

Fuzzy Mathematical Morphology Toolbox and Graphical Interface

A. Bouchet, D. S. Comas, J. I. Pastore, M. Brun and V. L. Ballarin

Abstract— The task of solving problems using Digital Image Processing requires of the choice of the correct methodology for the issues to be tackled, and a sound selection of parameters for each algorithm to be used. Fuzzy Mathematical Morphology is one of the existing techniques for image processing, being already applied with success on several problems of medical images analysis. However, the selection and use of its operators requires of the continual observation of the results, over a varied range of parameters, for the selection of the optimal ones. Toward that goal, in this work we develop a library of Fuzzy Mathematical Morphology operators, plus a flexible graphical interface, which is of great help in the selection of the optimal parameters and the implementation of Fuzzy operators, with the addition of several classical Image Processing operators. We describe the properties of the library and analyze the simplicity of the graphical interface.

Keywords— Fuzzy Mathematical Morphology, Digital Image Processing, Graphical User Interface.

I. INTRODUCCIÓN

EL Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) consiste en la manipulación de los datos contenidos en una imagen digital con el fin de llegar a la solución de una determinada problemática [1]. La resolución de problemas en el PDI puede abordarse con el uso de diferentes enfoques [1-3], cada uno brinda un amplio conjunto de herramientas para el procesamiento de imágenes. La metodología de procesamiento y el conjunto de técnicas que se definan para la resolución de un problema específico dependerá principalmente del tipo de imágenes que se dispongan y de la naturaleza del problema.

La Morfología Matemática (MM) es una teoría basada en conceptos de geometría, álgebra, topología y teoría de conjuntos, y fue creada para caracterizar propiedades físicas y estructurales de diversos materiales [4, 5]. La MM se basa en examinar las estructuras geométricas de una imagen por superposición con pequeños patrones denominados elementos estructurantes (EE). En la actualidad, la MM se ha convertido en una sólida teoría y brinda un amplio conjunto de herramientas para el PDI que permite procesar imágenes con el objetivo de realzar zonas, detectar bordes, analizar

estructuras, filtrar y segmentar imágenes, es decir identificar objetos de determinadas características; la implementación de sus algoritmos tiene bajo costo computacional y ha sido aplicada con éxito para el procesamiento de imágenes [6-9]. Existen diferentes métodos para extender las técnicas de la MM, definidas para imágenes binarias, a imágenes en niveles de gris. Una de las extensiones existentes se basa en la aplicación de la teoría de conjuntos difusos y se denomina Morfología Matemática Difusa (MMD) [10]. La MMD ha demostrado ser una sólida teoría y, mediante su aplicación, se han logrado buenos resultados en el procesamiento y segmentación de estructuras en imágenes con alto contenido de textura [11-13].

La MMD permite la definición de un amplio conjunto de operadores. Para la aplicación de cada uno de éstos, es necesario el ajuste de un amplio conjunto de parámetros y este proceso constituye una tarea no trivial que a menudo requiere un amplio número de pruebas, en las cuales deben definirse los parámetros de cada una de las técnicas y ajustarse para obtener una solución adecuada al problema planteado, realizando en cada momento una evaluación de los resultados obtenidos. Si bien existen numerosas librerías y diversas aplicaciones con interfaz gráfica de usuario para el PDI a nivel científico [14-16], no ha sido desarrollado e implementado un conjunto de herramientas que permita el uso de los operadores de la MMD y su completa parametrización. Por lo tanto, resulta necesario contar con la implementación de una librería para la aplicación de los operadores morfológicos difusos, que han demostrado ser más eficientes que los métodos tradicionales en el procesamiento de imágenes en niveles de gris. Es deseable también contar con una interfaz gráfica que haga uso de esta librería, facilite la aplicación de los operadores asistiendo en su configuración y permitiendo la continua visualización de resultados previos para el desarrollo de algoritmos en la resolución de problemas del PDI con MMD.

En este trabajo se presenta la implementación de una librería de Morfología Matemática Difusa para el procesamiento de imágenes en lenguaje Matlab® incluyendo operadores de la Morfología Matemática Compensatoria (MMC) [17, 18]. Además, se diseña e implementa una interfaz gráfica de usuario que permite la completa parametrización de cada uno de los operadores morfológicos difusos y la visualización de resultados previos para la resolución de problemas del PDI con MMD. Se definen los operadores de la MMD y la MMC. Se incluyen, en el entorno desarrollado, herramientas generales del PDI y de la MM que complementan el uso del software para el procesamiento de imágenes. Se analizan las principales características del software

A. Bouchet, CONICET - Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina, abouchet@fi.mdp.edu.ar

D. S. Comas, CONICET - Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina, diego.comas@fi.mdp.edu.ar

J. I. Pastore, CONICET - Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina, jpastore@fi.mdp.edu.ar

M. Brun, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina, mbrun@fi.mdp.edu.ar

V. L. Ballarin, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina, vballari@fi.mdp.edu.ar

desarrollado y su facilidad de uso.

II. MORFOLOGÍA MATEMÁTICA

La MM fue creada para caracterizar propiedades físicas y estructurales de diversos materiales y es una teoría basada en conceptos de geometría, álgebra y teoría de conjuntos [4, 5].

La MM estudia las estructuras geométricas de las componentes presentes en las imágenes. Esta teoría permite analizar la forma, tamaño, orientación y superposición de objetos presentes en una imagen digital. La clave de esta metodología está en el elemento estructurante (EE), un conjunto completamente definido y de geometría conocida, que es comparado con la imagen a partir de traslaciones. La forma y tamaño del EE permiten testear y cuantificar de qué manera dicho elemento está o no contenido en la imagen [19]. Una de las ventajas de la MM es su simplicidad de implementación. A partir de sus operaciones básicas, erosión y dilatación, es posible, por composición, construir nuevos operadores.

Los objetivos principales de la MM son:

- Extraer informaciones relativas a la topología y geometría de los conjuntos dentro de las imágenes.
- Comparar un conjunto a caracterizar con una familia de conjuntos conocidos (EE).
- Cuantificar la noción de “estar contenido”.
- Transformar las imágenes en otras imágenes más fáciles de ser manipuladas e interpretadas.

La MM permite el filtrado, la eliminación de ruido, la eliminación de objetos, la detección de bordes, la caracterización de texturas para tareas posteriores de reconocimiento de patrones, y otras operaciones esenciales de imágenes. Estas técnicas se han aplicado con éxito a un gran número de problemas de procesamiento de imágenes [6, 7, 9, 19-21]. Sin embargo, la MM no brinda herramientas adecuadas para el procesamiento de imágenes con alto grado de imprecisión en sus componentes estructurales. A partir de la MM binaria se han presentado diferentes extensiones para imágenes en niveles de gris. En particular, la teoría de conjuntos difusos brinda herramientas adecuadas para obtener grados de inclusión y de intersección al modelar las imágenes en niveles de gris como conjuntos difusos, y permite la extensión de los operadores básicos de la MM a imágenes en niveles de gris definiendo la MMD. La MMD se ha aplicado con éxito en la segmentación de imágenes médicas [10, 12, 13]. En las secciones siguientes se definirán los operadores de la MM y de la MMD.

III. OPERADORES DE LA MORFOLOGÍA MATEMÁTICA

Una imagen binaria toma dos valores 0 o 1, los cuales representan el negro (fondo) y el blanco (objeto), respectivamente. Una imagen binaria se puede representar como un subconjunto de \mathbb{R}^2 .

Sean A y B dos subconjuntos de \mathbb{R}^2 . La dilatación binaria de A por el EE B , denotada $\delta(A, B)$, es el conjunto

de puntos $x \in \mathbb{R}^2$ tal que \hat{B}_x tiene intersección no vacía con A [4, 5]:

$$\delta(A, B) = \{x \in \mathbb{R}^2 / \hat{B}_x \cap A \neq \emptyset\} \quad (1)$$

donde $\hat{B}_x = \{-b + x / b \in B\}$ representa el desplazamiento del EE, espejado, sobre la imagen original. Dilatar la imagen A por el EE B consiste en eliminar del fondo todos los puntos x para los cuales el conjunto \hat{B}_x no está incluido, o de forma equivalente asignar a la imagen dilatada todos los puntos x tales que \hat{B}_x intercepte a la imagen.

La erosión binaria de A por un EE B , denotada por $\varepsilon(A, B)$, es el conjunto de puntos $x \in \mathbb{R}^2$ tal que el conjunto B_x está contenido en el conjunto A [4, 5], formalmente:

$$\varepsilon(A, B) = \{x \in \mathbb{R}^2 / B_x \subseteq A\} \quad (2)$$

donde $B_x = \{b + x / b \in B\}$ representa el desplazamiento del EE sobre la imagen original. Erosionar la imagen A por el EE B consiste en hacer decrecer al conjunto A a través de un proceso de eliminación de elementos, tomando como referencia al EE B .

El tamaño y forma final del conjunto dilatado o erosionado dependerá fuertemente del tamaño y forma del EE [19].

Por la combinación de las dos operaciones básicas de erosión y dilatación se obtienen los filtros morfológicos básicos de apertura y cierre los cuales se definen a continuación.

La apertura binaria de A por el EE B se define como la erosión de A por el EE B , seguida de la dilatación de dicho resultado con el EE [4, 5]:

$$\gamma(A, B) = \delta(\varepsilon(A, B), B) \quad (3)$$

Esta operación elimina conexiones entre objetos de menor tamaño que el EE. La apertura mantiene en gran medida el tamaño original de los objetos debido a la aplicación de la dilatación final.

El cierre binario de A por el EE B se define como la dilatación de A por el EE B , seguida de la erosión de dicho resultado a través del EE [4, 5]:

$$\phi(A, B) = \varepsilon(\delta(A, B), B) \quad (4)$$

Esta operación tiende a alisar porciones de contornos, rellenando zonas más pequeñas que el tamaño del EE. El cierre mantiene en gran medida el tamaño original de los objetos de la imagen debido a la erosión final.

El tamaño y forma del EE que se utilice, tanto en la apertura como en el cierre, tiene fundamental importancia ya que de esto dependerán las estructuras de la imagen que se lleguen a eliminar.

Los filtros básicos de apertura y de cierre pueden combinarse y aplicarse en forma sucesiva con EE crecientes, dando lugar a los filtros secuenciales alternados (ASFs del inglés *Alternating Sequential Filters*) [4, 5]. Formalmente pueden definirse como sigue:

El filtro secuencial “OC” (*opening-closing*) de n iteraciones:

$$nb - \gamma\phi(f) = \gamma_{nb}(\phi_{nb}(\dots\gamma_b(\phi_b(f)))) \quad (5)$$

El filtro secuencial “CO” (*closing-opening*) de n iteraciones:

$$nb - \phi\gamma(f) = \phi_{nb}(\gamma_{nb}(\dots\phi_b(\gamma_b(f)))) \quad (6)$$

donde $n \in \mathbb{N}$ y nb representa:

$$nb = \underbrace{\delta_b(\delta_b(\dots(\delta_b(b))))}_{(n-1) \text{ veces}} \quad (7)$$

Los ASFs permiten homogeneizar regiones de la imagen, eliminando estructuras que no son de interés.

El gradiente por dilatación de la imagen A por el EE B se define [4, 5]:

$$\Gamma_D(A, B) = \delta(A, B) - A \quad (8)$$

El gradiente por erosión de la imagen A por el EE B se define [4, 5]:

$$\Gamma_E(A, B) = A - \varepsilon(A, B) \quad (9)$$

El gradiente generalizado de la imagen A por el EE B se define [4, 5]:

$$\Gamma_{D,E}(A, B) = \delta(A, B) - \varepsilon(A, B) \quad (10)$$

La dilatación condicionada de Z condicionada a A por el EE B puede definirse como [1]:

$$\delta_{CA}(Z, B) = \delta(Z, B) \cap A \quad (11)$$

donde $Z \subset \mathbb{R}^2$ se conoce como marcador y A como máscara. La aplicación de la dilatación condicionada en forma repetitiva hasta la idempotencia constituye el proceso conocido como reconstrucción [1]:

$$\rho_A(Z, B) = \lim_{n \rightarrow \infty} \underbrace{\delta_{CA}(\dots\delta_{CA}(\delta_{CA}(Z, B), B))}_{n \text{ veces}} \quad (12)$$

La reconstrucción permite obtener todas las componentes conectadas de la imagen A relativas al marcador Z .

Para la extensión de los operadores de la MM a imágenes en escala de gris se considera a la imagen y al EE como funciones definidas sobre los dominios $D_f \subset \mathbb{R}^2$ y $D_g \subset \mathbb{R}^2$ respectivamente. Por lo tanto, una imagen en niveles de gris se define como una función $f : D_f \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, 255]$. Sean f y g dos imágenes en niveles de gris, con dominio D_f y D_g respectivamente, las principales operaciones de la MM en niveles de gris se definen de la siguiente manera [4, 5]:

La dilatación de la imagen f por el EE g es definida por:

$$\delta(f, g)_{(s,t)} = \max_{(s-x, t-y) \in D_f; (x,y) \in D_g} \{f(s-x, t-y) + g(x, y)\} \quad (13)$$

La erosión de la imagen en niveles de gris f por el EE g es definida por:

$$\varepsilon(f, g)_{(s,t)} = \min_{(s+x, t+y) \in D_f; (x,y) \in D_g} \{f(s+x, t+y) - g(x, y)\} \quad (14)$$

Si el EE es plano, es decir, $g(x, y) = 0 \forall (x, y) \in D_g$, la erosión y la dilatación se simplifican de la siguiente manera:

$$\delta(f, g)_{(s,t)} = \max_{(s-x, t-y) \in D_f; (x,y) \in D_g} \{f(s-x, t-y)\} \quad (15)$$

$$\varepsilon(f, g)_{(s,t)} = \min_{(s+x, t+y) \in D_f; (x,y) \in D_g} \{f(s+x, t+y)\} \quad (16)$$

La apertura morfológica de una imagen en niveles de gris f por el EE g es definida por:

$$\gamma(f, g) = \delta(\varepsilon(f, g), g) \quad (17)$$

La apertura es de utilidad para eliminar detalles luminosos pequeños en relación al EE, quedando el resto de la imagen relativamente sin modificaciones.

El cierre morfológico de una imagen en niveles de gris f por el EE g es definido por:

$$\phi(f, g) = \varepsilon(\delta(f, g), g) \quad (18)$$

El cierre es de utilidad para eliminar detalles oscuros pequeños en relación al EE, quedando el resto de la imagen relativamente sin modificaciones.

Dentro de la MM una técnica de segmentación de imágenes sumamente útil es la transformada Top-Hat, la cual permite eliminar determinados elementos de la imagen original, despreciando las regiones que no son de interés. Ésta se define de la siguiente manera:

$$\rho_{cierre}(f, g) = \phi(f, g) - f \quad (19)$$

$$\rho_{apertura}(f, g) = f - \gamma(f, g) \quad (20)$$

IV. OPERADORES DE LA MORFOLOGÍA MATEMÁTICA DIFUSA

La MMD extiende la MM a imágenes en niveles de gris aplicando la teoría de conjuntos difusos. Las operaciones entre conjuntos difusos se definen a partir de la conjunción y la disyunción entre los valores de las funciones de pertenencia de dichos conjuntos [22]. Los valores de las funciones de pertenencia son números en $[0, 1]$. Como generalmente en las imágenes en niveles de gris el valor de intensidad de gris es un número perteneciente al intervalo natural $[0, 255]$, para estar en condiciones de aplicar los operadores de la MMD, las imágenes en niveles de gris deben modelarse como conjuntos difusos, llevando la escala grises al rango $[0, 1]$. A este proceso de cambio de escala se lo denomina “fuzzificación”, mientras que al proceso inverso “desfuzzificación”. Para el desarrollo de este trabajo la función de fuzzificación $g : \{0, 1, 2, \dots, 255\} \rightarrow [0, 1]$ se define como sigue:

$$g(x) = \frac{x}{255} \quad (21)$$

El proceso inverso mediante el cual las intensidades de los niveles de gris de una imagen, pertenecientes al intervalo $[0, 1]$, son llevados al conjunto $\{0, 1, 2, \dots, 255\}$ se define a partir de la función $h : [0, 1] \rightarrow \{0, 1, 2, \dots, 255\}$ dada por:

$$h(x) = [255 \cdot x] \quad (22)$$

donde $[.] : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{Z}$ representa la función parte entera, es decir:

$$[a] = \sup\{k \in \mathbb{Z} / k \leq a\} \quad (23)$$

Este proceso modela a la imagen en niveles de gris como un conjunto difuso permitiendo, de esta manera, aplicar sobre imágenes en niveles de gris la teoría de conjuntos difusos.

En lo que sigue μ y ν denotarán dos conjuntos difusos, con funciones de pertenencia $\mu : U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, 1]$ y $\nu : U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, 1]$, donde el primero corresponde a una imagen en niveles de gris y el segundo corresponde al EE. Las funciones de pertenencia son obtenidas mediante la aplicación de la función de fuzzificación sobre cada una de las imágenes en escala de gris. Bajo estas consideraciones, la definición de

las operaciones básicas de la MMD es la siguiente [10, 12]:

La dilatación difusa de la imagen μ por el EE ν :

$$\delta(\mu, \nu)(x) = \sup_{y \in U} [t(\mu(y), \nu(y-x))] \quad (24)$$

donde $t(a, b)$ es una t-norma [22, 23].

La erosión difusa de la imagen μ por el EE ν :

$$\varepsilon(\mu, \nu)(x) = \inf_{y \in U} [s(\mu(y), c(\nu(y-x)))] \quad (25)$$

donde $s(a, b)$ es una s-norma y $c(a)$ es el complemento difuso [22, 23].

La apertura difusa de μ por ν está dada por:

$$\gamma(\mu, \nu) = \delta(\varepsilon(\mu, \nu), \nu) \quad (26)$$

El cierre difuso de μ por ν está dada por:

$$\phi(\mu, \nu) = \varepsilon(\delta(\mu, \nu), \nu) \quad (27)$$

Como puede observarse las definiciones para la apertura y el cierre difusos dadas en las ecuaciones (26) y (27) son equivalentes a las definiciones de la apertura y el cierre clásicos dados en (3) y (4) respectivamente, sustituyendo la erosión y la dilatación por sus definiciones difusas equivalentes. De forma análoga, el resto de los operadores de la MMD pueden derivarse de las definiciones clásicas dadas, sustituyendo las operaciones básicas por las operaciones difusas equivalentes. Para una mayor profundización sobre los operadores de la MMD pueden consultarse [10-12, 24, 25].

V. OPERADORES DE LA MORFOLOGÍA MATEMÁTICA COMPENSATORIA

En esta sección se presenta una Morfología Matemática denominada Morfología Matemática Compensatoria (MMC) introducida recientemente en la literatura por los autores [17, 18]. Dicha morfología es un caso particular de la MMD ya que surge de reemplazar la t-norma y la s-norma usadas en las definiciones de dilatación y erosión difusas por la conjunción y la disyunción de la Lógica Difusa Compensatoria (LDC). Esto es posible dado que la t-norma y la s-norma son una conjunción y una disyunción, respectivamente, con restricciones adicionales.

Por lo tanto, sustituyendo la t-norma y la s-norma por la conjunción y la disyunción de la LDC, respectivamente, se obtienen los operadores dilatación y erosión de la MMC:

$$\delta(\mu, \nu)(x) = \sup_{y \in U} [C(\mu(y), \nu(y-x))] \quad (28)$$

$$\varepsilon(\mu, \nu)(x) = \inf_{y \in U} [D(\mu(y), c(\nu(y-x)))] \quad (29)$$

Dichos operadores son denominados dilatación compensatoria y erosión compensatoria, respectivamente. A partir de estos operadores se pueden definir otros más complejos como, por ejemplo, la apertura y el cierre compensatorios al igual que se realizó en la sección anterior.

VI. PARÁMETROS DE LOS OPERADORES QUE CONFORMAN LA LIBRERÍA

Para la aplicación de los operadores de la MMD y de la MMC introducidos en las secciones IV y V, no sólo debe definirse el EE a utilizar sino también la t-norma o s-norma para la MMD y la conjunción o disyunción compensatoria para la MMC. La especificación de una determinada t-norma o s-norma da lugar a un determinado conjunto de operadores de la MMD. De la misma manera, la utilización de una determinada lógica compensatoria define un nuevo conjunto de operadores de la MMC. Cada uno de estos operadores son adecuados para el procesamiento de un tipo de imagen particular y los operadores utilizados para la resolución de un determinado problema del PDI deben por lo general ser redefinidos o ajustados ante una nueva problemática [13, 25]. Debido a esto, se consideró que la librería de MMD a diseñar debía incluir todos los operadores morfológicos definidos por la MMD y la MMC (erosión, dilatación, apertura, cierre, filtros secuenciales alternados, top-Hat y gradiente) y debería permitir una completa parametrización de cada una de las técnicas, de modo de constituir para el usuario un conjunto de herramientas completo para el PDI con operadores difusos. El usuario debería poder especificar para cada uno de los operadores: forma y tamaño del EE, t-norma o s-norma a utilizar para MMD, la lógica compensatoria a utilizar para la MMC y cantidad de iteraciones. Además deberían incluirse parámetros por defecto para la totalidad de las técnicas implementadas.

El diseño de la interfaz gráfica se realizó tomando en consideración las características de la librería de MMD desarrollada. Entre los principales requerimientos de la interfaz gráfica de usuario se encuentran:

- Incorporar la totalidad de los operadores de la MMD incluidos en la librería desarrollada.
- Definir la norma o la lógica compensatoria y el EE a utilizar.
- Incorporar parámetros por defecto en la totalidad de operaciones, facilitando la rápida implementación.
- Visualizar un resultado preliminar que facilite el ajuste de los parámetros.
- Incluir técnicas complementarias del PDI tales como herramientas de pre-procesamiento, operaciones lógicas y algebraicas, umbralamiento, filtrado, transformaciones geométricas, etc. [1], que permitan al usuario realizar todo el PDI que requiera el problema en la interfaz diseñada.

La librería fue desarrollada íntegramente en MatLab® R2008a. Esto permite aprovechar la gran eficiencia de este lenguaje para operaciones relacionadas con el manejo de matrices, tipo de datos común en procesamiento de imágenes y, por otro lado, permite el uso de la librería y la consulta de su documentación en un lenguaje de uso común para la mayoría de los investigadores del área. Para el diseño de la interfaz gráfica de usuario se desarrolló con la herramienta GUIDE incluida en MatLab®.

VII. IMPLEMENTACIÓN

En la Fig. 1, puede observarse la ventana principal de la interfaz gráfica diseñada para el uso de la librería de MMD desarrollada. En ésta, se visualizan las imágenes cargadas y se eligen qué algoritmos aplicar y con qué parámetros. Las técnicas implementadas fueron divididas en 5 grupos, asociado cada uno de ellos a un menú en la ventana principal. El primero de ellos corresponde a las operaciones lógicas y aritméticas, que incluyen la suma, resta, multiplicación y un conjunto de operaciones lógicas para imágenes binarias. En otro menú se encuentran operaciones como el negativo, extracción del marco de la imagen para tareas de reconstrucción, umbralamiento y la superposición de una imagen binaria con otra imagen del mismo tamaño. Esto último permite destacar puntos detectados mediante algún algoritmo de segmentación y compararlo simultáneamente con la imagen original. Los otros tres grupos de operaciones corresponden a las herramientas de MM, tanto para imágenes binarias como imágenes en niveles de gris, y MMD en el que se incluyen además los operadores de la MMC.

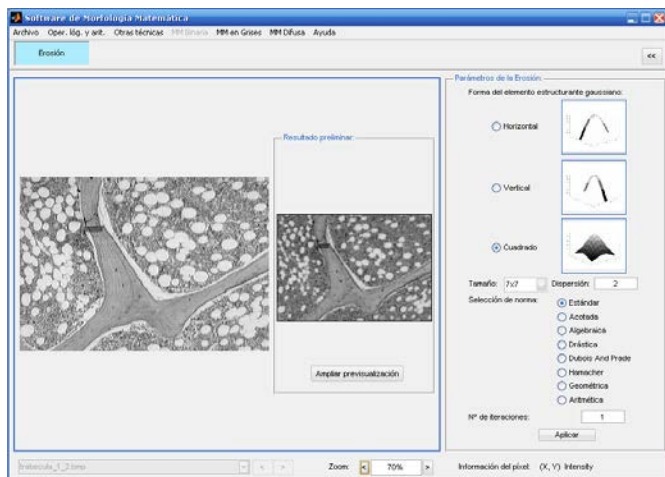


Figura 1. Ventana principal de la interface gráfica desarrollada donde se aplica una erosión difusa a una biopsia de médula ósea.

Para la aplicación de los operadores de la MMD, se debe realizar el siguiente procedimiento: 1) Se elige la técnica específica a aplicar (erosión, dilatación, apertura, cierre, top-Hat, filtros secuenciales, o gradiente); 2) Para las operaciones de top-Hat, filtros secuenciales, o gradiente debe especificarse adicionalmente el tipo específico de operación; 3) En el panel de parametrización de la técnica específica (Fig. 2) se define la forma del EE, su tamaño y dispersión (la librería utiliza EE gaussianos), el tipo de operación a utilizar (se implementaron las normas: estándar, acotada, algebraica, drástica, de Dubois and Prade, Hamacher [26] y la lógica compensatoria basada en la media geométrica y la basada en la media aritmética [27]) y finalmente, el número de iteraciones del operador. El botón "Previsualizar" permite ver un resultado preliminar de la imagen procesada bajo los parámetros especificados. El botón "Aplicar" permite generar una nueva imagen con la imagen procesada que puede ser almacenada y/o usada para continuar con alguna otra técnica de procesamiento.

La interfaz incorpora herramientas de zoom e información relacionada con la intensidad de los píxeles de la imagen. En cada uno de los algoritmos se incluyen parámetros por defecto. Cada una de las imágenes resultantes de las operaciones se numera en secuencia y se nombra indicando la técnica que fue aplicada para obtenerla, de esta manera se facilita la elaboración de una secuencia de procesamiento que permita automatizar la solución al problema planteado. Para aquellas operaciones en las que intervienen 2 imágenes, por ejemplo suma, resta, reconstrucción morfológica, etc., se permite una selección visual de cada una de ellas y también una vista preliminar del resultado de la operación.

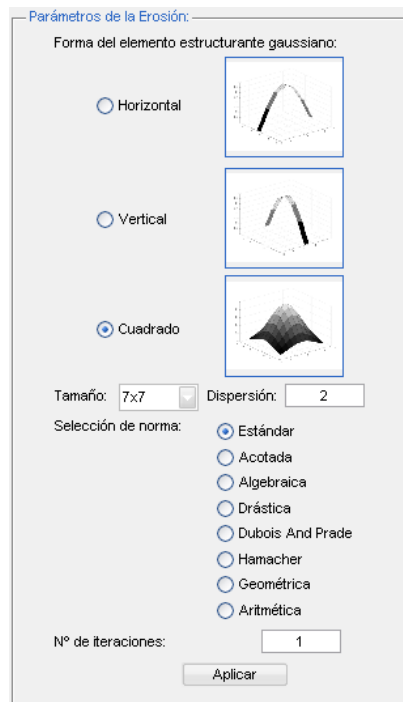


Figura 2. Panel de selección de parámetros para la MMD.

VIII. EJEMPLO DE APLICACIÓN

La librería de MMD creada y desarrollada fue aplicada, haciendo uso de la interfaz gráfica diseñada, para la resolución de problemas de segmentación de imágenes con MMD. Se analizaron las facilidades de parametrización que brinda la librería para la selección y ajuste de cada uno de los operadores morfológicos que se incluyen en ella. Se analizaron además, las características generales de la interfaz gráfica propuesta.

A modo de ejemplo, en este trabajo se muestra una aplicación específica en imágenes de angiografías retinales. Para las angiografías retinales se realizó la segmentación de los vasos sanguíneos utilizando MMD, siguiendo los pasos sugeridos en el artículo "Morfología Matemática Difusa aplicada a la segmentación de angiografías retinales" [12]. Un ejemplo del procesamiento en el sistema desarrollado se muestra en la Fig. 3.

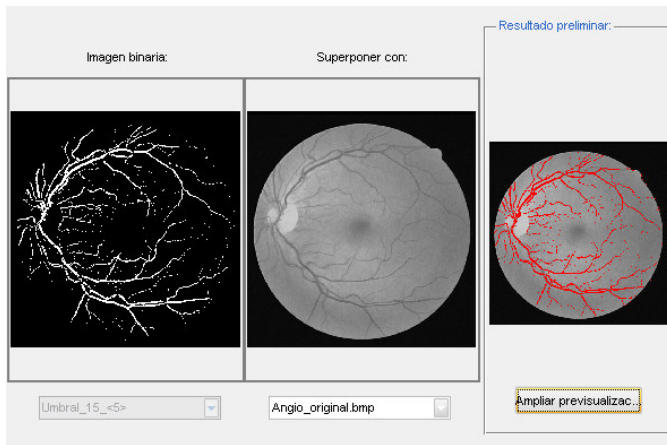


Figura. 3. Imágenes original y segmentación de los vasos sanguíneos para una angiografía retinal.

IX. CONCLUSIONES

Se creó y desarrolló una librería para el procesamiento de imágenes con Morfología Matemática Difusa.

Dado que la resolución de un problema, con esta metodología, requiere el ajuste de parámetros en cada uno de los algoritmos utilizados, se desarrolló un entorno gráfico que implementa dicha librería para facilitar el uso y parametrización de cada una de las técnicas. Además, se incorporaron operadores de la MM y otras técnicas generales del PDI para ampliar el campo de aplicación de la interfaz gráfica desarrollada.

Para cada una de las técnicas se muestran en la interfaz gráfica resultados preliminares que facilitan la búsqueda de un conjunto de algoritmos y de parámetros de procesamiento óptimo. La incorporación de un amplio conjunto de técnicas de PDI permite la completa resolución de diferentes problemáticas en el sistema implementado.

El conjunto de herramientas de MMD implementadas en este trabajo es única para una librería de funciones como la desarrollada. Además, la interfaz gráfica propuesta complementa y facilita el uso de cada una de las técnicas.

La visualización de resultados preliminares y el amplio conjunto de herramientas totalmente parametrizables, hacen adecuado el uso de esta interfaz en un curso introductorio de procesamiento de imágenes, facilitando la experimentación con cada una de las técnicas y el aprendizaje sobre su funcionamiento.

REFERENCIAS

- [1] R. Gonzalez and R. Woods, *Digital image processing*, vol. 1, Upper Saddle River, N. J., Prentice Hall, 2002.
- [2] G. Baxes, *Digital image processing: principles and applications*, vol. 1, New York, Wiley, 1994.
- [3] J. Bangham and S. Marshall, "Image and Signal processing with mathematical morphology", *IEE Electronics & Communication Engineering Journal*, no. 10, pp. 117-128, 1998.
- [4] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, vol. I, London, Academic Press, 1982.
- [5] J. Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, vol. II, London, Academic Press, 1988.
- [6] J. Pastore, E. Moler and G. Meschino, "Segmentación de biopsias de médula ósea mediante filtros morfológicos y rotulación de regiones

- homogéneas", *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, vol. 21, no. pp. 37-44, 2005.
- [7] G. Meschino and E. Moler, "Semiautomated Image Segmentation of Bone Marrow Biopsies by Texture Features and Mathematical Morphology", *Analytical and Quantitative Cytology and Histology*, vol. 26, no. 1, pp. 31-38, 2004.
- [8] J. Pastore, M. Rapacioli, A. Bouchet, D. Comas, V. Sánchez, V. Ballarin and V. Flores, "Caracterización del Comportamiento Migratorio de Neuronas Embrionarias mediante Morfología Matemática", in *Proc. 2nd International Symposium on Innovation and Technology - 2nd ISIT2011*, pp. 78-83, Lima, Perú, 2011.
- [9] P. Cortez Tornello, J. Pastore, D. Comas, A. Bouchet, G. Abraham and T. Cuadrado, "Análisis estructural de poros en matrices poliméricas para ingeniería de tejidos utilizando Morfología Matemática y Reconstrucción 3D", in *Proc. 2nd International Symposium on Innovation and Technology - 2nd ISIT2011*, pp. 84-89, Lima, Perú, 2011.
- [10] A. Bouchet, J. Pastore and V. Ballarin, "Segmentation of Medical Images using Fuzzy Mathematical Morphology", *Journal of Computer Science and Technology*, no. 7, pp. 256-262, 2007.
- [11] A. Bouchet, J. Pastore and V. Ballarin, "Segmentación de Imágenes a través de Morfología Matemática Difusa", *Reunión de Procesamiento de la Información y Control (RPIC 2005)*, no. 2005.
- [12] A. Bouchet, M. Brun and V. Ballarin, "Morfología Matemática Difusa aplicada a la segmentación de angiografías retinales", *Revista Argentina de Bioingeniería*, vol. 16, no. 1, pp. 7-10, 2010.
- [13] A. Bouchet, M. Brun and V. Ballarin, "Análisis comparativo de robustez entre operadores morfológicos clásicos y difusos aplicados al Procesamiento Digital de Imágenes", *37º Jornadas Argentinas de Informática (JAIIO 2008)*, no. 2008.
- [14] <http://www.mediacy.com/>
- [15] D. Comas, G. Meschino and V. Ballarin, "Framework de segmentación y análisis de imágenes mediante reconocimiento de texturas," in *Argentinian Symposium of Technology (AST) Buenos Aires, Argentina*, 2010, pp. 1529-1541.
- [16] SDC, "SDC Morphology Toolbox for MATLAB 5", *User's Guide*. SDC Information Systems, no. 2001.
- [17] A. Bouchet, J. Pastore, R. Andrade, M. Brun and V. Ballarin, "Morfología Matemática Compensatoria aplicada a la segmentación de imágenes médicas", in *Proc. Tercer Taller Internacional de Descubrimiento de Conocimiento, Gestión del Conocimiento y Toma de Decisiones*, Santander, España, 2011.
- [18] A. Bouchet, J. Pastore, R. Espin, M. Brun and V. Ballarin, "Compensatory Logic Applied to Digital Image Processing," in *ALIO-INFORMS Joint International Meeting Buenos Aires, Argentina*, 2010.
- [19] E. Dougherty, *Mathematical morphology in image processing*, M. Dekker, 1993.
- [20] E. Moler, V. Ballarin and M. Gonzalez, "Características Estadísticas, Espectrales y Morfológicas para Clasificación de Texturas: Un Análisis Comparativo", *VIII RPIC Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*, vol. 2, no. pp. 59-62, 1999.
- [21] J. Facon, *Morfología Matemática. Teoría e ejemplos.*, Curitiba, Brasil, Universidade Católica do Paraná, 1996.
- [22] H. Dubois and D. Prade, *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*, vol. 1, New York, Academic Press Inc, 1980.
- [23] E. Klement, R. Mesiar and E. Pap, "Triangular norms. position paper i: basic analytical and algebraic properties", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 143, no. 1, pp. 5-26, 2004.
- [24] I. Bloch and H. Maitre, "Fuzzy mathematical morphologies: A comparative study", *Pattern Recognition*, no. 28, pp. 1341-1387, 1995.
- [25] F. Palacios, A. Bouchet, M. Brun and V. Ballarin, "Análisis comparativo de robustez entre filtros morfológicos clásicos y difusos aplicados al Procesamiento Digital de Imágenes", *38º Jornadas Argentinas de Informática (JAIIO 2009)*, no. 2009.
- [26] M. Köppen, K. Franke and O. Unold, "A survey on Fuzzy Morphology", in *Proc. 5th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies*, pp. 424-427, Samara, Russia, 2000.
- [27] A. Bouchet, J. Pastore, R. Andrade, M. Brun and V. Ballarin, "Arithmetic Mean Based Compensatory Fuzzy Logic", *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, vol. 10, no. 2, pp. 231-243, 2011.



Agustina Bouchet nació en la ciudad de Mar del Plata, Argentina, en 1980. Obtuvo sus títulos de Profesora en Matemática y Licenciada en Ciencias Matemáticas en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Mar del Plata, en los años 2003 y 2005, respectivamente. En 2010 obtuvo el título de Doctora en Ingeniería orientación Electrónica. Desde 2002 trabaja en el Laboratorio de Procesos y Mediciones de Señales, del Departamento de Electrónica de la

Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, estudiando el comportamiento de los operadores de la Morfología Matemática Difusa y su aplicación en el Procesamiento de Imágenes Médicas. Actualmente es becaria postdoctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).



Diego Sebastián Comas es becario doctoral de CONICET y Ayudante de Primera en el Dpto. de Ing. Electrónica de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Argentina. Es miembro del Grupo de Procesamiento Digital de Imágenes de la UNMdP, desarrollando actividades de investigación en el tema desde 2009. Recibió el título de Ingeniero Electrónico en la UNMdP en 2010. Actualmente se encuentra realizando

su doctorado en la UNMdP y desarrolla su tesis en modelos de Lógica Difusa Tipo 2 aplicados a la segmentación de imágenes médicas. Sus temas de investigación son lógica difusa y el procesamiento digital de imágenes.



Juan Ignacio Pastore nació en la ciudad de Balcarce, Argentina, en 1977. Obtuvo sus títulos de Profesor en Matemática e Informática Educativa, Profesor en Matemática y Licenciado en Ciencias Matemáticas en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Mar del Plata, en los años 2000, 2001 y 2002, respectivamente. En 2009 obtuvo el título de Doctor en Ingeniería orientación Electrónica. Desde 1998 el Dr. Juan Ignacio Pastore es miembro del Laboratorio de Procesos y Mediciones de Señales,

dependiente del Departamento de Electrónica de la Facultad de Ingeniería. Su área de investigación se ha centrado en el Procesamiento de Imágenes

aplicando técnicas de Morfología Matemática. También se desempeña como investigador asistente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).



Marcel Brun es Profesor del departamento de Matemáticas de la Facultad de Ingeniería de la UNMdP, e Investigador en el grupo de Procesamiento Digital de Imágenes del departamento de Electrónica de la FI-UNMdP. Actualmente se desempeña adicionalmente como vicedirector del departamento de matemáticas y es miembro de la comisión directiva de la A2B2C. Recibió su título de Licenciado en Matemáticas en 2007, y su título de Dr. en Ciencias de la Computación en 2002.

Sus áreas de investigación incluyen reconocimiento de patrones aplicado al procesamiento de señales genómicas y análisis de imágenes biomédicas. Ha participado de varios proyectos que involucran análisis de datos genómicos. En 2008 recibió un subsidio para investigadores jóvenes de la Agencia, para estudiar las técnicas de estimación de error de clasificadores aplicados a datos genómicos. En los últimos años ha participado de varias conferencias y dictado cursos relacionados con su área de investigación. Actualmente está dirigiendo 3 estudiantes de doctorado, dos con beca de CONICET y co-dirigiendo 2 investigadores con beca postdoctoral de CONICET, y ha publicado más de 30 artículos en revistas con referato.



Virginia Laura Ballarin es Profesora Titular Exclusiva e Investigadora categoría I del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Es actualmente Vice Presidenta de la Sociedad Argentina de Bioingeniería y Directora del Grupo de Procesamiento Digital de Imágenes de la Facultad de Ingeniería de la UNMdP. Recibió su título de Ingeniera Elect. c/o Electrónica y de Magister Scientae de la Universidad Nacional de Mar del Plata y

de Doctora en Cs. Biológica orientación Electrónica de la Universidad Nacional de Tucumán. Ha dirigido 11 tesis de posgrado y 18 de Grado y ha publicado más de cincuenta artículos en revistas con referato y más de cien presentaciones en congresos nacionales e internacionales en los tópicos de procesamiento de digital de imágenes especialmente médicas.