, Hara SI, Mizuno S, Tomioka S. Relation between the hydroxylated position of aromatic compounds by monooxygenases and various electronic reactivity indexas Chem Pharm Bull 1969; 17: 1571.
34. Kiloh LE. Clinical Electroenceph. Third edith. Butler worths. GB. 1987.
35. White JD, Perkins DS, Taylor SI. Biosynthesis of Ergosta 4, 6, 8 (14), 22-tetraen-3 one, a novel oxygenative pathway. Bioorg Chem 1973; 2: 163.
36. Schrodinger E. Space-time structure, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
37. Freedman AM, Kaplan H. Modern Synopsis of Psych. Williams & Wilkin Baltimore 1980.
38. Matthew Kabrisky. A proposed model for visual information processing in the human brain. University of Illinois Press, Urbana and Lonon, 1986.
39. Mallory FB: Pathological Technique. Special Organs. WB. Saunders Co. Philadelphia, 1938, p 219.