

Herramienta para la Aplicación de Operadores de Morfología Matemática en Imágenes de Escala de Gris

Isaac E. Pérez*, María F. De Abreu*, Pedro A. Linares*

Fecha de recibido: 18/12/2013

Fecha de Aprobación: 21/03/2014

Resumen

Pasos previos a la medición y clasificación de rasgos y la posterior caracterización de imágenes, son el filtrado y la segmentación. Dada la utilidad de la morfología matemática en tales tareas, surgió la necesidad de incorporar una herramienta para la aplicación de operadores de morfología matemática sobre imágenes en escala de gris al prototipo *Cimahis* (*Caracterización de imágenes histológicas*), actualmente en desarrollo en la Universidad de Carabobo. La investigación se completó en tres etapas: un *estudio del estado del arte del problema* donde se revisaron las bases teóricas de la morfología matemática, sus aplicaciones prácticas y la documentación del *Cimahis*, seguida de una etapa de *planificación y diseño* usando la metodología *Feature Driven Development* (FDD) donde se crearon los artefactos de diseño y se hizo la planeación de actividades que guió la etapa de *construcción y prueba* en la cual se llevó a cabo la implementación e integración de la herramienta con el prototipo y se hicieron varios test para validar la correctitud en los operadores morfológicos y estimar la eficiencia relativa de la herramienta respecto de otros programas de procesamiento de imágenes. Al final se construyó una herramienta funcional y eficiente que cuenta con doce operaciones morfológicas, entre las cuales están, el gradiente morfológico, las transformaciones top-hat, bottom-hat y dos operadores de reconstrucción morfológica. La mayoría de los resultados experimentales muestran tiempos de ejecución entre seis y treinta veces más bajos que los generados por las contrapartes disponibles en las herramientas de procesamiento morfológico usadas para hacer las pruebas.

Palabras Clave: *Morfología, Metodología FDD, Imágenes de escala de gris*

Abstract

Steps towards the measurement of characteristics and further characterization of images are filtering and segmentation. Given the usefulness of mathematical morphology in this work, it became necessary to incorporate a tool for the application of mathematical morphology operators on gray scale images to the prototype *Cimahis* (*Characterization of histological images*), currently under development at

* Universidad de Carabobo, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Departamento de Computación, Campus Bárbula, Av. Salvador Allende, edificio Facultad de Ciencia y Tecnología, Naguanagua Edo. Carabobo, Venezuela. {iperez8, mdeabreu, plinares}@uc.edu.ve.

‡ Se concede autorización para copiar gratuitamente parte o todo el material publicado en la *Revista Colombiana de Computación* siempre y cuando las copias no sean usadas para fines comerciales, y que se especifique que la copia se realiza con el consentimiento de la *Revista Colombiana de Computación*.

the University of Carabobo. The research was completed in three stages: a *study of the state of the art of the problem* which reviewed the theoretical foundations of mathematical morphology, its practical applications and the Cimahis documentation, followed by a *planning and design* stage where the design artifacts created and made the planning activities that guided the stage of *construction and testing* in which took place the implementation and integration of the tool with the prototype and made several tests to validate the correctness on morphological operators and estimate relative efficiency of the tool relative to other image processing programs. In the end was built a functional and efficient tool with twelve morphological operations, among which are, the morphological gradient, the transformations top-hat and bottom-hat and two morphological reconstruction operators. Most experimental results show runtimes between six and thirty times lower that those generated by the counterparts in morphological processing tools used for testing.

Keywords: *Morphology, FDD methodology, Grayscale images*

1. Introducción

1.1 Bases Teóricas de la Morfología en Escala de Gris

En el campo del procesamiento y análisis de imágenes, la *Morfología Matemática* refiere una teoría y una técnica para extracción de componentes de una imagen que son útiles en la representación y descripción de la forma de los objetos presentes en la misma [1]. Esta tiene su base en la teoría de conjuntos y en operadores del algebra no-lineal que operan sobre la forma de los objetos en una imagen [2]. Los conceptos y aplicaciones de la morfología matemática fueron inicialmente definidos para imágenes binarias y luego generalizados para abarcar también imágenes en escala de gris.

Los operadores de morfológicos en escala de gris presentados en esta sección trabajan sobre funciones digitales de la forma $f(x, y)$ y $b(x, y)$, donde $f(x, y)$ es una imagen en escala de gris y $b(x, y)$ es el *Elemento Estructurante*. La asunción es que se trata de funciones discretas, esto es, si \mathbb{Z} denota el conjunto de los números enteros, entonces (x, y) son enteros del Producto Cartesiano \mathbb{Z}^2 , y f y b son funciones que asignan un valor de intensidad (un número del conjunto de los números reales \mathbb{R}) a cada par de coordenadas (x, y) . Habitualmente, los valores de gris son también números enteros, \mathbb{Z} reemplaza a \mathbb{R} , y entonces la imagen digital se convierte en una función cuyas coordenadas y amplitud son valores enteros.

Un *Elemento Estructurante* es una imagen, generalmente muy pequeña, diseñada especialmente para ser usada como una “sonda” para examinar propiedades específicas de otra imagen. Aquí estamos interesados en los así llamados *Elementos Estructurantes Planos*: elementos

estructurantes que no tienen variaciones de nivel de gris y son iguales a los usados en morfología de imágenes binarias; solo poseen dos niveles de gris, uno para el *background* y otro para el *foreground*. Adicionalmente, y aunque la definición de los operadores es general, el interés se centra en elementos estructurantes simétricos con punto origen en su centro. La simetría se establece basada en el operador *reflexión* que se define para una función digital $b(x, y)$ como $\hat{b}(x, y) = b(-x, -y)$. Un elemento estructurante $b(x, y)$ es simétrico si $b(x, y) = \hat{b}(x, y)$, es decir $b(x, y) = b(-x, -y)$.

1.1.1 Erosión y Dilatación

La *erosión* de una imagen f por un elemento estructurante b en una locación (x, y) está definida como el valor *mínimo* de la imagen en la región que coincide con b cuando el origen de b se traslada al punto (x, y) .

$$[f \ominus b](x, y) = \min_{(s,t) \in b} \{f(x + s, y + t)\} \quad (1)$$

Haciendo que x e y tomen todos los valores posibles en f , de forma que b visite toda la imagen f , se obtiene la erosión completa de la imagen f por b .

Similarmente, la *dilatación* de una imagen f con un elemento estructurante b en el punto (x, y) se define como el valor *máximo* de la imagen en la región cubierta por b en el punto (x, y) se define como el valor máximo de la imagen en la región cubierta por \hat{b} cuando el origen de \hat{b} está situado en (x, y) .

$$[f \oplus b](x, y) = \max_{(s,t) \in b} \{f(x - s, y - t)\} \quad (2)$$

Igualmente, moviendo los valores de x e y para que b recorra toda la imagen f se obtiene la dilatación completa de la imagen f con el elemento estructurante b .

Dado que la erosión calcula el valor de intensidad mínimo de la imagen f en una vecindad de (x, y) definida por b , el efecto producido al aplicar erosión es que se obtiene una imagen más oscura que la original en la cual las regiones más brillantes se reducen de tamaño y las más oscuras aumentan. Similarmente, con la dilatación el efecto que se obtiene es el opuesto a la erosión. La imagen aumenta su intensidad o brillo global y los objetos brillantes aumentan su tamaño mientras que los objetos más oscuros disminuyen.

1.1.2 Opening y Closing

El *opening* de una imagen f con un elemento estructurante b , denotado $f \circ b$, es

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b \quad (3)$$

Es decir, el opening de f con b es simplemente la erosión de f con b seguida de la dilatación del resultado con el mismo elemento estructurante b . En general, el efecto de la operación de opening es remover pequeños detalles brillantes (que representan los picos o máximos locales de la función digital f), mientras deja los niveles de intensidad global de la imagen y las regiones brillantes grandes relativamente sin cambios.

Similarmente, el *closing* de una imagen f con un elemento estructurante b , denotado $f \bullet b$, es

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b \quad (4)$$

Esto es, una dilatación seguida de una erosión. Su efecto general es atenuar o difuminar los detalles más oscuros de la imagen (que representan valles o mínimos locales de la función digital f) mientras mantiene los niveles de intensidad global y áreas oscuras grandes sin alteraciones significativas.

1.1.3 Suavizado Morfológico

Es simplemente una combinación de opening y closing con un elemento estructurante dado. Dado que el opening suprime detalles brillantes y el closing detalles oscuros, esas dos transformaciones son usadas en combinación como un *filtro morfológico* para suavizar la imagen global y reducir ruido.

En adición al suavizado morfológico simple (compuesto de opening mas closing), se pueden formar filtros morfológicos más elaborados, cuyos efectos son más apreciables, alternando de forma finita las operaciones morfológicas de opening y closing para suprimir un mayor número de detalles. Si en adición a los símbolos para el opening y closing dados en (3) y (4), establecemos por comodidad la notación $O(f)$ y $C(f)$ para denotar el opening y closing respectivamente de una imagen f podemos entonces definir más fácilmente

Proper-Opening:

$$\min(f, O(C(O(f)))) \quad (5)$$

Proper-Closing:

$$\max(f, C(O(C(f)))) \quad (6)$$

Función *Auto-Median*:

$$\min(O(C(O(f))), C(O(C(f)))) \quad (7)$$

Aquí $\min(f, g)$ y $\max(f, g)$ son los operadores de mínimo y máximo pixel a pixel entre dos imágenes respectivamente.

El *Proper-Opening* remueve pixeles brillantes aislados en una región oscura y suaviza los bordes de las regiones brillantes, el *Proper-Closing* remueve pixeles oscuros dentro de una región brillante y suaviza los bordes de las regiones oscuras y finalmente la función *Auto-Median* (que es mínimo pixel a pixel entre proper-opening y proper-closing) genera una imagen con pocos detalles y objetos más simplificados.

1.1.4 Gradiente Morfológico

La erosión y la dilatación pueden ser usadas en combinación con la sustracción de imágenes para obtener el *gradiente morfológico* de una imagen, denotado como g , donde

$$g = (f \oplus b) - (f \ominus b) \quad (8)$$

La dilatación engrosa los objetos o regiones de la imagen mientras que la erosión los reduce o “adelgaza”. Las zonas internas de los objetos son relativamente homogéneas por lo que permanecen sin cambios significativos, luego la operación de sustracción tiende a eliminar esas zonas y a enfatizar los bordes de los objetos. El resultado es una imagen donde, por lo general, los bordes están realzados y el resto de la imagen es puesta a valores cercanos al fondo.

1.1.5 Transformación Top-hat y Bottom-hat

Combinando la sustracción de imágenes con las operaciones de opening y closing, se producen las así llamadas transformaciones *top-hat* y *bottom-hat*.

La transformación *top-hat* de una imagen f se define como f menos su opening:

$$T_{\text{hat}}(f) = f - (f \circ b) \quad (9)$$

Similarmente, el *bottom-hat* de la imagen f se define como el closing de f menos f :

$$B_{\text{hat}}(f) = (f \bullet b) - f \quad (10)$$

El resultado de estas transformaciones son imágenes donde los detalles brillantes y oscuros suprimidos por el opening y el closing respectivamente están enfatizados y el resto de la imagen es puesta a un valor cercano al fondo.

1.1.6 Reconstrucción Morfológica

A diferencia de los conceptos introducidos hasta ahora, los cuales trabajan con una imagen y un elemento estructurante, las transformaciones de *reconstrucción morfológica* involucran dos imágenes y un elemento estructurante. Una imagen, conocida como *marcador*, contiene los puntos iniciales de la transformación. La otra imagen, conocida como *máscara*, limita la transformación. El elemento estructurante define la conectividad.

Central para la reconstrucción morfológica son los conceptos de *Dilatación Geodésica* y *Erosión Geodésica*. Si denotamos a f como la imagen marcador y g como la imagen máscara, ambas siendo imágenes en escala de gris del mismo tamaño y donde $f \leq g$. La *dilatación geodésica de tamaño 1* de la imagen marcador f respecto de la imagen máscara g se define como

$$D_{\mathbf{g}}^{(1)}(f) = (f \oplus b) \wedge \mathbf{g} \quad (11)$$

Donde \wedge denota el operador de mínimo punto a punto. La ecuación indica que la dilatación geodésica de tamaño 1 se obtiene dilatando f con b y luego seleccionando el mínimo entre el resultado y g para cada punto (x, y) . La *dilatación geodésica de tamaño n* de f con respecto a g se define como

$$D_{\mathbf{g}}^{(n)}(f) = D_{\mathbf{g}}^{(1)}[D_{\mathbf{g}}^{(n-1)}(f)] \quad (12)$$

con $D_{\mathbf{g}}^{(0)}(f) = f$

Similarmente, la *erosión geodésica de tamaño 1* de una imagen marcador f con respecto de una imagen máscara g (en este caso $g \leq f$) se define como

$$E_{\mathbf{g}}^{(1)}(f) = (f \ominus b) \vee \mathbf{g} \quad (13)$$

Donde \vee denota el operador de máximo punto a punto. La *erosión geodésica de tamaño n* de f respecto de g se define

$$E_g^{(n)}(f) = E_g^{(1)}[E_g^{(n-1)}(f)] \quad (14)$$

Con $E_g^{(0)}(f) = f$

La *Reconstrucción Morfológica por Dilatación* de una imagen máscara g a partir de una imagen marcador f se define como la dilatación geodésica de f respecto de g iterada hasta alcanzar la estabilidad; esto es

$$R_g^D(f) = D_g^w(f) \quad (15)$$

Con k tal que $D_g^{(k)}(f) = D_g^{(k+1)}(f)$

La *Reconstrucción Morfológica por Erosión* de una imagen máscara g a partir de una imagen marcador f está definida como

$$R_g^E(f) = E_g^{(k)}(f) \quad (16)$$

Con k tal que $E_g^{(k)}(f) = E_g^{(k+1)}(f)$

Los conceptos anteriores sirven de base para la definición de dos operadores morfológicos que son de gran utilidad en la fase pre-procesamiento para realizar *segmentación*.

El *Opening por Reconstrucción de tamaño n* de una imagen f se define como la reconstrucción por dilatación de f a partir de la *erosión de tamaño n* de f ; esto es

$$O_R^{(n)}(f) = R_f^D[(f \ominus nb)] \quad (17)$$

Donde la *erosión de tamaño n* ($f \ominus nb$) siendo n un entero positivo, denota n erosiones sucesivas en la forma

Similarmente, *Closing por Reconstrucción de tamaño n* de una imagen f se define como la reconstrucción por erosión $((f \oplus b) \ominus b) \dots \ominus b$ la *dilatación de tamaño n* de f ; concretamente

$$C_R^{(n)}(f) = R_f^E[(f \oplus nb)] \quad (18)$$

Aquí $(f \oplus nb)$ la *dilatación de tamaño n* de f denota n dilataciones sucesivas de forma análoga a la presentada anteriormente para la erosión.

1.2 Antecedentes y Material Relacionado

Los trabajos precursores del campo fueron escritos por Georges Matheron [3] y Jean Serra [4]. Tal y como se menciona en [2], se trata de material altamente matemático donde se exponen los fundamentos teóricos de la morfología matemática. Trabajos posteriores como [5], [6] y [7] proporcionaron también aportes significativos y fueron escritos con el mismo espíritu que los dos primeros. Material más reciente como [8], [1] y [2] presentan la morfología matemática en el contexto del procesamiento y análisis de imágenes y de la visión por computador; se muestra la morfología de una manera intuitiva y relativamente fácil de seguir, sin perder de vista los fundamentos matemáticos y haciendo énfasis en las aplicaciones.

El contexto actual del campo está influenciado por las aplicaciones. Como se menciona en [9], los operadores de la morfología matemática, y los algoritmos de procesamiento morfológico basados en ellos, tienen aplicación en áreas tan diversas del procesamiento de imágenes como el filtrado, la segmentación y el reconocimiento de patrones, tanto en imágenes binarias como en escala de gris. En adición al material teórico, existen varias herramientas de programación enfocadas en el procesamiento de imágenes que implementan muchos de los conceptos de la morfología matemática expuestos en los trabajos citados anteriormente. Particularmente podemos mencionar a *OpenCV* (*Open Source Computer Vision Library*: <http://opencv.org/>), una biblioteca de funciones de programación dirigida principalmente a tareas de visión por ordenador en tiempo real que posee soporte para morfología matemática a través de funciones que implementan los operadores básicos, y a *Olena* (<http://www.lrde.epita.fr/cgi-bin/twiki/view/olena>), una plataforma de software libre dedicada al procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones que cuenta con una biblioteca C++ genérica y eficiente llamada *Milena* la cual provee una gran cantidad de estructuras de datos y algoritmos para el procesamiento de imágenes y en especial en el campo de la morfología matemática. Como se expone en [10] hoy día también están disponibles varias aplicaciones y paquetes de software comercial y gratuito para el procesamiento y análisis de imágenes que cuentan, en mayor o menor medida, con soporte para las operaciones morfológicas básicas. Entre las aplicaciones gratuitas que allí se mencionan están *ImageJ* [11] e *Image Tool* (<http://compdent.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>).

La aplicación de filtros morfológicos en imágenes histológicas de cáncer con fines de realce y segmentación ha sido reportada en varias fuentes entre las que podemos citar a [12], [13] y [14].

1.3 Problema y Objetivos

Actualmente en la Universidad de Carabobo (UC) se encuentra en desarrollo el prototipo de *Caracterización de imágenes histológicas Cimahis* [15] para apoyar los a investigadores y médicos patólogos en el diagnóstico y pronóstico de cáncer de mama. Dada la relevancia de contar con soporte para la morfología matemática en un software de esta naturaleza, el objetivo de este trabajo es desarrollar e integrar al Cimahis una herramienta que implemente los principales operadores y algoritmos morfológicos (*filtros*) para imágenes en escala de gris. Tal herramienta tendrá utilidad práctica para varias tareas, eminentemente para hacer pre-procesamiento a fin de adecuar las imágenes para las etapas de segmentación y análisis.

2. Metodología

Este trabajo se llevó a cabo principalmente en el Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas de la Universidad de Carabobo (CIMBUC).

2.1 Materiales

Los recursos o materiales empleados en la construcción de la solución son esencialmente hardware y software. Para el hardware, un computador Lenovo H220/Intel Dual Core E5300 2.6GHz/2GB RAM DDR2 fue usado en el implementación y un computador HP Pavilion dv6 Notebook PC/Intel Core i7-2720QM 2.2GHz/8GB RAM DDR3 se usó en las pruebas. Respecto del software se necesitó integrar varias herramientas de programación cada una usada para cumplir con un requerimiento específico de la solución final. C++ fue usado como el lenguaje de programación base, el *Framework Qt* versión 4.8 (<http://qt-project.org/>) se usó para crear la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI en inglés), la biblioteca *OpenCV* versión 2.4.0 (<http://opencv.or/>) proporcionó parte de la funcionalidad y sirvió de base para la construcción del resto de la misma y la biblioteca de plantillas *TBB* 4.1 (<http://threadingbuildingblocks.org/>) se usó para la optimización en los cálculos. El desarrollo se hizo bajo el sistema operativo *Windows 7* y se empleó el IDE (*Ambiente de Desarrollo Integrado*, por sus siglas en inglés) *Qt Creator* versión 2.4.1, el cual permite el diseño y desarrollo de aplicaciones con Qt y C++, así como una fácil integración con software de terceras partes.

2.2 Descripción de los Métodos

El trabajo de investigación se completó en tres etapas. La primera (y más larga) etapa la constituyó un *estudio del estado del arte del problema*. Se estudiaron los fundamentos teóricos del procesamiento de imágenes y en especial de la morfología matemática. En esta parte la investigación, los libros de [1] y [2], en especial los capítulos referente a la morfología

matemática, sirvieron de marco teórico y fueron y frecuentemente revisados. Fue necesario estudiar la documentación de las herramientas de software empleadas (particularmente Qt, OpenCV y TBB) y hacer diversas pruebas en orden de familiarizarse y aprender a manejarlas efectivamente. La documentación base del prototipo Cimahis, la cual incluye guía de usuario y de programador, contenida en [15] también fue revisada.

Una vez comprendido el problema y sus requerimientos y teniendo el suficiente adiestramiento en las herramientas a usar, la siguiente etapa del trabajo la fue la *planificación y diseño de la solución*. Se optó por emplear *Feature Driven Development* o *FDD* [16] como metodología de desarrollo de software y en base a esta se definieron los artefactos de diseño que guiarían la etapa de desarrollo: se definió una *Lista de Funcionalidades*, un diagrama global de las clases y un cronograma tentativo para la fase de implementación. Dichos artefactos se discutieron y acordaron con los actores involucrados en el problema.

Finalmente, en una etapa de *Implementación y Prueba*, se llevaron a cabo las actividades planificadas en la etapa anterior. Se implementaron y probaron unitariamente cada una de las *funcionalidades* que conforman la herramienta de morfología. Durante esta etapa surgieron dos problemas de implementación no previstos inicialmente: primero, dado el contexto del prototipo Cimahis, la herramienta construida esta supuesta a operar sobre imágenes de microscopía de cortes de biopsias de tejido mamario coloreadas con H&E (Hematoxilina y Eosina). El propósito principal allí es simplificar las imágenes para facilitar la segmentación de los núcleos celulares. No obstante, debido a lo significativo de sus dimensiones (4000x3000 píxeles), los algoritmos morfológicos tempranos incurían en altos tiempos de cómputo. Aquí la integración de OpenCV con la biblioteca TBB fue fundamental ya que el aprovechamiento de las arquitecturas de procesadores paralelos generó un muy significativo aumento en el desempeño y por consiguiente disminución del tiempo de procesamiento. El segundo problema se debió a un *bug* presente en OpenCV desde versiones anteriores (<http://code.opencv.org/issues/2348>) que causa que para algunas configuraciones de los datos de entrada, las funciones de morfología matemática no generen los resultados esperados. La solución a esto fue crear “funciones envoltorio” (*wrapper functions*) alrededor de las funciones de OpenCV las cuales se encargan de adecuar los datos y evitar las situaciones de fallo.

La integración de la herramienta al prototipo Cimahis se hizo gradualmente durante el desarrollo de la misma. La herramienta entera quedó disponible como una funcionalidad accesible desde una entrada en la barra de menús y un acceso directo en la barra de herramientas del Cimahis. Al finalizar el desarrollo y la integración, se realizaron varias pruebas para validar el correcto funcionamiento de los operadores morfológicos y estimar su rendimiento.

Primero se hizo una validación *manual* de los resultados. Para este fin se creó un pequeño programa que toma una imagen y escribe en un archivo de texto los valores de píxeles de una región de interés especificada (habitualmente un cuadrado de 10x10 píxeles o menos). Utilizando este programa (luego de aplicar un operador sobre una imagen y guardar los resultados) se revisaron pixel a pixel varias secciones de la imagen resultado y junto con la definición teórica y los valores correspondientes de la imagen de entrada se comprobó la correctitud de cada operador morfológico implementado.

Seguido a esta validación parcial inicial, se llevaron a cabo varias pruebas en la que se cotejaron los resultados de la herramienta recién construida y los resultados del programa de procesamiento de imágenes ImageJ (abreviado *IJ*), el estándar en el análisis de imágenes científicas [17]. Particularmente se probaron los comandos de morfología matemática incorporados en *IJ* y dos plugins de morfología de *IJ*: *GrayMorphology plugin* (<http://rsbweb.nih.gov/ij/plugins/gray-morphology.html>) y *FastMorphology plugin* (http://imagejdocu.tudor.lu/doku.php?id=plugin:morphology:fast_morphological_filters:start). Se empezó escribiendo un programa que compara pixel a pixel dos imágenes (usando rutinas de OpenCV), y con este se hizo una verificación completa de las imágenes producidas por la herramienta midiéndolas con las producidas por *IJ*. Para automatizar parcialmente las pruebas se modificó (solo para efectos de la prueba) el código de la herramienta a fin de medir el tiempo de ejecución y permitir que cada filtro se aplicara no sobre una sino sobre un conjunto de imágenes. También se escribieron varios macros de *IJ* [18] para automatizar las tareas correspondientes en ese programa. En las pruebas se usó un conjunto de 38 imágenes histológicas de cáncer de mama en formato png, de 4000x3000 píxeles cada una. Se definieron varias configuraciones significativas de los parámetros asociados a los filtros morfológicos y se aplicó cada filtro implementado en la herramienta y su contraparte en *IJ* (si existía) sobre el conjunto de imágenes descrito. Para cada combinación de filtro y configuración de parámetros se calculó el tiempo promedio de ejecución sobre las 38 imágenes en ambos programas y luego se revisaron y compararon los datos obtenidos. Estas pruebas sirvieron para revalidar los correctitud de los operadores implementados y para tener elementos de juicio respecto de la eficiencia relativa de la herramienta.

3. Resultados

Se construyó una herramienta que, integrada al prototipo Cimahis, provee funcionalidades de filtrado morfológico para imágenes en escala de gris. La herramienta soporta los operadores básicos como *erosión*, *dilatación*, *opening* y *closing*, sus combinaciones como *gradiente morfológico*, *top-hat*, *bottom-hat*, *suavizado morfológico*, *opening propio* y *closing propio*

y adicionalmente dos operadores de reconstrucción morfológica: *reconstrucción por opening* y *reconstrucción por closing*.

Una muestra del efecto que produce cada filtro morfológico se aprecia la Fig. 1. En la primera columna se muestra el escudo de la UC en escala de gris; a continuación, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, aparecen los resultados cada filtro aplicado sobre la imagen. Se empleó un rectángulo de 3x3 con ancla en su centro para el operador gradiente morfológico y una elipse inscrita en un cuadrado de 9x9 para el resto de los filtros dado que esos dos *elementos estructurantes* produjeron resultados más evidentes a nivel visual.

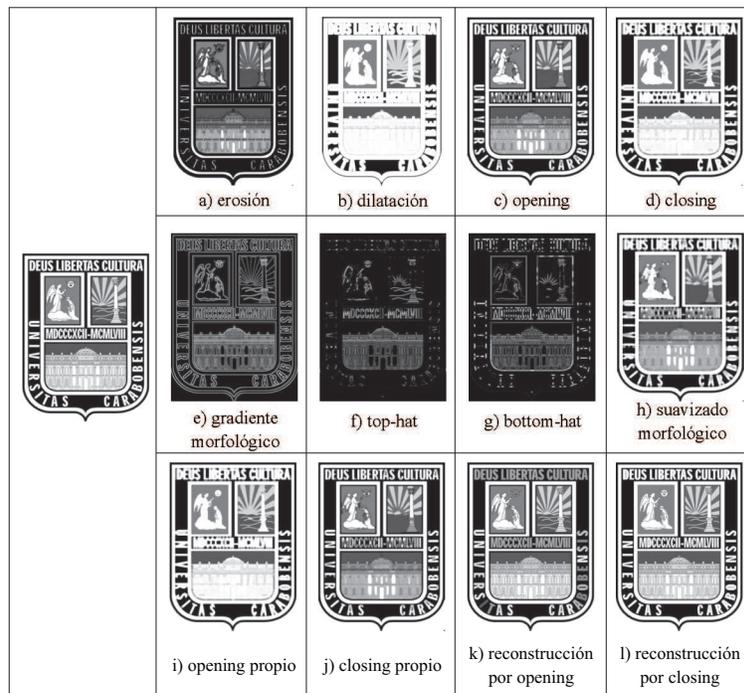


Fig. 1. Filtrado morfológico de la imagen del escudo de la UC. El escudo tiene forma rectangular, con punta en su base inferior. Compuesto de tres cuarteles; dos cuarteles superiores de igual tamaño y uno inferior de mayor despliegue. El cuartel izquierdo presenta la anunciación. El cuartel derecho, presenta una columna y como fondo a la columna aparece un sol y una pampa. En el cuartel inferior está la fachada de la vieja Universidad de Valencia

La erosión y la dilatación disminuyeron e incrementaron respectivamente el tamaño de los objetos más brillantes: la anunciación, el sol, la columna, las ventanas de la universidad, las letras y números y por consiguiente el brillo global de la imagen, mientras que el opening y el closing produjeron efectos

similares aunque menos agresivos. Opening removió pequeños detalles brillantes, dejando las regiones brillantes grandes relativamente sin cambios; como por ejemplo en las ventanas de la universidad. Closing produjo el mismo efecto para las zonas más oscuras. El gradiente morfológico enfatizó los bordes del escudo y de los objetos contenidos en él mientras removió el resto. La transformación top-hat realzó las áreas que fueron eliminadas o cuyo nivel de gris se redujo al aplicar opening y el bottom-hat hizo lo contrario para el closing. El suavizado morfológico, el opening y el closing propios produjeron efectos parecidos: eliminar detalles pequeños y difuminar los bordes de los objetos en la imagen (suavizar la imagen). Finalmente los resultados de las operaciones de reconstrucción morfológica son bastante parecidos a la imagen original (su objetivo es reconstruir). La mayoría de los objetos aparecen con el mismo tamaño y forma, pero con niveles de brillo diferentes, particularmente, intensidades menores o iguales a la original en el caso la reconstrucción por opening y mayores o iguales en el caso de la reconstrucción por closing.

3.1 Interfaz de Usuario

La interfaz gráfica de la herramienta consta de dos cuadros de dialogo, el primero (Fig. 2) es la *ventana principal* y permite al usuario aplicar los filtros morfológicos, mientras el segundo (Fig. 3) permite hacer la configuración de los parámetros asociados.

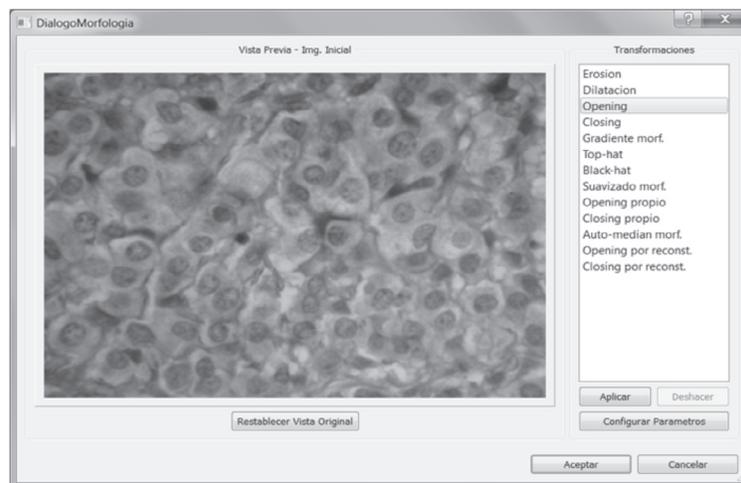
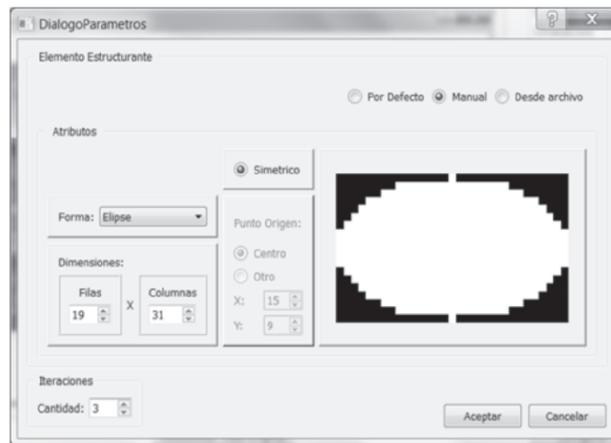
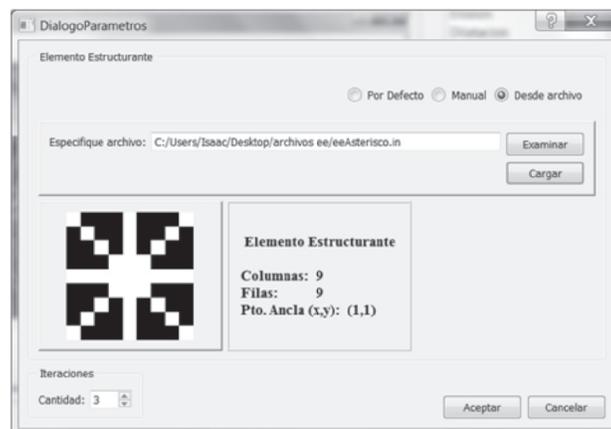


Fig. 2. Ventana principal de la herramienta. En el panel izquierdo se ve una imagen histológica de cáncer de mama en escala de gris. Los objetos elípticos con niveles de gris desiguales son núcleos de células, las regiones más oscuras son leucocitos y eritrocitos, el fondo más claro es el citoplasma; a lo largo de este se aprecian gran variedad de impurezas.

Como muestra la Fig. 2, la ventana principal de la herramienta es una caja de diálogo que presenta varios elementos gráficos: la lista de los filtros morfológicos disponibles (seleccionable al hacer click sobre ellos), la vista previa que muestra los resultados de los filtros o la imagen inicial, el botón 'Aplicar' que permite aplicar el filtro seleccionado sobre la imagen actual mostrada en la vista previa, el botón 'Deshacer' deshace la última operación realizada, el botón 'Restablecer Vista Original' deshace todas las operaciones y vuelve la vista a la imagen inicial y los botones 'Aceptar' y 'Cancelar' que permiten aceptar o rechazar respectivamente los resultados.



a) Manual



b) Desde archivo

Fig. 3. Dos vistas del diálogo de configuración de parámetros.

Para la configuración de los parámetros asociados a los operadores morfológicos se disponen de varias alternativas, como se aprecia en la Figura 3. Chequear el radio button 'manual' (arriba) habilita el establecimiento manual de los valores de cada atributo del elemento estructurante (forma, tamaño y punto ancla). Seleccionar 'Desde archivo' (abajo) permite especificar una ruta y cargar el elemento estructurante desde un archivo de texto. En ambos casos el número de iteraciones se establece usando el spin box de la parte inferior. La herramienta fue integrada al prototipo Cimahis como una funcionalidad accesible desde de la barra de menús y desde un acceso directo desde la barra de herramientas.

3.2 Pruebas

La Tabla 1 y la Tabla 2 resumen los resultados de las pruebas. Se usó el conjunto de 38 imágenes histológicas descrito en la Sección 2.2; cada casilla muestra el tiempo de ejecución promedio del correspondiente filtro morfológico sobre dicho conjunto. Se puede apreciar la diferencia de tiempos de cómputo entre la herramienta construida y su contraparte disponible en IJ.

	Prueba I		Prueba II	
	Herramienta/ Cimahis	ImageJ – Morf. Bin	Herramienta/ Cimahis	ImageJ – Morf. Gris
Erosión	0,067	2,034	1,638	1,666
Dilatación	0,073	2,29	1,479	1, 648
Opening	0,135	5,066	3,292	--
Closing	0,138	5,38	3,354	--
Gradiente	0,139	--	3,307	--
Top-Hat	0,142	--	3,323	--
Black-Hat	0,139	--	3,322	--
Suavizado Morfológico	0,268	--	6,521	--
Opening Propio	0,4	--	9,812	--
Closing Propio	0,404	--	9,843	--
Reconstrucción por Opening	18,604	--	174,33	--
Reconstrucción por Closing	17,608	--	135,566	--

Tabla 1. Comparación de los tiempos de ejecución (en segundos) de la morfología incorporada en IJ y la herramienta construida.

	Prueba III		Prueba IV	
	Herramienta/ Cimahis	Plugin GrayMorphology	Herramienta/ Cimahis	Plugin FastMorphology
Erosión	1,688	14,535	0,073	0,443
Dilatación	1,636	15,93	0,073	0,444
Opening	3,379	28,855	0,139	1,285
Closing	3,375	29,738	0,139	1,281
Gradiente	3,381	--	0,15	0,892
Top-Hat	3,369	--	0,144	1,298
Black-Hat	3,327	--	0,143	1,285
Suavizado Morfológico	6,693	--	0,276	--
Opening Propio	9,995	--	0,416	--
Closing Propio	10,129	--	0,411	--
Reconstrucción por Opening	151,401	--	8,208	--
Reconstrucción por Closing	150,608	--	9,586	--

Tabla 2. Comparación de los tiempos de ejecución (en segundos) de dos plugins de morfología de IJ y la herramienta construida.

Para la prueba I se usó un elemento estructurante de 3x3 y 30 iteraciones y para la prueba II se usó un círculo de radio 31 en medio de un rectángulo de 150x150 píxeles. Por su parte, se empleó un círculo de radio 31 para la prueba III y rectángulo de 63x63 como elemento estructurante para la prueba IV. Los parámetros (forma y tamaño del elemento estructurante y el número de iteraciones) se seleccionaron a fin de someter a ambos programas a pruebas que implicasen una cantidad significativa de operaciones y por tanto alto consumo de tiempo de CPU.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos son elocuentes y cónsonos con el objetivo de este trabajo. En primer lugar, en la Figura 1 se puede ver que la herramienta proporciona una variedad significativa de filtros morfológicos cuyos efectos sobre la imagen son consistentes con la definición teórica presentada en [1].

La Tabla 1 y la Tabla 2 presentan los resultados más evidentes y de mayor valor agregado al trabajo. La comparación de los tiempos de ejecución de ambos programas y la cantidad de casillas vacías (“--”) en las columnas correspondiente a ImageJ, deja de manifiesto que se ha construido e incorporado al Cimahis una herramienta de morfología matemática que excede en funcionalidades y eficiencia a otras herramientas disponibles. De particular importancia, dados los

propósitos de segmentación y caracterización de imágenes del prototipo Cimahis, son los operadores de reconstrucción por opening y reconstrucción por closing [14].

La herramienta también cuenta con una interfaz de usuario sencilla y fácil de usar que permite aplicar en secuencia cualquier cantidad de filtros, deshacer y visualizan los resultados. Particularmente destacable es la flexibilidad en la configuración de los parámetros asociados a los operadores morfológicos. Como da muestra la Figura 3, la herramienta además de permitir al usuario establecer el tamaño y seleccionar la forma del elemento estructurante entre varias formas predefinidas, permite que este sea especificado desde un archivo de texto, habilitando así trabajar con elementos estructurantes de formas y tamaños arbitrarios.

Aunado a esta discusión, está el hecho (evidente por los datos de la Tabla 1) de que, debido a que una imagen binaria es también una imagen en escala de gris y que los operadores morfológicos en escala de gris son una generalización de sus contrapartes binarias, todos los filtros morfológicos de la herramienta pueden aplicarse también sobre imágenes binarias.

Para finalizar hay que citar como un aspecto negativo el hecho de que la herramienta no está implementada como un plugin. Esto se debe principalmente a algunos *bugs* de funcionamiento y deficiencias de diseño en la arquitectura actual del prototipo Cimahis los cuales hacen, por ahora, inconveniente el uso efectivo de plugins. Así, para integrar la herramienta es necesario recompilar todo el prototipo..

5. Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto Caracterización de neoplasias malignas epiteliales en tejido mamario aplicando herramientas basadas en textura, color y forma a imágenes de cortes histológicos, con el financiamiento del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo CDCH (proyecto 2010-002) y con el apoyo del Centro de Investigaciones Médicas y Biotecnológicas de la Universidad de Carabobo.

Referencias

- [1] R. González & R. Woods. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 3 edition, 2007.

- [2] M. Sonka, V. Hlavac & R. Boyle. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. Thomson Learning, Toronto, 3 edition, 2008.
- [3] G. Matheron. *Éléments pour une théorie des milieux poreux*. Masson, Paris, 1967.
- [4] J. Serra. *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, Londres, 1982.
- [5] P. Maragos & R. Schafer. Morphological Filters – Part I: Theirs set-theoretic analysis and relations to linear shift-invariant filters. *IEEE Transactions on Acustics, Speech and Signal Processing*, 35(8): 1153-1169, 1987.
- [6] P. Maragos & R. Schafer. Morphological Filters – Part II: Theirs relation to median, order-static, and stack filters. *IEEE Transactions on Acustics, Speech and Signal Processing*, 35(8): 1170-1184, 1987.
- [7] C. R. Giardina & E. R. Dougherty. *Morphological Methods in Image and Signal Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1988.
- [8] P. Soille. *Morphological Image Analysis*. Springer-Verlag, Berlin, 2 edition, 2003.
- [9] R.A. Lotufo, A. Romaric, A.V. Saúde & R.C. Machado. Morphological Image Processing. En Q. Wu, F. Merchant & K. Castleman. *Microscope Image Processing*, capítulo 8, paginas 112-157. Elsevier, Burlington, MA, 2008.
- [10] J. Pertusa. Programas de análisis de imagen. En *Técnicas de análisis de imagen: Aplicaciones en biología*, capítulo 12, paginas 265-313. Universidad de Valencia, Valencia, 2003.
- [11] W. Rasband. *ImageJ*. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 1997-2012. URL <http://imagej.nih.gov/ij/>
- [12] J. Thiran & B. Macq. Morphological Feature Extraction for the Classification of Digital Images of Cancerous Tissues. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 43(10): 1011-1020, 1996.
- [13] C. Demir & B. Yener. *Automated cancer diagnosis bases on histopathological images: a systematic survey*. Departament of Computer Science, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 2005.

- [14] P. Huang & Y. Lai. Effective segmentation and classification for HCC biopsy images. *Pattern Recognition*, 43(4): 1550-1563, 2009, doi: 10.1016/j.patcog.2009.10.014
- [15] J. Hernández. Desarrollo de un prototipo para la experimentación de métodos de caracterización y diagnóstico en imágenes de cortes histológicos de lesiones mamarias. Tesis de Licenciatura, Departamento de Computación, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2011.
- [16] L. Calabria. *Metodología FDD*. Facultad de Ingeniería de la Universidad ORT, Montevideo, 2003. URL <http://fi.ort.edu.uy/innovaportal/file/2021/1/metodologiafdd.pdf>
- [17] T. Ferreira & W. Rasband. *ImageJ User Guide: IJ 1.46r*, 2012. URL <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/>
- [18] J. Mutterer & W. Rasband. *ImageJ Macro Language: Programmer's Reference Guide v1.46d*, 2012. URL http://imagej.nih.gov/ij/docs/macro_reference_guide.pdf