



Segmentación y análisis granulométrico de sustancia blanca y gris en IRM para el estudio del estrabismo usando transformaciones morfológicas

Jorge D. Mendiola
Santibañez,*
Martín Gallegos Duarte,**
Juan José Ortiz Retana,***
Carlos Enrique López
Campos****

- * Postgrado de la Facultad de Ingeniería, UAQ.
- ** Instituto Queretano para la atención de las enfermedades congénitas IAP.
- *** Instituto de Neurobiología, Universidad Nacional Autónoma de México Campus Juriquilla.
- **** Universidad del Valle de México, Campus Querétaro.

Correspondencia:
Jorge D. Mendiola Santibañez
Centro Universitario, Cerro de las
Campanas 76010, Querétaro, México.
Tel: +(442)1921200, ext. 6023.
E-mail: mendijor@uaq.mx

Artículo recibido: 28/febrero de 2007
Artículo aceptado: 30/octubre de 2007

RESUMEN

En este artículo se presenta un método basado en la aplicación de operadores morfológicos para llevar a cabo la segmentación de cráneo en cortes de imágenes de resonancia magnética del cerebro (IRM). Los cortes procesados pertenecen a dos sujetos control (sanos) (SC) y uno con estrabismo disociado (SE) (los tres con 7 años de edad). Una vez separado el cráneo, se obtuvieron curvas granulométricas de sustancia blanca (SB) y gris (SG) ubicadas en el lóbulo occipital. Respecto a los SC, se presenta un patrón granulométrico tanto para la SB como para la SG. Dichos patrones se utilizan para ser comparados con las curvas granulométricas obtenidas a partir del SE y así poder establecer diferencias volumétricas entre las diferentes estructuras detectadas. Por otra parte, para obtener las curvas granulométricas se aplicaron ecuaciones que dan resultados similares a los de una ecuación de densidad granulométrica; mientras que la separación del cráneo se hace por medio de una transformación morfológica que evita la generación de nuevas estructuras durante el procesamiento.

Palabras clave:

Segmentación, granulometría, apertura por reconstrucción, estrabismo, sustancia blanca, sustancia gris.

ABSTRACT

In this paper we present a method based on the application of morphological operators to carry out the segmentation on slices of brain magnetic resonance images (MRI). The processed slices belong to two control subjects (healthy) (CS) and one with dissociated strabismus (SS) (the three with 7 years old). Once separated the skull, we obtaining granulometric plots of white matter (WM) and grey matter (GM) located in occipital lobe. Respect to the CS, we present a granulometric pattern for the WM as well as for the GM. Such patterns are used to be compared to the granulometric plots obtained from SS and thus being able to establish volumetric differences between the different detected structures.

On the other side, in order to get the granulometric plots, equations than provide similar results to a equations of granulometric density were applied; whereas the separation of the skull is doing by a mor-

phological transformation that avoid the generation of new structures during the processing.

Key Words:

Segmentation, Granulometry, Opening by reconstruction, Strabismus, white matter, Grey matter.

INTRODUCCIÓN

La morfología matemática es una técnica ampliamente utilizada para el procesamiento de imágenes. Dicha técnica inició con un problema real aplicado al estudio de medios porosos en ciencia de los materiales¹. Actualmente, una de muchas aplicaciones prácticas de la morfología matemática es el procesamiento de imágenes médicas. En este artículo se muestra una metodología de segmentación utilizando operadores morfológicos para el tratamiento de imágenes cerebrales obtenidas por resonancia magnética[§]. En particular, se realiza la segmentación de regiones correspondientes al lóbulo occipital, esto para llevar a cabo una comparación entre patrones granulométricos de sustancia blanca y sustancia gris de dos sujetos control (sanos), con la información granulométrica de SB y SG obtenida de un paciente con estrabismo disociado. La finalidad es poder establecer diferencias entre los SC y el SE respecto a un análisis granulométrico. La edad de los tres sujetos es de 7 años.

Por otra parte, en el proceso de segmentación del cráneo (deskulling en inglés), se involucra una transformación morfológica conocida como apertura por reconstrucción^{2,3}.

Esta transformación, tiene la característica de no generar nuevas estructuras, lo que sí es común en otras transformaciones utilizadas en el procesamiento de imágenes (la generación de nuevas estructuras trae como consecuencia la degradación de la imagen de salida durante el procesamiento).

Una vez que el cráneo se separa de las imágenes, se obtienen las curvas que dan información sobre la densidad de las estructuras claras u oscuras detectadas en el lóbulo occipital tanto en SC

como en el SE. Este análisis es similar a un análisis de densidad granulométrico^{4,5}.

RESPALDO TEÓRICO SOBRE ALGUNAS TRANSFORMACIONES MORFOLÓGICAS Y ESTRABISMO

A continuación se presenta un breve respaldo teórico sobre las transformaciones morfológicas empleadas para el tratamiento de las IRM, así como una descripción del problema desde el punto de vista estrabismo.

DEFINICIONES DE ALGUNAS TRANSFORMACIONES MORFOLÓGICAS

Las transformaciones de base en la morfología matemática^{1,6,7}, para el caso numérico (funciones en niveles de gris), son el dilatado $\delta_{\mu B}(f)(x)$ y erosionado $\varepsilon_{\mu B}(f)(x)$ morfológicos. En este caso, B representa un elemento estructural cuadrado básico (de 3×3 píxeles), el cual contiene su origen en el centro; mientras que \bar{B} es su conjunto transpuesto $\bar{B} = \{-x : x \in B\}$, μ es un parámetro de tamaño, f es la imagen de entrada definida en Z^2 (Z representa al conjunto de los enteros) y x es un punto en el dominio de definición Z^2 .

De esta manera, se dice que un elemento estructural μB de talla $\mu = 1$, consiste de un cuadrado de 3×3 píxeles; por lo que se analizan 9 vecinos. Mientras que un elemento estructural de tamaño n , consiste de un cuadrado de $(2\mu + 1)(2\mu + 1)$ píxeles. Por ejemplo, un elemento estructural talla 5 (i.e $\mu = 5$), será un cuadrado de 11×11 píxeles; en el cual se analizan 121 vecinos.

Formalmente, la erosión $\varepsilon_{\mu B}(f)(x)$ y la dilatación $\delta_{\mu B}(f)(x)$ morfológicas se expresan como:

$$\varepsilon_{\mu B}(f)(x) = \wedge \{f(y) : y \in \mu \bar{B}_x\} \vee$$

$$\delta_{\mu B}(f)(x) = \vee \{f(y) : y \in \mu \bar{B}_x\} \wedge$$

§ Las imágenes por resonancia magnética de los sujetos en estudio se obtuvieron en un equipo Philips Intera de 1.5 T (Philips Medical Systems Best Netherlands), utilizando una secuencia fast feel echo (FFE), con tiempo de echo TE = 6.9 ms, tiempo de repetición TR = 25 ms, ángulo de desviación FA = 30 grados, número de excitaciones NSA = 1, campo de visión FOV = 230 mm y número de cortes = 120.

Donde \wedge es el operador ínfimo, el cual permite hallar el valor mínimo de los pixeles contenidos dentro del elemento estructural μB_x centrado en el punto x . Mientras que el operador supremo \vee permite hallar el valor máximo de los pixeles contenidos dentro del elemento estructural μB_x centrado en el punto x .

El erosionado y el dilatado morfológicos se utilizan para construir otro tipo de transformaciones; entre ellas se encuentran la apertura $\gamma_{\mu B}(f)(x)$ y la cerradura $\phi_{\mu B}(f)(x)$ morfológicas, las cuales se definen a continuación:

$$\begin{aligned} \gamma_{\mu B}(f)(x) &= \delta_{\mu B}(\varepsilon_{\mu B}(f))(x) \\ \phi_{\mu B}(f)(x) &= \varepsilon_{\mu B}(\delta_{\mu B}(f))(x) \end{aligned} \tag{1}$$

Una interpretación geométrica de estas transformaciones, es que ambas permiten eliminar aquellas componentes que no puedan contener al elemento estructural. La apertura lo hace al interior de la función, mientras que la cerradura en el complemento de la función.

En la Figura 1 se ilustra la aplicación del erosionado, dilatado, apertura y cerradura morfológicas utilizando un elemento estructural talla 5.

Apertura y cerradura por reconstrucción

La noción de las transformaciones por reconstrucción es un concepto útil dado por la morfología matemática. Estas transformaciones permiten la eliminación de algunas regiones indeseadas sin afectar considerablemente a las estructuras restantes. Esta característica se debe a que se construyen por medio de las transformaciones geodésicas⁵.

Las transformaciones geodésicas básicas, la erosión y la dilatación geodésicas de tamaño 1 son iteradas hasta alcanzar la estabilidad. La dilatación geodésica $\delta_f^1(g)$ y la erosión geodésica $\varepsilon_f^1(g)$ de tamaño uno están dadas por $\delta_f^1(g) = f \wedge \delta(g)$

con $g \leq f$, y $\varepsilon_f^1(g) = f \vee \varepsilon(g)$ con $g \geq f$ respectivamente. Cuando la función g es igual a la erosión o dilatación morfológicas de la función original, se obtiene la apertura $\tilde{\gamma}_{\mu B}(f)(x)$ o la cerradura $\tilde{\phi}_{\mu B}(f)(x)$ por reconstrucción respectivamente. Sus expresiones se dan a continuación.

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_{\mu B}(f)(x) &= \underbrace{\delta_f^1 \delta_f^1 \dots \delta_f^1 (\varepsilon_{\mu B}(f))}_{\text{Hasta la estabilidad}}(x) \\ &\quad \vee \\ \tilde{\phi}_{\mu B}(f)(x) &= \underbrace{\varepsilon_f^1 \varepsilon_f^1 \dots \varepsilon_f^1 (\delta_{\mu B}(f))}_{\text{Hasta la estabilidad}}(x) \end{aligned} \tag{2}$$

En la Figura 2 se ilustra el desempeño de la apertura y la cerradura por reconstrucción. Note en las Figuras 2(c) y 2(d) que algunas componentes han sido eliminadas, mientras que el resto de ellas se mantienen igual a la imagen original.

Granulometría

Se denomina granulometría a la distribución por tamaños de las partículas que constituyen un agregado, y es empleada en diversas áreas para describir las cualidades del tamaño y forma de gránulos individuales dentro de un producto. El concepto de granulometría fue introducido por G. Matheron a finales de los años 60; a continuación se presenta la definición de dicho concepto^{1,8}.

Definición 1 (Granulometría).- Sea $(\Psi_\lambda)_{\lambda \in \mathbb{Z}}$ una familia de transformaciones dependientes de un parámetro λ único positivo. Esta familia constituye una granulometría si y sólo si se verifican las tres propiedades siguientes: (i) $\forall \lambda$ positiva Ψ_λ es creciente, (ii) $\forall \lambda$ positiva, Ψ_λ es antiextensiva, (iii) $\forall \lambda$ y μ positivas, $\Psi_\lambda \Psi_\mu = \Psi_{\max(\lambda, \mu)}$.

En particular, la familia de aperturas y cerraduras morfológicas para el caso numérico $\{\gamma_{\mu B}\}, \{\phi_{\mu B}\}$ con

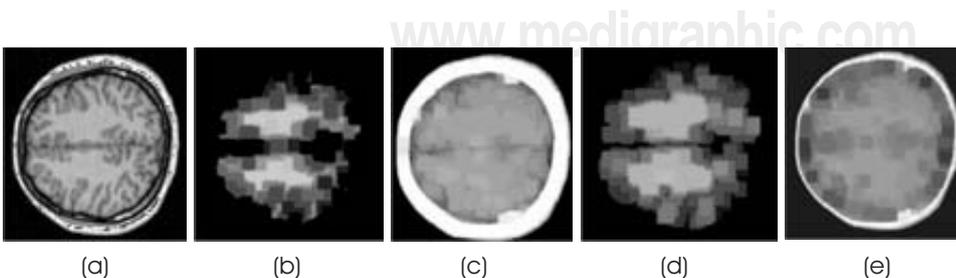


Figura 1. Imágenes ilustrando diferentes operadores morfológicos utilizando un elemento estructural talla 5. a) Imagen original, b) erosión, c) dilatación, d) apertura, y e) cerradura.

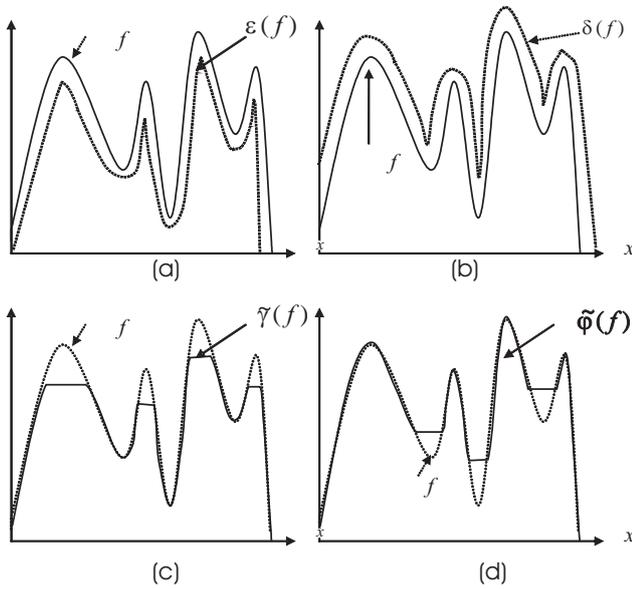


Figura 2 a). Imagen original f y el marcador $g = \varepsilon(f)$, b) Imagen original f y el marcador $g = \delta(f)$, c) Apertura por reconstrucción $\tilde{\gamma}(f)$, d) Cierre por reconstrucción $\tilde{\phi}(f)$.

$\mu = \{1, \dots, n\}$, cumplen con la definición anterior.

En este trabajo, se obtendrá información de las diferentes estructuras claras y oscuras que conforman a la imagen por medio de curvas que se obtienen de manera similar a una densidad granulométrica⁵.

Las ecuaciones^{9,10} (3) y (4) se utilizan en este trabajo para deducir las curvas granulométricas. Dichas ecuaciones permiten obtener una medida volumétrica normalizada de los residuos granulométricos de las estructuras claras y oscuras que conforman a la imagen.

La medida granulométrica asociada a las regiones claras se denotará como χ , y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\chi = \frac{\text{vol}[\gamma_{(\mu-1)B}(f)(x)] - \text{vol}[\gamma_{\mu B}(f)(x)]}{\text{vol}[f(x)]} \quad (3)$$

Mientras que la medida granulométrica asociada a las regiones oscuras se denota como ζ , y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\zeta = \frac{\text{vol}[\phi_{\mu B}(f)(x)] - \text{vol}[\phi_{(\mu-1)B}(f)(x)]}{\text{vol}[f(x)]} \quad (4)$$

Donde vol se utiliza para indicar que debe obtenerse el volumen sobre la imagen procesada o sobre la imagen original.

De las ecuaciones (3) y (4), note que debido a que la apertura y cerradura permiten eliminar componentes que no puede contener al elemento estructural; al realizar la diferencia entre aperturas o cerraduras respectivamente, se obtienen componentes de la imagen de tamaños específicos.

En la Figura 3 se ilustra el procedimiento seguido para encontrar χ (medida granulométrica sobre las regiones claras) sobre un solo corte. El procedimiento es el mismo en caso de aplicar la ecuación (4).

Estrabismo y su relación con la corteza cerebral estriada

Pese a que el cerebro humano pesa tan sólo el 2% del peso corporal de un adulto, consume cerca del 80% de la glucosa diaria. La mayor parte de este consumo energético lo utiliza la corteza cerebral visual, de ahí la importancia de conocer el origen microestructural de una falla eminentemente visual como es el estrabismo.

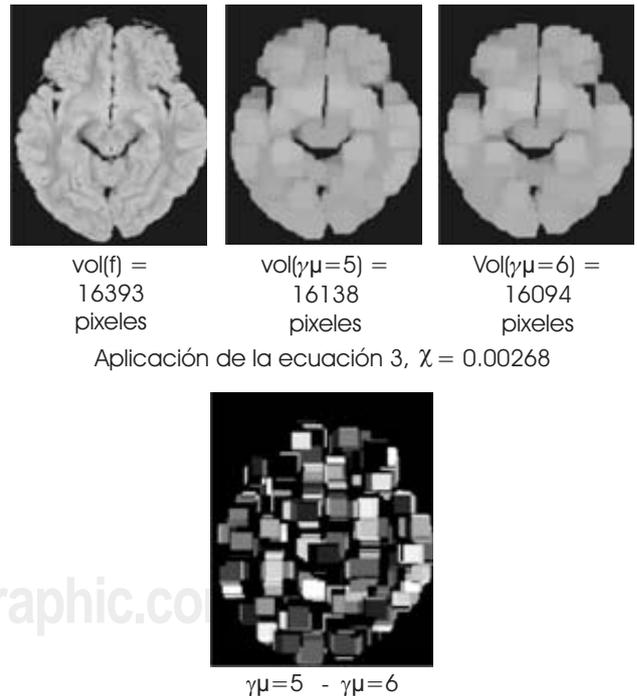


Figura 3. Ejemplificación del procedimiento seguido para hallar la medida granulométrica χ correspondiente a las regiones claras de la imagen. La imagen al final de la figura 3 ilustra la diferencia aritmética entre aperturas.

El estrabismo se refiere a la desviación patológica de los ojos. Su forma congénita es la de mayor frecuencia, pues afecta al 3% de la población mundial. Se presume que el estrabismo congénito (EC) es la manifestación de un problema neurológico sin que a la fecha se pueda demostrar con precisión aun el sustrato neuroanatómico ni neurofuncional que da origen a la enfermedad¹¹.

Los métodos actuales de neuroimagen, no cuentan con la resolución suficiente para verificar la presencia de lesiones microestructurales *in Vivo* que revelen alguna causa específica para el EC. Sin embargo, desde un punto de vista neurofuncional, a través de imágenes y datos obtenidos con mapeo cerebral digitalizado (MCD) y la SPECT (single photon emission computerized tomography), han descubierto que la corteza cerebral participa en el origen de los movimientos disociados que acompañan al EC y estos hallazgos han promovido a su vez, la búsqueda de la falla funcional en la corteza cerebral en sujetos vivos¹¹⁻¹⁵.

Por otra parte, en la formación de la corteza cerebral, existe un orden secuencial entre estructura y función que siguen un desarrollo progresivo hasta alcanzar la madurez neuronal. Sin embargo, es factible que esta secuencia sea alterada por distintas causas. Cuando esto sucede pueden quedar afectadas las vías de interconexión neuronal y producir alteraciones de origen neuronal entre cuyas manifestaciones podría estar el estrabismo^{11-13,16}.

De esta manera, resulta de interés conocer acerca de las estructuras localizadas en SB y SG de los cortes bajo estudio. Para ello el análisis granulomé-

trico es una herramienta útil que nos permite conocer de esta información; la cual puede ser empleada para correlacionar los estudios neurofuncionales con la estructura cortical.

METODOLOGÍA

Procesamiento de las IRM

En la Figura 4 se muestran algunas cortes de IRM que se utilizarán para mostrar las imágenes de salida después de aplicar un algoritmo basado en las transformaciones morfológicas definidas anteriormente; dichas imágenes corresponden a un infante con problemas de estrabismo.

Por otra parte, surge el interés de analizar las regiones donde se encuentra el lóbulo occipital, así como las zonas cercanas al mismo. Esto se debe a que, a través del empleo del mapeo cerebral digitalizado, se ha demostrado que en pacientes con problemas de estrabismo se presentan cambios en la actividad eléctrica en dichas regiones¹²⁻¹⁵.

Un ejemplo de estos mapas se muestra en la Figura 5, en el cual podemos observar un aumento de la actividad eléctrica en color oscuro, de acuerdo a la escala de valores situada arriba y a la derecha de la imagen.

Para los especialistas en el área de estrabismo, resulta de gran interés saber qué sucede en estas zonas. A continuación se presenta el algoritmo utilizado para eliminar el cráneo en la zona de interés tanto en los SC y en el SE.



Figura 4. Cortes axiales de alta resolución.

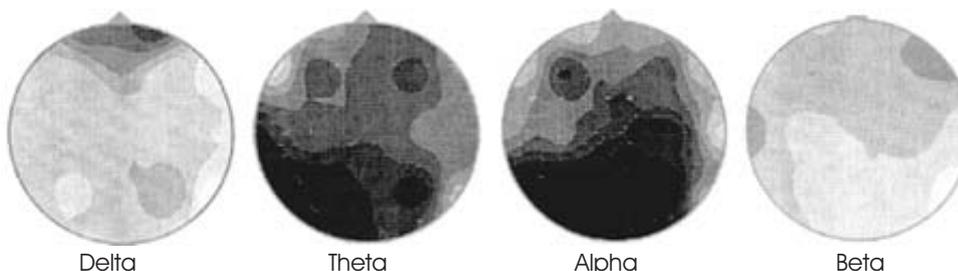


Figura 5. Mapeo cerebral digitalizado que muestra el comportamiento eléctrico de un niño con estrabismo. Las regiones más oscuras indican una actividad eléctrica mayor.

Algoritmo:

- i) Debido a que las zonas de interés están localizadas donde se ubica el lóbulo occipital, las imágenes originales localizadas en la Figura 4 fueron recortadas con la finalidad de separar las regiones de interés.
Para ilustrar el recortado, se presenta como ejemplo la imagen en la Figura 6. El recortado se realizó hasta el renglón 160 para todas las imágenes, tomando el origen en la parte superior izquierda.
De esta manera, un conjunto de imágenes recortadas se presentan en la Figura 7(a).
- ii) Una vez recortadas las imágenes, se procedió a separar el cráneo. Para esto se utilizó la apertura por reconstrucción tamaño 5 (ver la ecuación (2)). Como se mencionó anteriormente, la apertura por reconstrucción es una transformación que evita la generación de nuevas estructuras. En la Figura 7(b) se presentan las imágenes de salida después de su aplicación.
- iii) Umbralización de las imágenes de la Figura 7(b) con valor de umbral entre 90 y 255. Posteriormente se aplica una cerradura por reconstrucción talla 5 con la finalidad de cerrar los huecos originados por la umbralización. Las imágenes resultantes se muestran en la Figura 7(c).
- iv) Se aplica una máscara con la imagen original; i.e., todo pixel encendido en la imagen de la Figura 7(c) tomarán el nivel de gris correspondiente en la imagen original de la Figura 4. En este paso se ha eliminado el cráneo.

Respecto al paso ii) del algoritmo mencionado; se aplicó una apertura por reconstrucción tamaño

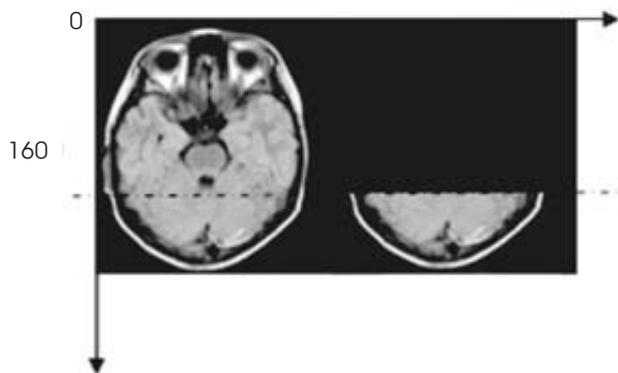


Figura 6. Imagen que ilustra el recortado.

5. Este tamaño fue elegido a partir de la gráfica que se muestra en la Figura 8(a). La curva fue obtenida calculando el volumen sobre la imagen obtenida a partir de la diferencia aritmética entre $\tilde{\gamma}_{\mu} - \tilde{\gamma}_{\mu+1}$. Dicha curva nos permite observar las estructuras contenidas (regiones claras) en la imagen de tamaño μ . Observe que una estructura importante de regiones blancas se encuentra entre los valores de μ entre 1 a 3, que es donde se encuentra la información del cráneo. Para verificar esto, la imagen en la Figura 8(b) corresponde por una parte a la imagen original y a la derecha se encuentra el erosionado talla 3. Este erosionado puede ser usado como marcador en la apertura por reconstrucción; sin embargo, debido a que el cráneo está rodeado por regiones con menor intensidad, es recomendable emplear como marcador un erosionado mayor para asegurar la atenuación de los niveles de intensidad del cráneo. Una erosión morfológica de tamaño 5 no permitirá que se reconstruya el cráneo con sus niveles originales de intensidad. En la Figura 8(c) se muestra el erosionado talla 5 para varias imágenes de entrada. Las imágenes erosionadas son usadas como marcador para obtener la apertura por reconstrucción.

Si se eligen tamaños pequeños del elemento estructural, por ejemplo $\mu = 1$, entonces no se atenuará por completo el cráneo y el algoritmo propuesto fallará; por lo que es indispensable tener en mente esta situación.

En la Figura 9 se ilustra la aplicación de la apertura por reconstrucción tamaño 1. Nótese que la intensidad de los píxeles en el cráneo apenas es atenuado.

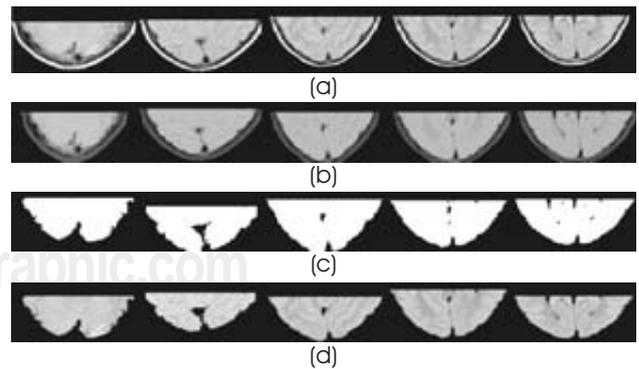


Figura 7. Imágenes que ilustran el procesamiento seguido hasta eliminar el cráneo. (a) Recortado de las imágenes; (b) Apertura por reconstrucción; (c) Umbralización y cerradura por reconstrucción; (d) Se obtiene una máscara.

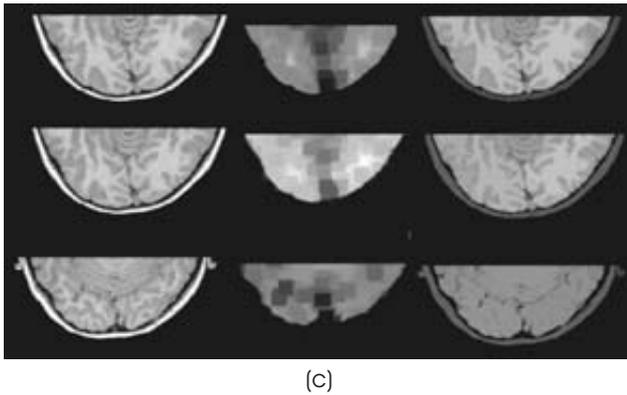
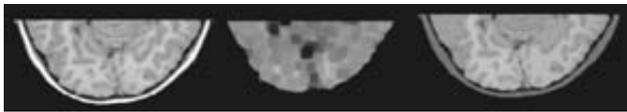
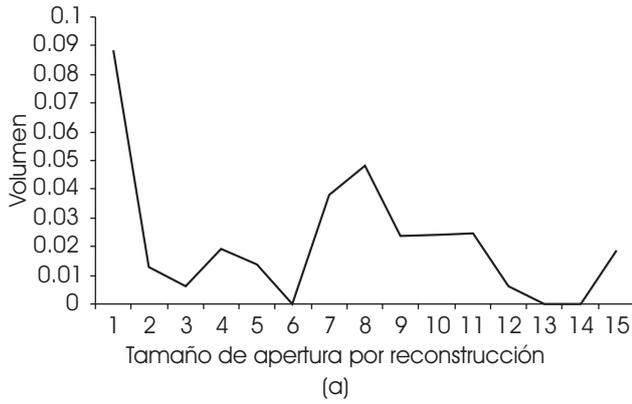


Figura 8 a). Curva de tamaño de estructuras. Volumen sobre la imagen $\tilde{\gamma}_\mu - \tilde{\gamma}_{\mu+1}$ b) Imagen original, erosionado talla 3 y apertura por reconstrucción talla 3; c) Imágenes originales, erosionados talla 5, y aperturas por reconstrucción talla 5.

Por otra parte, en la Figura 10 se ilustra el desempeño del algoritmo propuesto en una imagen de resonancia magnética tomada bajo condiciones diferentes a las que fueron capturados los cortes de alta resolución que se procesaron en este trabajo. Como puede observarse, el algoritmo permite segmentar correctamente la parte de cráneo que queda posterior al recortado de la imagen original.

Análisis granulométrico

Una vez separado el cráneo en las imágenes bajo estudio, se realizó un estudio granulométrico con la finalidad de obtener información sobre las diferentes estructuras localizadas en el corte bajo estudio.

Como se mencionó anteriormente, la apertura y cerradura morfológicas son dos filtros morfológicos que cumplen con la definición de granulometría. También, la apertura morfológica afecta principalmente a las regiones claras y por dualidad tenemos que la cerradura morfológica, afecta a las regiones oscuras respectivamente¹⁷. Por lo tanto, c (ver ecuación (3)) nos dará información sobre la densidad de distribución de las estructuras claras dentro de la imagen; i.e., sobre la SB. Mientras que la SG será analizada mediante ζ (ver la ecuación (4)).

A continuación se presentan varios conjuntos de gráficas granulométricas correspondientes a algunos cortes de los cerebros analizados. Las gráficas en las Figuras 11 y 12 corresponden a un SE; en las cuales es posible visualizar el comportamiento de la SB y SG en cada corte.

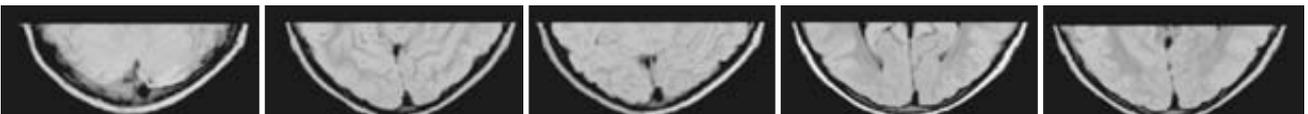


Figura 9. Apertura por reconstrucción tamaño 1 aplicada a las imágenes localizadas en la Figura 7(a).

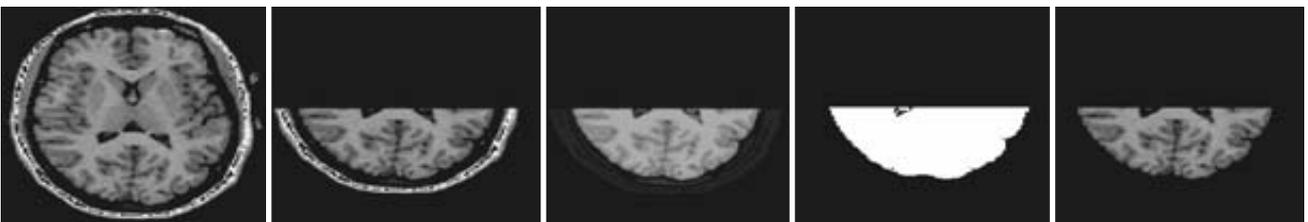


Figura 10. Imágenes de salida después de aplicar el algoritmo propuesto. La imagen de entrada tiene la característica de ser capturada bajo condiciones diferentes a las que se tomaron los cortes analizados en este trabajo.

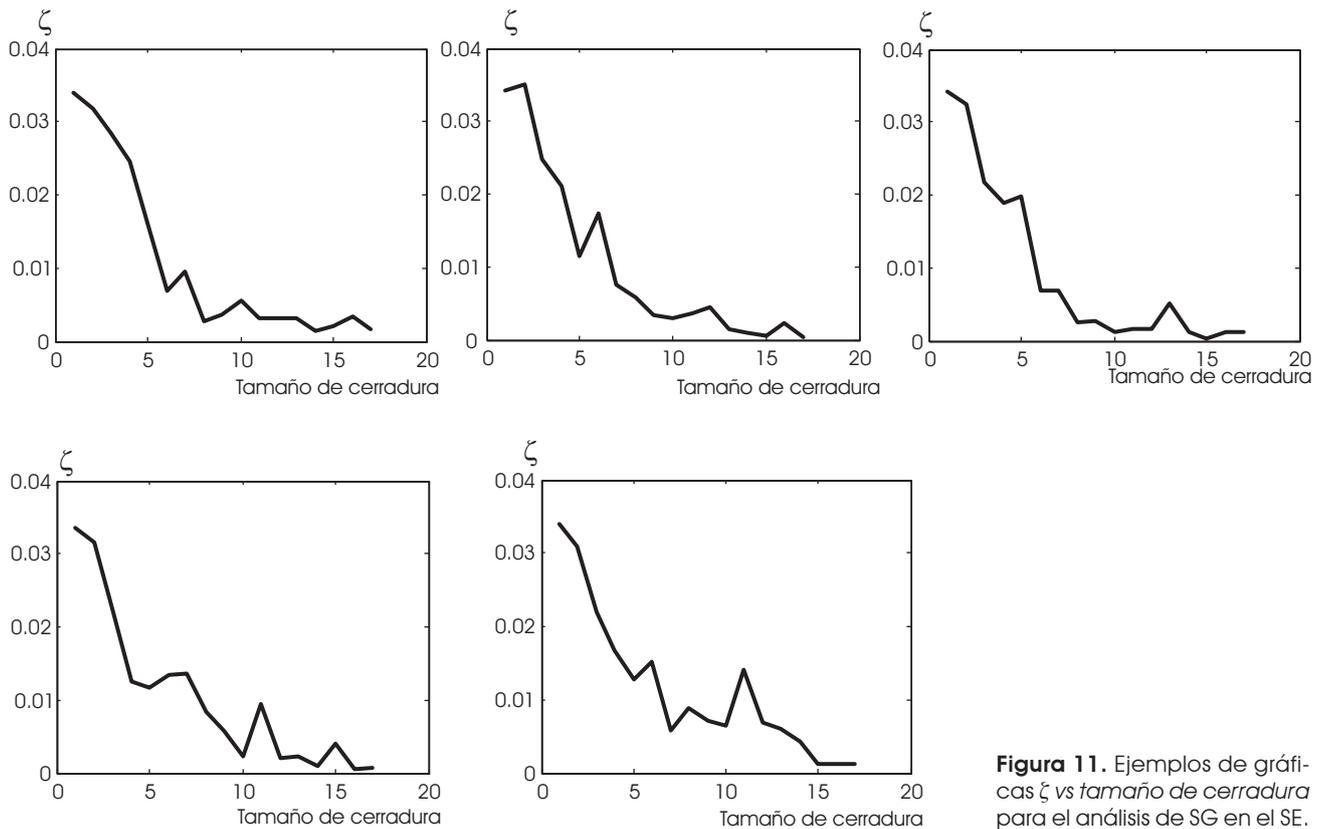


Figura 11. Ejemplos de gráficas ζ vs tamaño de cerradura para el análisis de SG en el SE.

Mientras que en las Figuras 13 y 14 se presentan algunos ejemplos de gráficas granulométricas correspondientes a un SC.

Debido a que se analizan alrededor de 20 cortes por cerebro, y tratando de encontrar algún comportamiento de las diferentes estructuras claras u oscuras de los cortes analizados; se encontraron gráficas granulométricas patrones para los SC y el SE con la finalidad de comparar la SB y la SG entre ellos. Los patrones de las estructuras claras y oscuras se determinan a través de los promedios de los datos obtenidos para cada uno de los cerebros analizados. Y en el caso de los SC, se obtiene una sola curva promediando los patrones encontrados. Las gráficas en la Figura 15 muestran las curvas de densidad granulométricas patrones tanto para el SE y los SC.

Las curvas granulométricas de los SC se encuentran en las gráficas ubicadas en las Figuras 15(a)-(d); sin embargo lo que se busca es encontrar un patrón para comparar las curvas granulométricas en contra de las dos gráficas correspondientes al SE.

De esta manera, se obtuvieron las curvas patrón de densidad granulométrico promedio de SB y SG

a partir de las gráficas de los dos SC; dichas curvas se presentan en las Figuras 15(e)-(f).

A pesar de que las curvas patrón en las Figuras 15(e)-(f) se obtienen solamente del análisis de dos cerebros sanos; las curvas resultantes dan información de aquellas características predominantes en ambos cerebros; de aquí el interés de obtener estas curvas; ya que permiten llevar a cabo la comparación con las curvas correspondientes al SE.

De esta manera, antes de analizar las curvas de las Figuras 15(e) y 15(f), consideraremos tres grandes grupos de estructuras localizadas en el lóbulo occipital para regiones claras y oscuras. Llamamos al grupo 1 aquel que contiene las estructuras pequeñas comprendidas en tamaños de elemento estructural de 1 a 6; el grupo 2 corresponde a estructuras de tamaño mediano y localizadas en el intervalo de tamaño de elemento estructural de 7-13 y finalmente el grupo de las estructuras de tamaño grande comprendidas en los tamaños 14-17 del elemento estructural.

De esta manera; examinando las gráficas localizadas en las Figuras 15(e)-(h) se observa lo siguiente:

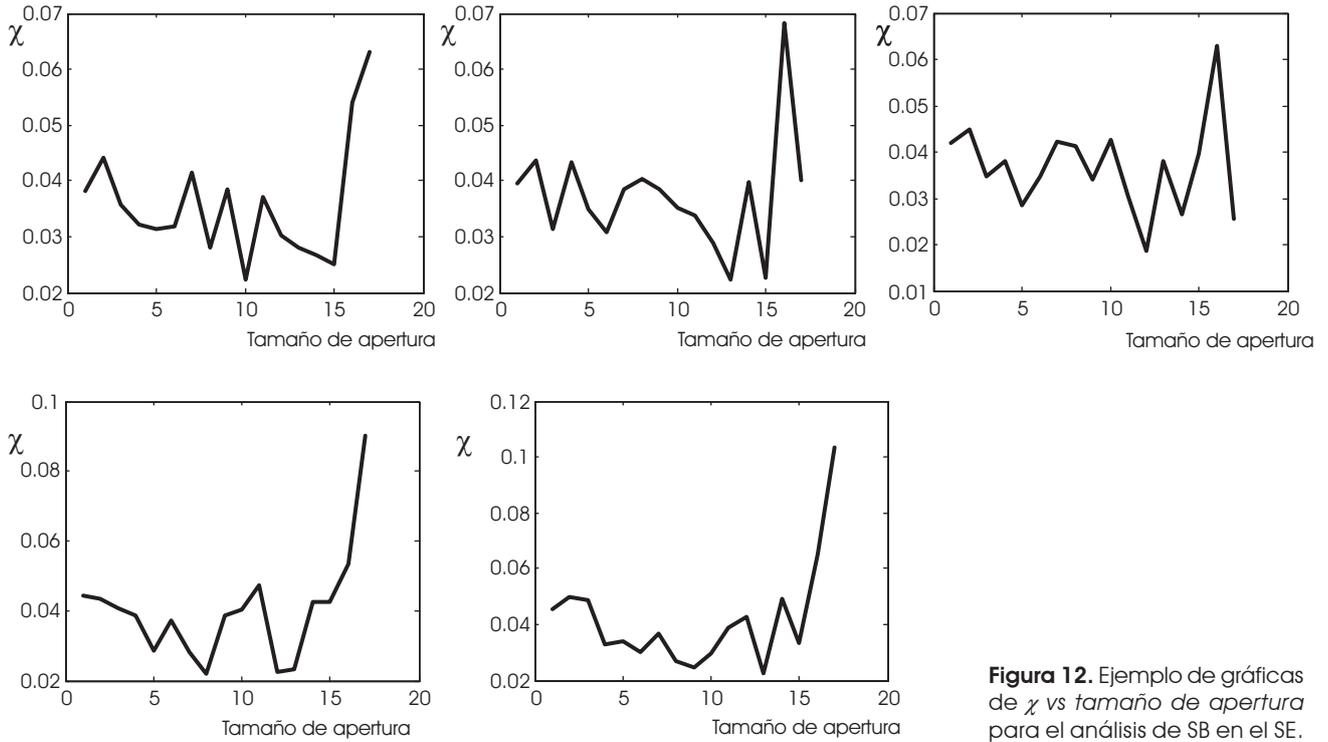


Figura 12. Ejemplo de gráficas de χ vs tamaño de apertura para el análisis de SB en el SE.

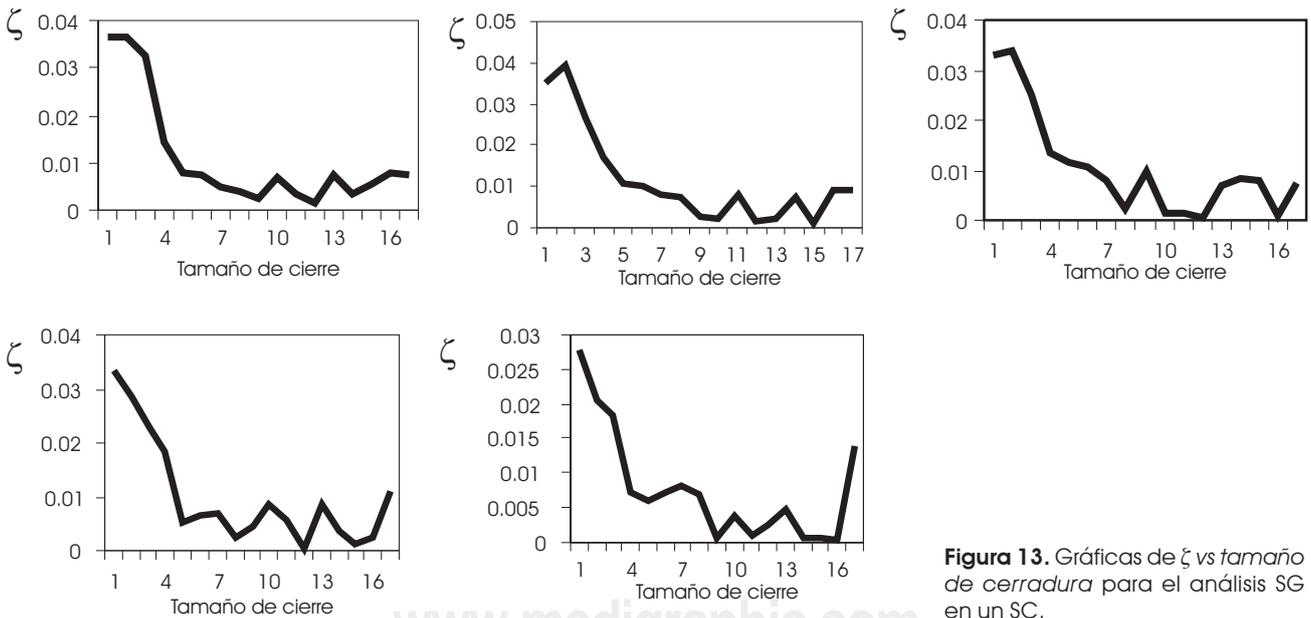


Figura 13. Gráficas de ζ vs tamaño de cerradura para el análisis SG en un SC.

i) Comparación de las Figuras 15(e) (patrón promedio de SB de los SC) y 15(g) (patrón de SB del SE), correspondientes a regiones claras (SB).

En la Figura 15 (e), se observan 5 picos, los cuales representan grupos de acumulados de estructuras de diferentes tamaños.

También se observa un comportamiento creciente de volumen a medida que se incrementa el tamaño de la apertura hasta llegar a las componentes de tamaño medio; posteriormente, el volumen decrece para las componentes de tamaño grande.

Mientras que para el SE (Figura 15 (g)), también se observa la misma cantidad de picos (5 en total); sin embargo, no se aprecia el comportamiento creciente a medida que se incrementa el tamaño de la apertura. Lo cual indica que no existe una transición suave entre las diferentes estructuras que componen a la sustancia blanca.

ii) Análisis de las Figuras 15(f) (patrón promedio de SG de los SC) y 15(h) (patrón de SG del SE), correspondientes a regiones oscuras (SG).

En la Figura 15(f) se observa que las estructuras oscuras decrecen suavemente; por lo que se tiene una transición suave entre las diferentes componentes. También se observa la existencia

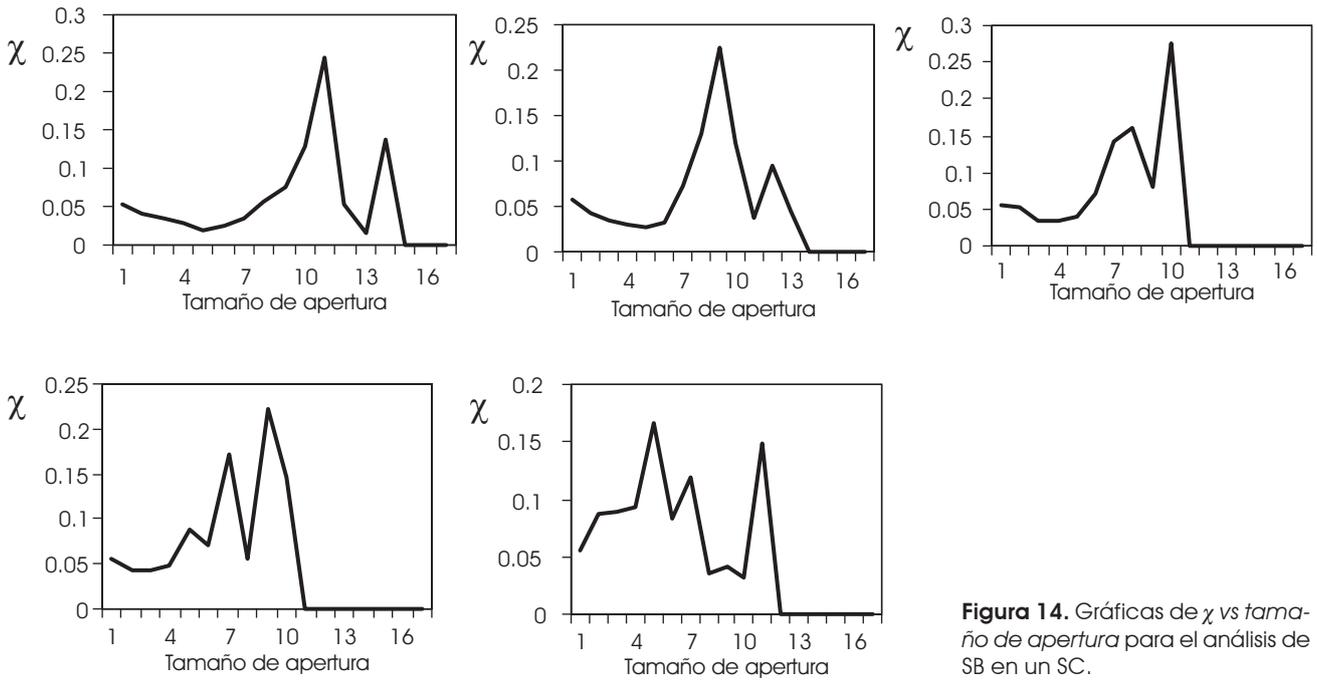


Figura 14. Gráficas de χ vs tamaño de apertura para el análisis de SB en un SC.

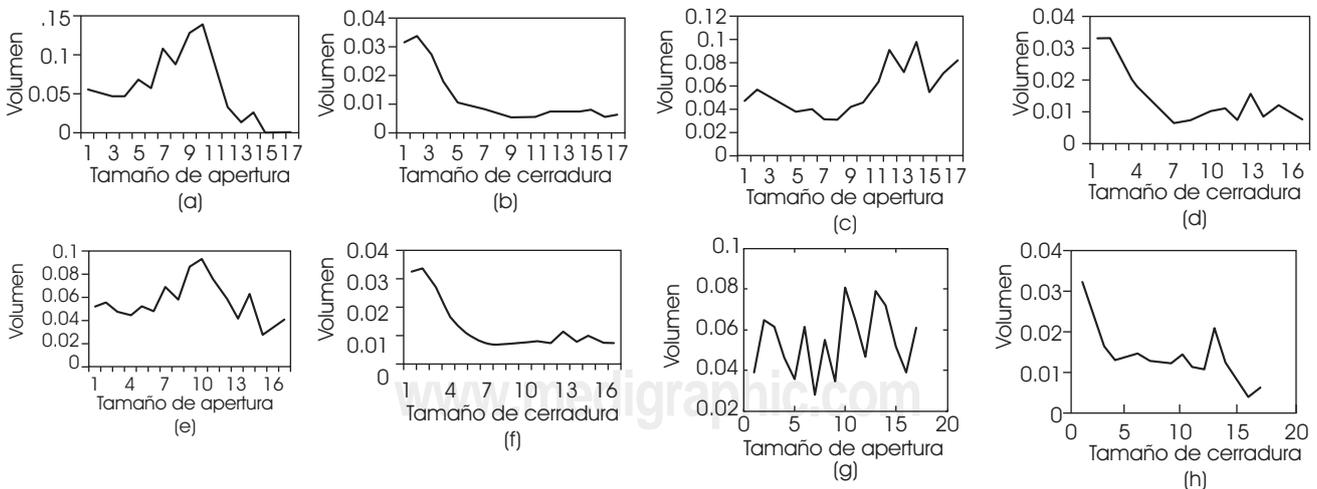


Figura 15 (a). Patrón de densidad granulométrico de SB obtenido del primer SC, (b) Patrón de densidad granulométrico de SG obtenido del primer SC, (c) Patrón de densidad granulométrico de SB obtenido del segundo SC, (d) Patrón de densidad granulométrico de SG obtenido del segundo SC, (e) Patrón de densidad granulométrico promedio de SB obtenido de los dos SC ; (f) Patrón de densidad granulométrico promedio de SG obtenido de los dos SC; (g) Densidad granulométrica de SB del SE ; (h) Densidad granulométrica de SG del SE.

Cuadro I. Volumen promedio de las diferentes estructuras claras (SB) y oscuras (SG) para los SC y el SE obtenidas a partir de las gráficas localizadas en las Figuras 15(e) y 15(f).

Grupos	Tamaño de apertura	Volumen promedio de regiones claras (SB) para los SC	Volumen promedio de regiones oscuras (SG) para los SC	Volumen de regiones claras (SB) para el SE	Volumen de regiones oscuras (SG) para el SE
Grupo 1, regiones de menor tamaño	1-6	0.3008	0.1323	0.3080	0.1163
Grupo 2, regiones de tamaño medio	7-13	0.4856	0.0566	0.3879	0.0976
Grupo 3, regiones de tamaño grande	14-17	0.1670	0.0333	0.2229	0.03058

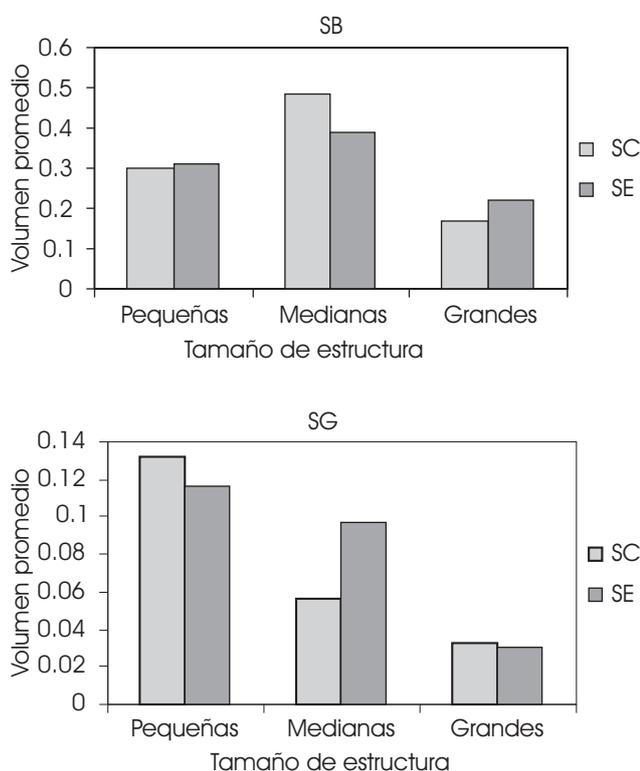


Figura 16. Volumen promedio de las diferentes estructuras localizadas en SB y SG de los sujetos bajo estudio.

de cuatro grupos (cuatro picos) importantes de estructuras.

Para el caso de la Figura 15(h), al inicio de la curva, se observa que las estructuras decrecen suavemente; sin embargo este comportamiento no se mantiene para las estructuras de tamaño mediano.

Por otra parte, los volúmenes promedios detectados en las curvas de las Figuras 15(e)-(h) se presentan en el Cuadro I; y en la Figura 16, se mues-

tran dos gráficas donde se involucran los volúmenes promedios adquiridos a partir de dicho cuadro.

Nótese que los cambios más importantes en los volúmenes promedios de SB y SG está dado por los volúmenes de las estructuras de tamaño mediano.

De esta manera, de acuerdo a los hallazgos encontrados en la distribución de los elementos que conforman la estructura cortical; estos cambios parecen estar íntimamente relacionadas con el comportamiento eléctrico y neurofuncional en el caso del SE analizado. El estudio sugiere que cambios en la neuroconducción nerviosa como los que hemos observado por medio de mapeo cerebral digitalizado en pacientes estrábicos¹²⁻¹⁵ pudieran ser la consecuencia de los cambios en la organización microestructural de la masa cerebral ahora analizada.

Lo anterior sugiere que a partir de un mismo proceso de inmadurez se establecen distintas vías de afectación en los procesos de interconexión neuronal, de tal suerte que resultan afectadas en grados y modos distintos la sustancia gris y blanca respectivamente, lo que motiva a su vez expresiones clínicas distintas del estrabismo disociado.

Estudios del funcionamiento eléctrico del cerebro realizado por medio de neurometría computada, han revelado la estrecha correlación que existe entre la estructura y la función cerebral. Esto se ha determinado a partir del estudio de la coherencia eléctrica que es un método no invasivo para estudiar las relaciones funcionales entre distintas áreas del cerebro y resulta alterada cuando algunas vías de asociación (cortico-corticales cortas y largas, cortico-subcorticales y cortico-corticales cortas) se encuentran afectadas estructuralmente, esto se ha demostrado en algunas enfermedades como el Alzheimer y la demencia. Algunos aspectos del comportamiento eléctrico como es el caso de la cohe-

rencia, dependen precisamente del sustrato neuroestructural^{18,19}.

Para algunos autores la disminución de la coherencia representa un marcador diagnóstico, por lo que al investigar más respecto a la interrelación entre la estructura y la función neuronal podremos conocer mejor del origen de múltiples enfermedades que tienen su asiento en la corteza cerebral, o al menos se ha demostrado que participa la corteza cerebral en su fisiopatología, y por otro, coadyuva a establecer mejores tratamientos¹⁸.

Por otra parte, durante el desarrollo de la corteza cerebral o corticogénesis existe migración celular de neuronas que viajan y van madurando desde las regiones periventriculares hasta alcanzar las regiones más superficiales del cerebro en donde culmina su maduración, durante el proceso las vías de interconexión pueden dañarse dando lugar a diferentes cuadros neurológicos que pueden afectar tanto la madurez neuronal como el desempeño de las vías de asociación, sin que se conozca plenamente aún, al menos en el estrabismo cuál sea la alteración estructural²⁰⁻²².

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un método para la segmentación de los diferentes cortes de IRM, así como el cálculo de densidades granulométricas para el análisis de regiones claras y oscuras en el lóbulo occipital utilizando transformaciones morfológicas.

Por otra parte, se considera que si existen algunas características predominantes en los cortes analizados, estas características deben mantenerse al obtener gráficas granulométricas patrones. Los patrones se obtienen al calcular el promedio tanto para las regiones claras, así como para las regiones oscuras.

Los patrones se establecen bajo un criterio de tamaño, tal y como se presentan en las gráficas localizadas en la Figura 15.

De acuerdo a los patrones promedio analizados, existen importantes diferencias entre los SC y el SE. Las diferencias en SB consisten en que en el SE, no existe una transición suave entre las diferentes estructuras claras; mientras que en los SC, los volúmenes de las estructuras tienen un comportamiento creciente y por consiguiente una transición suave (Figuras 15 (e) y 15(g)). Respecto a la SG, se observa en los SC, que el volumen de las estructuras de tamaño pequeño decrece suavemente hasta alcanzar las estructuras de tamaño grande. Sin embargo

en el SE, el volumen de las estructuras de tamaño pequeño decrece suavemente solamente hasta alcanzar las estructuras de tamaño mediano, en las cuales el volumen se mantiene casi constante hasta alcanzar las estructuras de tamaño grande.

Por otra parte, de acuerdo a los volúmenes que se presentan en la Figura 16; se observa respecto a la SB, que el cambio más significativo entre los SC y el SE se encuentra en el volumen de las componentes de tamaño mediano. Mientras que en SG, los principales cambios entre los SC y el SE, se encuentran en los volúmenes de las estructuras pequeñas y medianas.

Debido a los cambios encontrados entre las densidades de las estructuras a partir de las gráficas patrón, es posible que dichas distribuciones y las variaciones en las cantidades volumétricas de las estructuras encontradas, determinen de algún modo cambios en la conductividad y la resistencia neuroeléctrica.

Cambios en la neuroconducción nerviosa como los que hemos observado por medio de mapeo cerebral digitalizado en pacientes estrábicos¹²⁻¹⁵ pudieran estar relacionados con cambios en la organización microestructural de la masa cerebral.

Las curvas granulométricas obtenidas en este trabajo a partir del análisis de cerebros de niños con estrabismo, ha demostrado que existen diferencias significativas en la proporción de elementos granulométricos de la SG y la SB entre cerebros sanos e inmaduros, determinándose que los cerebros de los pacientes estrábicos presentan grados de inmadurez granulométrica mayor en comparación con sujetos sanos de la misma edad²³. Las variaciones más claras se observan a partir de las curvas promedio patrón de SB (Figuras 15(e) y 15(g)). En particular, en la Figura 15(g), se observan grupos de estructuras que forman picos o montones, los cuales se caracterizan por no tener una transición suave de un grupo a otro; en otras palabras, faltan estructuras de ciertos tamaños para obtener esa transición suave y el comportamiento creciente que se observa en la gráfica de la Figura 15(e).

Por otro lado, cambios estructurales consistentes en alteraciones en la relación volumen y la densidad granulométricas pueden determinarse en sujetos vivos, lo cual es una ventaja, pues permite complementar estudios neurofuncionales como el MCD, los cuales aunque poseen una gran resolución temporal, ellos también presentan una baja resolución espacial. La granulometría ofrece en cambio un análisis estructural fino que permite ayudar a interpretar los estudios neurofuncionales

por un lado y por otro se perfila como un excelente marcador diagnóstico para muchas enfermedades neurológicas.

El estudio sugiere que la inmadurez neuronal granulométrica está relacionada con el estrabismo y que las variaciones en los elementos granulométricos de tamaño intermedio principalmente, podrían propiciar alteraciones en la neuroconducción del impulso neuroeléctrico, favoreciendo la presencia de estrabismo y las alteraciones en los estudios neurofuncionales como el mapeo cerebral.

De ser así, el estudio granulométrico coadyuvaría a conocer más respecto al origen, diagnóstico y pronóstico de esta enfermedad tan frecuente y tan poco conocida.

De esta manera, aunque la cantidad de cerebros analizados son tres, nos brindan información importante para poder establecer diferencias granulométricas cuando se comparan entre los SC y el SE.

Finalmente, como trabajo futuro se plantea lo siguiente: i) La mejora de los operadores morfológicos involucrados para la obtención de las curvas granulométricas. Estos operadores deben ser auto-duales con la finalidad de tratar por separado a las componentes claras y oscuras de la imagen. ii) Se incluirán más niños sanos para la obtención de los patrones promedios; así como también se incrementará la cantidad de pacientes con estrabismo.

AGRADECIMIENTOS

A la fundación Mario Moreno Reyes por el apoyo para la realización de los estudios de resonancia magnética.

El autor Jorge D. Mendiola Santibañez agradece a CONACYT México. Este artículo fue realizado parcialmente bajo el proyecto 62378.

BIBLIOGRAFÍA

- Serra J. Image analysis and mathematical morphology, Vol. I, En: Academic Press, 1982.
- Serra J, Salembier P. Connected operators and pyramids. Proc. of SPIE. Image algebra and mathematical morphology'93, San Diego, July, 1993.
- Salembier P, Serra J. Flat zones filtering, connected operators, and filters by reconstruction, IEEE transactions on image processing, 1995; 4: 1153-1160.
- Vincent L. Granulometries and opening trees fundamenta informaticae, 2000; 41(1-2): 57-90.
- Vincent L, Dougherty ER. Morphological segmentation for textures and particles. En: Digital image processing methods E.R. Dougherty, editor, Marcel Dekker, New York, 1994.
- Heijmans H. Morphological image operators En: Academic Press, USA, 1994.
- Soille P. Morphological image analysis: Principles and applications. En: Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- Matheron G. Random sets and integral geometry. En: John Wiley and Sons, New York, 1975.
- Mendiola-Santibañez J.D, Terol-Villalobos IR. Morphological contrast mappings on partition based on the flat zone notion". Computación y Sistemas 2002; 6: 25-37.
- Terol-Villalobos IR. Morphological image enhancement and segmentation. En: Advances in imaging and electron physics, P. W. Hawkes, Ed., Academic Press, 2001: 207-273.
- Gallegos-Duarte M. Maniobras exploratorias en la endotropía congénita. En: Temas selectos de estrabismo. Centro Mexicano de Estrabismo SC. México, Composición Editorial Láser. México, D.F. 2005: 1-18.
- Gallegos-Duarte M, Moguel S, Rubin de Celis B. Alteraciones en el mapeo cerebral en la endotropía congénita variable. Rev Mex Oftalmol 2004; 78(3): 122-126.
- Gallegos-Duarte M. Respuesta cortical paradójica durante la fotoestimulación intermitente en el estrabismo disociado. Cir Ciruj 2005a; 73(3): 161-165.
- Gallegos-Duarte M, Moguel-Ancheita S. Modifications neurologiques adaptatives après traitement médical et chirurgical du syndrome strabique avec variations des repères angulaires. En: Réunion de printemps, Association française de strabologie. 110 Congrès de la société Française d'Ophthalmologie, Paris 10 may, 2004.
- Moguel-Ancheita S, Orozco-Gómez L, Gallegos-Duarte M, Alvarado I, Montes C. Cambios metabólicos en la corteza cerebral relacionados con el tratamiento de estrabismo. Resultados preliminares con SPECT". Cir Ciruj 2004; 72: 165-170.
- Mendola JD, Conner IP, Anjali R, Chan ST, Schwartz TL, Odom JV, Kwong KK. Voxel-based analysis of MRI detects abnormal visual cortex in children and adults with amblyopia. Human Brain Mapping 2005; 25(2): 222-236.
- Granulometries, Segmentation, and Morphological Algorithms, Lecture Notes for Morphological Image and Signal Processing Workshop, Zakopane, Poland, September 1995.
- Calderón-González PL, Parra-Rodríguez MA, Libre-Rodríguez JJ, Gutiérrez JV. Análisis espectral de la coherencia cerebral en la enfermedad de Alzheimer. Rev Neurol 2004; 38(5): 422-427.
- Dunkin JJ, Leuchter AF, Newton TF, Cook IA. Reduced EEG coherence in dementia: state or trait marker? Biol Psychiatry 1994; 35: 870-9.
- Papovik E, Haynes LW. Noradrenergic but not cholinergic innervation of the embryonic cortical neuroepithelium rescues germinal and postmitotic cells in heterochronic cocultures. Brain Res 2000; (853): 227-235.
- Chiaki I, Fumitaka K, Tomoko K, Masato M, Masumi I, Tadaharu T et al. Brain-derived neurotrophic factor-dependent unmasking of "silent" synapses in the developing mouse barrel cortex. Neurosciencie 2003; (22): 13069-13074.
- Goshima Y, Ito T, Sasaki Y, Nakamura F. Semaphorins as signals for cell repulsion and invasion. J Clin investigation 2002; (109): 993-998.
- Gallegos-Duarte M, Mendiola-Santibañez JD, Ortiz-Retana JJ. Estrabismo disociado y maduración. Boletín del CLADE 2007; 21(2): (en prensa).