

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE
CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES EMPLEANDO TÉCNICAS DE
PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES A ESCALA MESOSCÓPICA DE
CERÁMICAS**

OSCAR ALBERTO GARCÍA PALENCIA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA**

2009

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE
CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES EMPLEANDO TÉCNICAS DE
PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES A ESCALA MESOSCÓPICA DE
CERÁMICAS**

OSCAR ALBERTO GARCÍA PALENCIA

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Físico**

Director

Ingeniero EDGAR LEONAIRO PENCUE FIERRO

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA**

2009

Nota de Aceptación:

Director

Ingeniero Edgar L. Pencue Fierro

Jurado

Doctora Sonia Gaona Jurado

Jurado

Magíster Jaury León Téllez

Fecha de sustentación: Popayán, 29 de mayo de 2009

***A Fela, Toño, Carlitos y Xavier
Gracias por todo su amor***

**“no sirve hacer lo mejor que podemos; para triunfar, hay que hacer mas”.
Pablo A. García P.**

Agradecimientos

Los agradecimientos son para mí la parte más importante de este trabajo, sin la intervención de una cantidad de personas no hubiera escrito ni una sola página de este libro. El orden de aparición no tiene importancia alguna.

A Dios quien siempre me ha acompañado y es el arquitecto de este trabajo. Gracias por haberme traído a Popayán.

A mis Padres Felicia M. Palencia V. y Antonio García P. y a mis hermanos Carlitos y Xavier por el amor y el apoyo incondicional.

A Doña aurita Burbano, Elizabeth Ortega, Carlos Felipe Ortega, a Doña Carmen y su esposo Don Néstor, Richard y Melisa, quienes me acogieron en sus hogares, a la Doctora Gabriela Moncaleano y a sus cariñosas hermanas, siempre atentas al bienestar de mi hermano y al mío, a Gustavo y su hermosa familia. A Carlos, Carlitos, Estelita, Leo, sin todo el apoyo brindado, nunca hubiera sido posible.

A mis amigos Julio Bedoya, Cristian Villacrés, Alejandro Bonilla, Julián Ortega, Juan Carlos Molina, Andrés Vidal, Carlos Méndez y su bella prometida Angélica, a mi comadre Paola Andrade quienes aseguro se alegran al verme bien.

A mi buen amigo Angelo Reyes, a su señora madre y a su familia por abrirme siempre la puerta de su casa.

A las Residencias Universitarias 4 de Marzo, mi hogar desde hace 2 años. Sin esta valiosa institución de la Universidad del Cauca nunca hubiera tenido la tranquilidad para llevar a feliz término este grado de mi educación. Luchemos para que otros tengan la misma oportunidad.

A los muchachos de RESI, en especial a Andrés Felipe Quintana, Jairo Castelblanco, Nicolás Quintero, Beldar Mosquera, Emilio Chadid, Luís Eduardo Córdoba, Darío Alvira, Carlos Vargas y a mi compañero de la C3 Oswaldo Cerón, gracias por el acompañamiento.

A Marcelo Grueso y Héctor Manso, gracias por la compañía y los buenos consejos.

A la hermosa Carolina Martínez, por depositar su confianza en mi, por su apoyo incondicional, le doy gracias al cielo por haberme permitido compartir de su compañía.

A mis amigos de Tijuana Bar y Empire Bar y Cafezinho, en especial a Iván, Soco, Adriana, Catherine, Graciela, Tico, Kate (Q.E.P.D) y Diana.

A la ciudad de Popayán y a la más importante de sus instituciones la *Universidad del Cauca*, de la cual me siento muy orgullo de pertenecer.

A la niña bonita del departamento de física Ingeniería Física, el trabajo de mis maestros decidido, honesto, digno y desinteresado es el aporte mas valioso hacia una Colombia mejor.

A mis evaluadores la Doctora Sonia Gaona y al Magíster Jaury León Téllez por la objetividad en la evaluación y por brindarme una excelente asesoria en la forma como fue escrito este libro.

Al ingeniero Leonairo Pencue por dirigir este trabajo. Al ingeniero Adolfo Mosquera por suministrar las imágenes de los sistemas cerámicos estudiados. Al Doctor Jorge E. Rodríguez Páez por proponer la idea del trabajo y por el entusiasmo que

ha puesto en el desarrollo del proyecto. A Heiko Kießling por haber desarrollado la versión OpenCV para VS C# y por haber asesorado la codificación del AnaCe. Al doctor Alejandro Toro y su valiosa asesoría.

A todas las personas que estuvieron conmigo dentro y fuera de las aulas, a todos los que hicieron posible este trabajo.

INFINITAS GRACIAS

Este trabajo es producto de la AMISTAD. Este no es mi triunfo, es el de ustedes.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
2. Estudios de las Cerámicas, Tipos, Aplicaciones y Panorama Actual.....	6
2.1 El Mercado de los Cerámicos.....	6
2.2 Caracterización Microestructural.....	10
2.3 Análisis de imagen en Materialografía.....	11
2.4 Norma ASTM E112.....	12
2.5 Norma ASTM E1382.....	13
3. Estudio de las Micrografías, Preprocesamiento y Procesamiento Imágenes.....	15
3.1 Estudios de las Micrografías Obtenidas vía SEM.....	17
3.2 La Importancia de la Preparación de la Muestra y la Toma de la Imagen.....	18
3.3 Segmentación de las Partículas.....	21
3.4 Filtro Adaptativo Implementado.....	23
3.5 Resultados del Estudio en Imágenes.....	26
3.6 Morfología Matemática y Localización del Borde.....	33
4. Análisis de Imagen Aplicado a la Determinación de la Microestructura Cerámica.....	37
4.1 Algoritmo para el Análisis de las Micrografías.....	37
4.2 Medidas en el Análisis de Imagen Aplicado a la Determinación de la Microestructura Cerámica.....	40
4.3 Despliegue de Resultados.....	46

5. Resultados, Análisis y Comparación con otros Software Comerciales.....	48
5.1 Evaluación del Método de Medida Propuesto.....	50
5.2 Comparación de la Medida del Tamaño de Grano Promedio entre el Método Desarrollado y el IQMaterials.....	54
5.3 Comparación de la Medida del Tamaño de Grano entre el Método Desarrollado y el DMP1000.....	57
5.4 Comparación de la Medida del Tamaño de Grano del AnaCe con el Dewinter Metallurgy Software, Material Plus.....	59
5.5 Comparación de la Medida del Contenido de Porosidad entre el Método Propuesto y el Software UNALMED.....	60
5.6 Comparación de la Medida de los Granos y el Contenido de Porosidad entre el AnaCe y el SPIP.....	62
5.7 Comparación entre las Diversas Interfaces de Usuario y la Interfaz del AnaCe.....	64
6. El AnaCe y su Aplicación en otros Campos de la Investigación Científica..	66
7. Conclusiones.....	71
8. Recomendaciones y Trabajos Futuros.....	72
9. Referencias.....	73
10. Bibliografía.....	76
Anexo A.....	77
Anexo B.....	78
Anexo C.....	79
Anexo D.....	80

Lista de Figuras

Figura 2.1. A la izquierda, la relación entre el tamaño de grano y la resistencia mecánica para diferentes composiciones de MgO. A la derecha, la relación entre el tamaño de grano promedio y la permeabilidad magnética en una ferrita blanda de zinc-magnesio con porosidad descontrolada. Imagen obtenida de la referencia [3].....	9
Figura 3.1. Etapas en un sistema de análisis automático de imágenes.....	15
Figura 3.2. Esquema general del sistema, incluyendo la importancia de la preparación de la muestra y una buena toma de la imagen.....	18
Figura 3.3. Micrografías de diferentes materiales cerámicos, fuente: Grupo CYTEMAC UNICAUCA.....	20
Figura 3.4. Diagrama de bloques del algoritmo general del AWEDF.....	24
Figura 3.5. Diagrama de bloques del algoritmo general del AWEDF modificado...	26
Figura 1.6. Imagen de Muestra. En ella se aprecia un mal pulimento.....	27
Figura 1.7. Salida del filtro Gaussiano de 7X7, claramente se observan bordes borrosos, pero el ruido ha sido eliminado (superficie continua).....	27
Figura 1.8. Salida del AWEDFm, se aprecia un fondo liso y bordes preservados.	27
Figura 1.9. Perfil de línea de la imagen original.....	28

Figura 1.10. Perfil de la salida del filtro Gaussiano de 7 x 7, no se pueden ubicar con certeza ciertos picos.....	28
Figura 1.11. Salida del AWEDF, nótese la diferencia de las intensidades de los picos reales y la erosión de los falsos picos.....	29
Figura 1.12. a) Salida del detector de borde de la imagen original, b) Salida para la imagen filtrada con Filtro Gaussiano, c) Salida para el AWEDF con borde fuertes. Las imágenes han sido invertidas.....	31
Figura 1.23. Salida del LoG (<i>Laplacian of Gaussian</i>), se aprecia detección de mucha información parasita que entorpecerá el análisis.....	32
Figura 1.3 Salida del DME, detección más limpia en comparación con el LoG..	32
Figura 1.45. Procesos morfológicos que se siguen para localizar el borde.....	33
Figura 1.56. A la izquierda, imagen Segmentada. A la Derecha resultado del adelgazamiento a la imagen segmentada.....	34
Figura 1.6Procesos de enlazamiento y poda para disminuir la información parásita al tamaño de un píxel.....	35
Figura 1.78. Eliminación de píxeles aislados. Como se observa en la imagen la información parásita ha sido eliminada y se ha corregido la conectividad.....	36
Figura 1.8. Extracción de los granos de la imagen de salida de la etapa de morfología matemática.....	38

Figura 1.9. Extracción solo de los poros intersticiales o los señalados con las flechas en rojo.....	39
Figura 1.10. Imagen donde se muestran los granos analizados, así como el área de interés analizada.....	40
Figura 4.4. a) Ubicación de los ejes de medida en la partícula segmentada. Como se puede observar en la imagen, los ejes presentan diferentes grados de inclinación. b) Una interpretación gráfica del método para tres ejes, <i>rojo</i> para el eje mayor, <i>azul</i> para el eje menor y <i>verde</i> para 1 eje auxiliar.....	42
Figura 1.5. Aspecto del Reporte generado tras el análisis de la imagen.....	47
Figura 5.1. a) Una de las imágenes patrones empleadas para determinar la precisión de las medidas. b) Salida del analizador propuesto en donde se muestran las partículas analizadas.....	50
Figura 1.2. Salida de sistema desarrollado para la imagen de la izquierda.....	53
Figura 1.3. Salida del sistema complementando la detección por edición automática y manual.....	54
Figura 1.4. Muestras Analizadas en la comparación del AnaCe con otros software comerciales. Fuente: CYTEMAC-UNICAUCA.....	56
Figura 6.1. a) Muestra de un llenante en donde el material presenta diferentes simetrías, tamaños y presencia de materia orgánica. b) MET de la UNICAUCA con que se tomaron las imágenes. c) Muestra de un Llenante de aproximadamente 30 nm. d) Detección del AnaCe de la partícula.....	67

Figura 6.2. a) Imagen de una Película delgada por medio de AFM. Fuente: FISBATEM – UNICAUCA. b) Análisis por medio del AnaCe.....68

Figura 6.3. a) Imagen de una columna de material pétreo. b) Análisis de la sección transversal de una columna similar a a) por medio del AnaCe.....69

Figura 6.4. a) Imágenes de pelos de puma del parque Puracé. b) Análisis morfológico por medio del AnaCe.....70

Lista de Tablas

Tabla 1.1. Propiedades y Aplicaciones de diferentes Materiales Cerámicos.....	7
Tabla 5.1. Comparación entre las medidas realizadas por el analizador y la muestra patrón.....	51
Tabla 1.2. Medidas del tamaño de grano promedio.....	55
Tabla 1.3. Comparación entre el Método propuesto y el DMP1000. Los resultados dentro del recuadro rojo fueron hechos por un analista experimentado, los demás por uno menos experimentado.....	58
Tabla 1.4. Comparación de las medidas de porosidad entre el AnaCe y el sistema UNALMED.....	61
Tabla 1.5. Resultados obtenidos con el Met.Propuesto y el SPIP, donde M.D y/o D.D son respectivamente Mala Detección y/o Doble Detección.....	63
Tabla 5.6. Cotejo de las medidas de porosidad entre el SPIP y el AnaCe.....	64

1 Introducción

Para vislumbrar el propósito de este trabajo se debe hacer una revisión de la definición de *Ceramografía*. La ceramografía es el arte y la ciencia de la preparación, examen y evaluación de la microestructura cerámica. El estudio de la ceramografía, al igual que el de la metalografía cabe dentro del concepto de la ciencia de materiales, ambas tiene rangos de operación en la escala micrométrica, en otras palabras entre 0.1 y 100 micras, por lo cual se emplean términos como *microestructura* y *micrografías* por ejemplo ^[1].

Ya que la ceramografía estudia la microestructura cerámica, se denomina microestructura principalmente a la presencia de granos, segundas fases, fronteras de grano, poros y microgrietas en el material o sistema cerámico.

El estudio detallado de la microestructura cerámica es sumamente importante debido a que ésta es responsable y/o afecta directamente las propiedades del material, es decir, la respuesta del material a un estímulo. Dentro de las propiedades de los materiales se resaltan las propiedades *mecánicas, eléctricas, ópticas, magnéticas, térmicas, químicas, nucleares y tribológicas* ^[2].

Dicho estudio ha sido de gran importancia para el constante avance de la ciencia, no obstante, ha sido relevante en la fabricación de dispositivos y sensores, de gran ayuda para la humanidad, teniendo especial acogida en aplicaciones industriales, donde son necesarias cerámicas de alto desempeño.

Cabe resaltar que los métodos y las condiciones necesarias en los procesos de fabricación están estrechamente ligados con la microestructura, que es donde

precisamente se hacen evidentes la mayoría de las fallas o los resultados desfavorables ^[3].

El grupo de Ciencia y Tecnología de Materiales Cerámicos CYTEMAC de la Universidad del Cauca tiene dentro de sus muchos objetivos, brindar la base tecnológica para la fabricación de dispositivos de sensado, realizando día a día, el estudio de las propiedades físicas de diferentes piezas cerámicas en busca de una posterior aplicación al campo industrial.

Una herramienta clave para este estudio es la *caracterización*, vital en el análisis y la conclusión de las investigaciones en ciencia de materiales. Dentro de los muchos métodos de caracterización, se encuentran los materialográficos: ceramografía, metalografía, petrografía y plastografía, los cuales emplean imágenes en la determinación y posterior caracterización de la microestructura.

La ceramografía, emplea imágenes obtenidas principalmente del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), del Microscopio Electrónico de Transmisión (MET), y de los Microscopios: Ópticos, Láser Confocal de Barrido (MLCB), Catodolumincente (MCL) y Acústico de Barrido (MAB) ^[1-4].

El grupo CYTEMAC emplea principalmente en sus análisis micrografías MEB, MET y Ópticas. Para este trabajo en particular, se prestará atención sólo a las imágenes obtenidas con microscopía electrónica de barrido.

De un primer análisis de estas micrografías se evidencia un gran volumen de información en ellas, que a decir verdad resulta demasiado amplio para la capacidad de análisis no instrumental. Si este análisis se realiza manualmente, implica básicamente un amplio tiempo de análisis, cansancio visual (que se manifiesta en la calidad de las medidas), ineficacia e ineficiencia en el manejo estadístico de la información, por el gran volumen de datos.

Es en este punto es donde se hace evidente el propósito de este trabajo. Es oportuno entonces diseñar e implementar un método sistemático de medida en el que se agilicen los tiempos de análisis, se obtengan medidas confiables y sea cómodo y amigable para el analista, permitiendo el análisis detallado de las muestras en corto tiempo.

Cabe resaltar que comercialmente existen amplias opciones de sistemas automáticos y semi-automáticos de medidas. Casi todos se basan en los métodos tradicionales de medida, principalmente el método Jeffries y los métodos planimétricos, encapsulados en normas técnicas ampliamente difundidas.

En un mundo exigente, cambiante, con miras hacia la globalización, y lo que esto conlleva, el grupo CYTEMAC, en aras de seguir este ritmo, busca cada día valerse de herramientas que permitan obtener análisis con mayor grado de precisión, y resolución de detalles, por lo cual ha requerido de manera especial al grupo de Óptica y Láser (GOL) de la UNICAUCA, la implementación de un sistema de medida que satisfaga esta petición. Para la realización de este trabajo fue preciso:

- Apoyarse en el Procesamiento Óptico–Digital de Imágenes, una amplia ciencia que se expresa por medio de la programación.
- Revisar el estado del arte de las técnicas de determinación de la microestructura cerámica, los métodos empleados en la preparación de las probetas y su consecuencia en la obtención de imágenes apropiadas para un satisfactorio análisis.
- Estudiar las micrografías para encontrar correspondencias entre la morfología de las imágenes y la extracción eficaz de las regiones de interés, diseñando métodos de segmentación y filtrado muy eficaces, que

minimicen el efecto de imperfecciones por la inadecuada preparación de la muestra.

- La elección de descriptores de medidas apropiados, con el fin de brindarle al analista las herramientas de un análisis detallado.

En este documento el desarrollo de la anterior metodología se muestra por capítulos de la siguiente manera.

En el capítulo 2 se encuentra una descripción de la diversidad de tipos, propiedades y aplicaciones de las cerámicas, además del panorama actual del mercado alrededor de dichos materiales, esto con el fin de señalar lo atractivo que resulta trabajar con este tipo de materiales, así como su vigencia tanto en la investigación científica como en las aplicaciones a nivel industrial. Ligado a lo anterior, también se presentan la importancia de la microestructura cerámica, los estudios alrededor de su determinación (estado del arte) y la conexión entre la microestructura cerámica, las propiedades exhibidas por el material y el procesamiento cerámico (incluyéndose la detección de fallas en la fabricación).

El capítulo 3 se centra en la detección de las partículas presentes en las imágenes que luego serán analizadas como se indica en el capítulo 4. Estos dos capítulos son el fuerte del trabajo y muestran como se atacó el problema de la determinación de la microestructura. En la primera parte del capítulo 3 se señala el estudio realizado sobre las imágenes, obteniendo como resultado la fijación de las etapas de pre-procesamiento y procesamiento y la importancia de una correcta preparación de la muestra en aras de un análisis de calidad. En este capítulo se encuentra principalmente el desarrollo de la etapa de filtrado, segmentación de bordes o fronteras de grano, segmentación de poros, localización de bordes y discriminación de partículas.

El capítulo 4 muestra la última etapa del sistema, el análisis de las partículas segmentadas o detectadas previamente; dejando en claro que este no es un análisis de imagen típico sino aplicado a la determinación de la microestructura cerámica. En este capítulo se encuentra la metodología para calcular los descriptores de medida más relevantes para el analista en ciencia de materiales, y por último el despliegue de resultados.

El capítulo 5 da cuenta de la evaluación de los resultados obtenidos con el método desarrollado, detectando la precisión de las medidas y las posibles causas de inclusión de error. Por otra parte, en el capítulo se muestra la comparación del software desarrollado y otros software en su mayoría comerciales, cotejando principalmente tiempos de análisis y precisión.

En el capítulo 6 se encuentran las recomendaciones y trabajos futuros y en el capítulo 7 las conclusiones del trabajo. Por último, en el capítulo 8 y 9 las referencias y la bibliografía empleada en el desarrollo de la propuesta.

2 Estudios de las Cerámicas, Tipos, Aplicaciones, y Panorama Actual.

Cuando se hace lectura de un libro de ciencia de materiales y se presta atención en los capítulos introductorios, seguramente se encontrará una típica clasificación de los tipos de materiales sólidos que existen en la naturaleza, agrupados así: Metales, Polímeros, Semiconductores, Compositas y por ultimo los de interés particular, los Cerámicos. La mayoría de las cerámicas están formadas en gran parte por óxidos, nitruros y carburos.

Haciendo una abstracción del párrafo anterior, se puede ver que un gran número de materiales conocidos entran dentro de la clasificación de *cerámicos*. Las aplicaciones de estos materiales son muy variadas, desde tejas y ladrillos (cerámicas tradicionales), hasta componentes magnéticos y eléctricos, por ejemplo varistores, sensores de gases y lentes protectores de altas radiaciones (cerámicas avanzadas). Aplicaciones como éstas dejan ver el amplio rango de propiedades exhibidas por los cerámicos. La Tabla 2.1 lista algunas de estas, con ejemplos de materiales específicos y sus respectivas aplicaciones ^[3, 5].

Las funciones de cada producto cerámico dependen de su composición química y de su microestructura, esta interrelación es el elemento clave de la ciencia e ingeniería de materiales.

2.1 El Mercado de los Cerámicos

El mercado de los cerámicos es una de las denominadas Industrias Multimillonarias en el mundo. Para el 2008 se calcula que el monto de las ventas alrededor del mundo superan los \$100 mil millones de dólares ($\$10^{11}$) por año, datos proporcionados por la industria cerámica, que constantemente emite

numerosos boletines en diferentes medios de difusión, por ejemplo el magazín *Ceramic Industry* ^[5-8]; lo que muestra a las cerámicas, como una oportunidad y un mercado totalmente atractivo.

Tabla 2.1. Propiedades y Aplicaciones de diferentes Materiales Cerámicos

Función	Propiedad	Aplicaciones	Materiales
<i>Mecánica</i>	Resistencia a la abrasión, Resistencia, Capacidad Lubricante.	Abrasivos, Piezas de Precisión, alabes de turbinas, Herramientas de Corte, Implantes de Cadera	TiN-Al ₂ B ₄ C-WC-TiC Si ₃ N ₄ -SiC Diamante
<i>Eléctrica</i>	Superconductividad, cambio de ρ con Temp., cambio de ρ con Volt., Permitividad, Piro, piezo y semi - conductividad	Electrodos Transparentes, SQUID's, Superconductores, Termistores, Varistores, Condensadores, Detectores Piezo y Piro, Semiconductores, detectores IR, fotómetros, Instrumentos de pantalla, Electrodos de baterías solares	YBa ₂ Cu ₃ O ₇ BaTiO ₃ ZnO Pb(Zr,Ti)O ₃ Pb(Zr,Ti)O ₃ , LiNbO ₃ Si(B,Al,P,As), AsGa PIn, InSb CdS, Cd ₂ SnO ₄
<i>Magnética</i>	Ferromagnetismo, Ferrimagnetismo	Imanes Permanentes, Elementos de Memoria, Componentes Magnéticos, Imanes Permanentes en Auriculares y Altavoces	SrFe ₁₂ O ₁₉ NiFe ₂ O ₄ CrO ₂
<i>Ópticas</i>	Cátodo Luminiscente, Absorción, Reflexión, transmisión.	Pantallas, Fibras Ópticas, Cerámicas Translucidas, Electrodos Transparentes, Cerámicas de Color, Láser de Estado Sólido	ZnS(Ag), (Zn,Cd)S/Cu Y ₂ O ₂ /Zr, Ge, GaInAsP Al ₂ O ₃ /Mg SnO ₂
<i>Térmica</i>	Aislamiento Térmico, Conductividad Térmica, Absorción de Calor	Refractarios para hornos, Cambiadores de Calor, Revestimientos, azulejos de aislamiento del trasbordador espacial, soportes para los espejos de los telescopios	Mullita, Y/ZrO ₂ BeO SiC-AlN, Si ₃ N ₄ -B ₄ C

La distribución general de las ventas en el mercado de las cerámicas es el siguiente: 55% vidrio, 17% cerámicas avanzadas, 10% *whiteware*, 9% esmaltes de porcelana, 7% Refractarios, 2% arcilla estructural. Como se ve, el vidrio es quien domina el mercado, siendo la principal aplicación la fabricación de vidrio plano o de ventanas. El segundo mayor sector es el de las cerámicas avanzadas. Dentro de las principales aplicaciones encontramos: condensadores, sustratos, cerámicas eléctricas y electrónicas, porcelanas eléctricas, cerámicas de ingeniería y fibras ópticas. Un crecimiento significativo se ha pronosticado para las cerámicas avanzadas en los siguientes años debido al incremento en el uso de transductores y dispositivos electrónicos en la fabricación de aparatos o artefactos de uso masivo. Un claro ejemplo son el incremento en la fabricación de filtros y resonadores de microondas por el creciente uso de la telefonía celular ^[6].

Pensando a futuro, el reto de las industrias para obtener crecimientos económicos o de mercado, está en incrementar su conocimiento en los materiales que producen, es por esto que sus metas están puestas en:

- Reducir costos en el producto terminado o producto final.
- Mejorar la fiabilidad.
- Mejorar la reproducibilidad.
- Integrar los productos con la tecnología actual de semiconductores.
- Realzar la compatibilidad con otros materiales.
- Mejorar la compatibilidad entre tejidos sintéticos y humanos.
- Entender los procesos de crecimiento y deposición de películas.
- Reducir los costos en el procesamiento de los materiales.
- Garantizar que el uso de estos dispositivos no tenga un efecto negativo en el medio ambiente.

En la actualidad se sabe que hay una estrecha relación entre la microestructura, el procesamiento y las aplicaciones de las cerámicas. Los materiales policristalinos,

están compuestos de numerosos granos, de su tamaño, forma y orientación, dependen las propiedades macroscópicas del material, además de la porosidad y de las segundas fases. Si se toma como ejemplo el MgO, se ve que el tamaño de grano juega un papel fundamental en la resistencia mecánica de este material, ya que cuanto más pequeño sea el tamaño de grano, mayor será la resistencia mecánica de éste. En la Figura 2.1 se observan dos graficas donde se aprecia la dependencia entre la microestructura, la resistencia mecánica y la permeabilidad magnética respectivamente [3].

De igual forma se podrían revisar ejemplos de la importancia del contenido de porosidad, de las fronteras de granos, de la distribución de las partículas y de las segundas fases con las propiedades del material; si este es su interés se recomienda revisar la referencia [3] *Ceramic Materials Science and Engineering*.

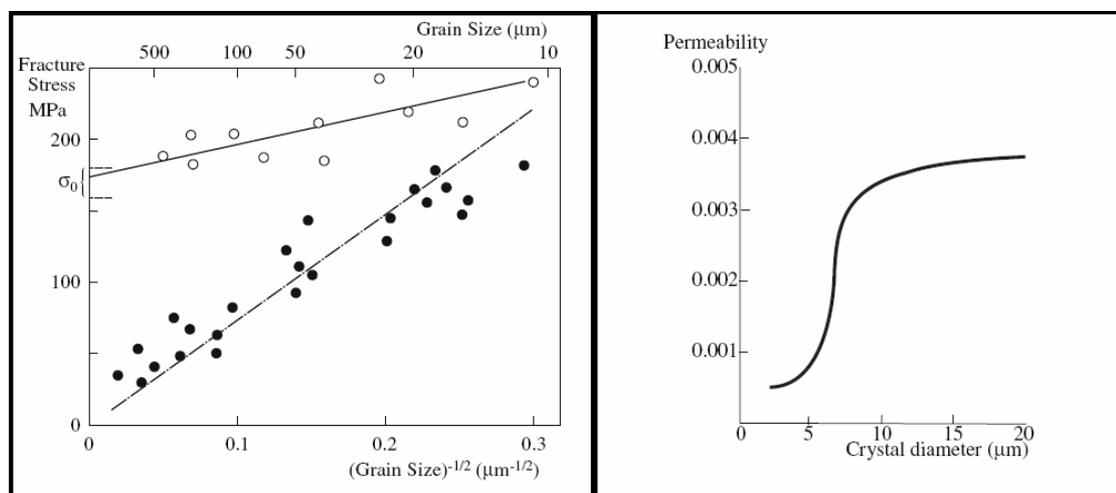


Figura 2.1. A la izquierda, la relación entre el tamaño de grano y la resistencia mecánica para diferentes composiciones de MgO. A la derecha, la relación entre el tamaño de grano promedio y la permeabilidad magnética en una ferrita blanda de zinc-magnesio con porosidad descontrolada. Imagen obtenida de la referencia [3].

2.2 Caracterización Microestructural

Actualmente el estudio de la microestructura cerámica se realiza mediante la combinación de la microscopía electrónica de barrido (MEB) y la microscopía óptica, con el análisis de imagen asistido por computador ^[9, 10].

En los materiales cerámicos para describir la microestructura a este nivel es necesario la caracterización de los granos de la cerámica, la porosidad, y si las hubiese, de las posibles segundas fases ^[9, 10]. Para este propósito se analizan imágenes de superficies pulidas finamente, donde el proceso de preparación de las superficies es importante, ya que puede enmascarar la microestructura real del material. Así, como consecuencia únicamente del pulido pueden aparecer huellas dejadas por partículas mas blandas arrancadas durante el pulido, denominados *pull-outs*, o “colas de cometa” en los bordes de los poros. Todos estos defectos se pueden eliminar por medio de la elección de un proceso de preparación adecuado de la superficie, que depende de la dureza y ductilidad de la muestra. Teniendo en cuenta todos estos factores, el pulido fino de las cerámicas se realiza usando como abrasivo suspensiones de alumina de tamaño de partícula sucesivamente menores por ejemplo: 5 μm , 0.3 μm y 0.05 μm ^[10]. Cuando ya no se producen cambios en el aspecto de la superficie se comienza con el paso siguiente, de esta manera se obtiene una superficie fiable para la medida de la microestructura.

Para la determinación del tamaño de grano, las muestras pulidas se someten a un choque térmico de aproximadamente 1273K a temperatura ambiente. El resultado es una superficie en la que quedan marcadas las fronteras de grano. Todas las superficies se metalizan con oro o carbono para poder observarlas mediante microscopia electrónica ^[3, 9, 10].

2.3 Análisis de Imagen en Metalografía

El análisis de imagen consiste en la cuantificación y clasificación de los objetos de interés de una imagen capturada previamente. Lo que esta técnica permite es la extracción de la información contenida en las imágenes^[11, 12]. Por tanto el uso de la microscopía y el procesamiento de imágenes digitales aparecen como complemento a las técnicas existentes para la caracterización microestructural cerámico.

Los procedimientos seguidos en esta técnica han sufrido una gran evolución. Los primeros sistemas usados para el análisis de imágenes eran completamente manuales. Entre ellos los métodos planimétricos y métodos de intercepción. Posteriormente se desarrollaron algunos instrumentos semiautomáticos, como el trazado manual de contornos por medio de tablas digitalizadoras para posteriormente ser analizados por computador, y por último aparecieron los sistemas automáticos de análisis de imagen asistidos por computador, en los que la intervención del operador es mínima, con lo que se asegura una menor influencia del criterio humano^[10, 13]. En realidad, el observador humano se distrae fácilmente de los que es importante por detalles triviales de la imagen. Los sistemas asistidos por computador permiten la obtención rápida de un gran volumen de datos, necesarios para un análisis estadístico fiable, y tienen la capacidad de extraer información específica de las imágenes con mayor precisión y reproducibilidad que las realizadas manualmente^[14].

Los sistemas de análisis de imagen asistidos por computador tratan las imágenes como un conjunto de puntos, cada uno de los cuales corresponde a la intensidad de la imagen en ese punto. Cuando estos puntos, denominados píxeles, se ordenan en una matriz dan lugar a una representación digital de la imagen. El proceso que lleva a la obtención de imagen se denomina digitalización o adquisición, y es el primer paso en el proceso de análisis de una imagen^[14].

La necesidad de mejorar la visibilidad de las estructuras de interés y la eliminación de los posibles defectos en la imagen, son las razones para realizar un procesamiento de la imagen en tonos de gris. Las operaciones que componen el procesamiento se pueden clasificar en tres grupos: transformaciones geométricas, transformación de punto o puntuales de los niveles de gris y las convoluciones y filtros ^[12, 14].

2.4 Norma ASTM E112.

La norma ASTM E112 aparece como la recopilación de las técnicas empleadas en el análisis y medición de partículas en materialografía de forma *manual*, esta norma, al igual que la E1382, ha sido utilizada por más de 30 años en la medición del tamaño de grano en diferentes aplicaciones. Actualmente es la norma mas difundida y de mayor uso en investigación y control de calidad en ciencia de materiales, por lo tanto el conocer de esta norma es fundamental para medir los alcances de este trabajo.

Los métodos de ensayo que presenta la norma abarcan la medición de tamaño medio de grano e incluyen procedimientos de comparación, métodos planimétricos (o Jeffries) y procedimientos de intercepción. Estos métodos se aplican principalmente a las estructuras de una sola fase de grano, pero pueden ser aplicados para determinar el tamaño medio de un tipo particular de grano en estructuras multifásicas o multiconstituyentes.

Estos métodos son usados para determinar el tamaño medio de grano de las muestras con una distribución de áreas de grano unimodal, al igual que diámetros y longitudes interceptadas. Estas distribuciones son aproximadamente Log-normal. Estos métodos de medida no cubren los métodos para caracterizar la naturaleza de estas distribuciones. La caracterización de tamaño de grano de

especímenes con distribución del tamaño de grano dúplex (bimodal) se describe en Métodos de prueba de E 1181.

Estos métodos de ensayo se ocupan sólo de la determinación del tamaño de grano planar, es decir, se realiza la caracterización por medio de secciones, revelando la superficie de las muestras y capturando una imagen bidimensional. La determinación del tamaño de grano espacial, es decir, la medición del tamaño de los granos en tres dimensiones en el modelo de volumen, está más allá del ámbito de aplicación de estos métodos de ensayo.

Esta norma describe métodos de ensayo manuales, utilizando una serie de imágenes estándar para la comparación con plantillas. Los métodos de medida empleando la utilización de tabletas digitalizadoras semi-automáticas y analizadores de imagen automáticos se describen en la norma E 1382.

Estos métodos de medida deben ser interpretados como una recomendación de métodos de ensayo y no como la definición o el establecimiento de límites de aceptabilidad e idoneidad en el propósito de las medidas en ciencia de materiales.

Los valores medidos se expresan en unidades del SI, que se consideran estándar. Aunque se puede presentar entre paréntesis el equivalente en otro sistema de medida ^[15].

2.5 Norma ASTM E1382.

La norma ASTM E1382 es la aplicación de la norma E112 para análisis con la ayuda del computador. Los métodos presentados en la norma E1382 cubren los procedimientos para la determinación del tamaño de grano medio, y la distribución de tamaño de grano o área de grano para metales policristalinos y materiales no-

metálicos con formas de granos equiaxiales o amorfas, con distribuciones de tamaño de grano unimodales o dúplex, y con estructuras de grano de una sola fase o multifásicos.

Las mediciones se realizan usando analizadores automáticos y semi-automáticos de imagen, estos últimos emplean una tableta digitalizadora de imagen. Estos dispositivos alivian en gran parte el tedio asociado con las mediciones manuales, lo que permite recoger una mayor cantidad de datos y toma de muestras más amplias que darán lugar a una mejor definición estadística del tamaño de grano que por métodos manuales.

La precisión y la exactitud relativa de los resultados de las pruebas dependen de la representatividad de la muestra o las muestras, la calidad de preparación de muestra, la claridad de los límites de grano, el número de granos medidos o el área de medición, los errores en la detección de límites de grano o granos interiores, los errores debidos a la detección de otras características (carburos, inclusiones, dos fronteras, y así sucesivamente), la representatividad de los campos de medida y errores de programación.

Los resultados de estos métodos de ensayo se pueden utilizar para calificar los materiales en conformidad con las directrices acordadas entre comprador y fabricante (control de calidad), para comparar los diferentes procesos de fabricación o variaciones de los procesos, o para proporcionar datos para que relacionen la estructura y las propiedades en los estudios de comportamiento del material.

Los resúmenes de las normas ASTM E112 y ASTM E1382, han sido extraídos de la página oficial de la ASTM, para mayor información se sugiere la lectura de la referencia [15].

3 Estudio de las Micrografías, Preprocesamiento y Procesamiento de Imágenes.

Todo sistema automático de análisis de imagen sigue generalmente etapas o procesos que se realizan sobre una imagen previamente seleccionada denominadas *Pre-procesamiento*, *Procesamiento* y *Análisis*, tal como se observan en la Figura 3.1, comenzando con la adquisición de la imagen y finalizando en el despliegue de los resultados, casi siempre de carácter numérico.

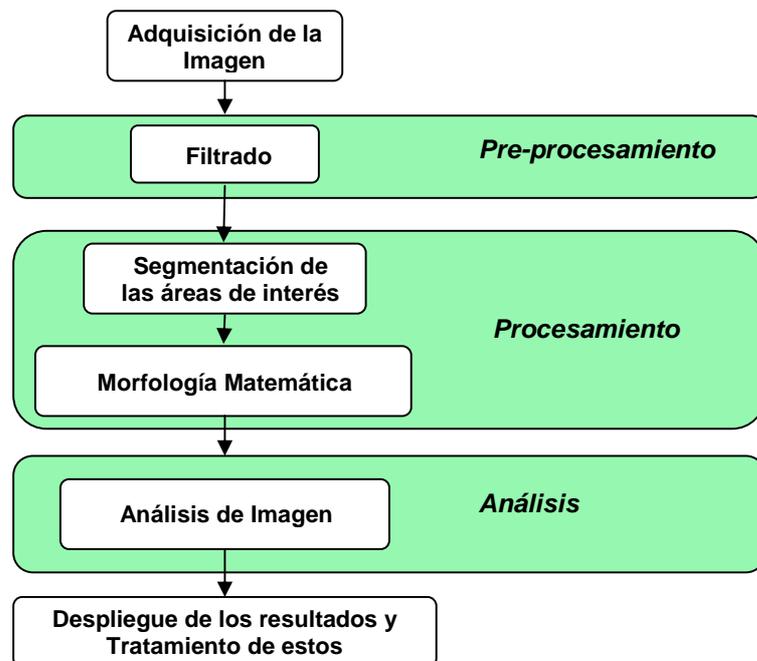


Figura 3.1. Etapas en un sistema de Análisis Automático de Imágenes

La comprensión de estas etapas es de suma importancia, ya que de ello depende la detección de las causales que entorpezcan el objetivo de cualquier análisis, esto es, la obtención de medidas fiables.

La primera etapa hace referencia a todo cuanto este relacionado con la *adquisición* de la escena a analizar, por ejemplo, la naturaleza de la cámara (si es

digital o analógica), el formato de imagen, el uso de dispositivos como escáneres para cambiar de análogo a formato digital, la resolución de las cámaras, la iluminación de la escena, una correcta focalización, el nivel de ruido y los tipos de ruido presentados en la imagen, el uso de dispositivos ópticos como polarizadores, lentes, filtros, entre otros. La correcta adquisición de una imagen (la mayor cantidad de información contenida en esta, evitando a toda costa las pérdidas de información) será la puerta de entrada a unos resultados satisfactorios ^[12, 14].

Con la segunda etapa comienza el pre-procesamiento. El *Filtrado*, ayuda a eliminar la información indeseada o ruido tras el paso de la etapa anterior. Se debe tener en cuenta que en todo proceso de digitalización de una escena, siempre habrá un nivel de ruido. Los ingenieros y científicos que trabajan alrededor de este campo buscan incansablemente que este nivel de ruido sea lo más cercano a cero. Por lo tanto la correcta elección de un filtro, según sea la naturaleza del ruido, eliminará esa información no esperada, pero que ha sido detectada (falsos positivos) en la imagen, evitando así que sea analizada posteriormente. El objeto de esta etapa es impedir que el sistema se confunda y arroje resultados que no corresponden a la realidad.

La etapa de *segmentación* es la etapa en la cual se aísla de la imagen o de la escena, las áreas de particular interés. Al igual que el filtrado, existen innumerables técnicas de segmentación, algunas son relativamente sencillas, otras emplean algoritmos a la vanguardia del conocimiento, como las redes neuronales, algoritmos *fuzzy* e inteligencia artificial, en últimas todas buscan seleccionar lo verdaderamente importante al tiempo que obvian los detalles triviales de la imagen. Generalmente esta etapa entrega una o varias imágenes de tipo binario, donde el fondo esta en ceros y lo segmentado o de interés esta en unos binarios (se pasa de una imagen en niveles de gris a una imagen solo con dos posibles estados 1 ó 0) ^[16].

La conclusión de estas tres etapas pronosticará el éxito o el fracaso. Si los resultados no son los esperados, seguramente las principales causas estarán en una de estas tres etapas y se deberá volver a empezar un nuevo análisis, teniendo en cuenta las causas del fracaso en el anterior análisis.

La siguiente etapa, la *morfología matemática*, hace parte del procesamiento, se encarga de realizar operaciones sobre las áreas segmentadas previamente. Las operaciones aquí efectuadas solo tienen en cuenta la forma del objeto, de allí su nombre. Dentro de estas operaciones se resaltan la Dilatación, la Erosión, el Adelgazamiento, la Apertura y el Cierre. La morfología matemática es una poderosa herramienta en aplicaciones de clasificaciones de patrones y en general ayuda a deshacerse de los molestos falsos positivos que no se pudieron eliminar luego del filtrado y que fueron detectados como positivos en la etapa de segmentación [17, 18, 19].

El *Análisis de Imagen*, hace referencia a cuantas formas existan de analizar por medio de descriptores de medida, las áreas de interés en la imagen de entrada, segmentadas y tratadas en las etapas anteriores. Dentro de estos descriptores se encuentran las medidas de campo, de objeto y los parámetros densitométricos [19]. En el siguiente capítulo se ampliará con más detalle esta etapa, enmarcada por supuesto en los objetivos de este trabajo.

3.1 Estudio de las Micrografías Obtenidas vía SEM

El estudio de las micrografías, que llevan consigo la información que describe la microestructura del material, es de vital importancia, ya que se busca un conjunto de características generales que permitan identificar las partículas presentes en cada imagen, para así extraer sus características individuales por medio de la consecución del seguimiento de operaciones generales sobre éstas. Además de

esto, se deben hallar generalidades entre las imágenes, sabiendo que corresponden a superficies de diferentes muestras, tomadas en distintos microscopios, con diferentes pulimentos o preparaciones, de una amplia gama de materiales, con diferentes iluminaciones y dimensiones disímiles entre imagen e imagen, buscando reproducibilidad en el algoritmo implementado.

3.2 La Importancia de la Preparación de la Muestra y la Toma de la Imagen

Aunque no entra en los alcances de este trabajo, la correcta preparación de la muestra y la toma de una buena imagen son vitales en la obtención de buenos resultados. Una imagen deficiente implicará resultados catastróficos, ya que ópticamente el sistema no será capaz de resolver satisfactoriamente los detalles en la imagen. Es por esto que se debe transformar el esquema general del sistema de la Figura 3.1 por el señalado en la Figura 3.2.

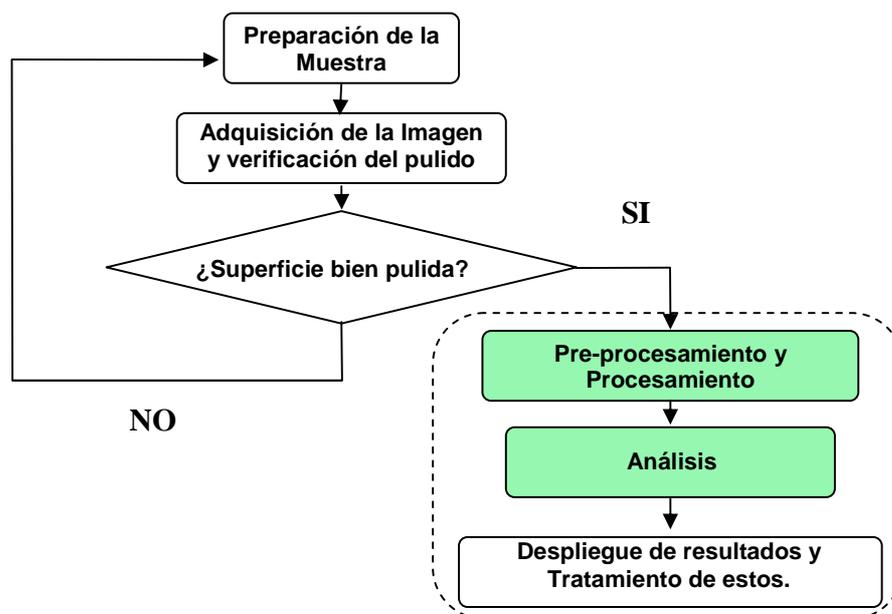


Figura 3.2. Esquema general del sistema, incluyendo la importancia de la preparación de la muestra y una buena toma de la imagen

En la Figura 3.3 se presenta un listado de imágenes que corresponden a diferentes preparaciones de las muestras.

La Figura 3.3 a) presenta una superficie con pulimento 3.5. En una escala de 0 a 5, regular, pero el filtro puede optimizarla. En esta imagen la microestructura está bien revelada, mostrando una frontera de grano bien marcada. Los poros también están bien definidos y será fácil segmentarlos, por lo tanto el análisis será satisfactorio.

A continuación la probeta b), en esta imagen se aprecian claramente segundas fases, pero en general la microestructura no está bien revelada, además desde el punto de vista óptico la magnificación con la cual fue tomada la imagen no permite resolver las partículas, por lo tanto difícilmente el sistema logrará segmentar satisfactoriamente las partículas para su análisis y posterior medida.

En la muestra c) se tiene un pulimento 4.5, fronteras de grano y poros bien definidos y fáciles de segmentar, pero claramente se ve una iluminación desigual de arriba hacia abajo. En este caso el problema no es de preparación de la muestra sino de captura de la imagen.

En el caso de la superficie d) se ve un buen pulimento, pero el material desprendido es imposible de analizar. En este ejemplo se resalta la importancia del correcto recubrimiento metálico de las muestras, ya que las muchas áreas de saturación en la imagen son producto de esta. Se puede decir que la película metálica fue mal depositada.

La imagen e) no corresponde a la superficie de una probeta, sino al corte lateral tras la fractura de la probeta. Esta es una técnica alternativa, en donde se aprecia la microestructura sin necesidad de aplicar técnicas de pulimento, sin embargo la frontera de los granos y el resto de la microestructura debe estar bien definida.

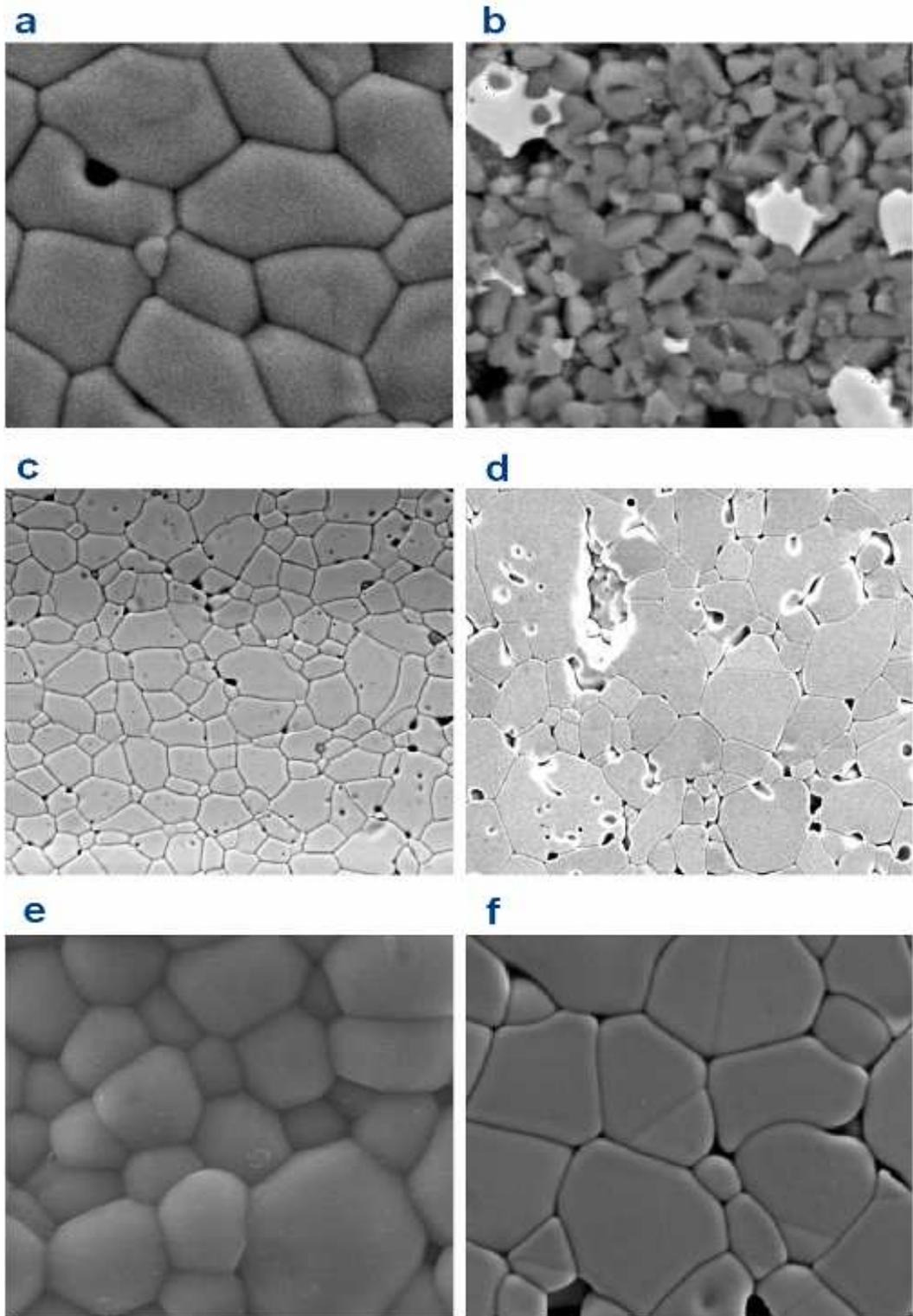


Figura 3.3. Micrografías de diferentes materiales cerámicos, Fuente Grupo CYTEMAC UNICAUCA

Por último, en la muestra f) se aprecia una buena microestructura, salvo las cisuras dentro de algunos granos.

Así pues, con esta clara descripción se mencionan los eventos mas frecuentes cuando se obtienen imágenes de muestra. Es claro que en todo sistema de medida se deben presentar muestras que cumplan con ciertos requisitos mínimos. Queda entonces en manos del usuario primero obtener probetas preparadas adecuadamente y luego capturar las imágenes apropiadas, para finalmente, pasarle estas imágenes al sistema de extracción y medida. Solo así se garantizarán resultados fiables.

3.3 Segmentación de las Partículas

De acuerdo a lo anterior, fue necesaria una amplia revisión sobre innumerables micrografías de diversas superficies de sistemas cerámicos, en búsqueda de un algoritmo que generalizara sus características comunes, de forma que se pueda atacar eficientemente el primer escaño: la extracción de las partículas. Como resultado del estudio se encontró que para una adecuada extracción de cada partícula, se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La segmentación de los poros se debe realizar por medio de umbralización de niveles de gris, ya que generalmente existe un umbral para el cual los poros se distinguen del resto de las áreas de interés en la imagen.
- Es necesario realizar la segmentación del borde o *frontera de grano* y no de la superficie del grano para aislar cada grano.
- Al realizar la segmentación por umbralización de niveles de gris (conocida como Threshold) no se obtienen buenos resultados, ya que no es posible

determinar un nivel de gris para extraer completamente todos los bordes o la superficie de los granos, además de la alta detección de ruido en la mayoría de las muestras.

Por lo tanto, para segmentar las fronteras de grano se realizó un estudio que permitiera elegir un detector de borde apropiado. La elección se hizo de los detectores de borde encontrados en la literatura que estuvo al alcance. Fueron analizados los siguientes detectores:

- ✓ Perwitt
- ✓ Sobel
- ✓ Detector de Homogeneidad
- ✓ Empleando Filtros Morfológicos
- ✓ Canny
- ✓ Empleando Redes Neuronales
- ✓ Laplaciano
- ✓ LoG
- ✓ Gradiente
- ✓ DoG
- ✓ Momentos Estadísticos ^[11-14, 16-19]

El último método es el que mejor se ajusta a las características generales que se aprecian en las foto-micrografías, además de la relativa facilidad de umbralizar.

Para este punto se debe tener claridad en dos cosas, la primera: todo detector de borde esta ligado a una etapa posterior de thresholding (de alguna forma) y la segunda: la mayoría de las veces, por no decir todas, los detectores de borde requieren de un filtrado de la imagen antes de pasar el detector. Por lo tanto es necesaria una etapa de filtrado previa a la detección del borde o segmentación.

Al hablar de filtrado, implícitamente se hace referencia a hacer una convolución entre una imagen y un filtro gaussiano y/o de media y/o de mediana y/o *low and high filter*, etc., o algún filtro en el dominio de la frecuencia wavelet, o por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT), etc. Pero se debe hacer advertencia que este tipo de filtros son de naturaleza lineal, en otras palabras no hacen distinción entre los bordes y el fondo. Para esto se hace necesario la aplicación de filtrado no-lineal.

Para la elección del filtro o filtros a implementar se estudiaron:

- ✓ *Adaptive local noise reduction filter*,
- ✓ *Adaptive median filter (AMF)*,
- ✓ *Double window-modified trimmed mean filter (DW-MTF)*
- ✓ *Local mean and variance contrast enhancement (Wiener)*
- ✓ *Minimum mean square error filter*
- ✓ *Adaptive window edge detection filter (AWEDF)* ^[20-25].

El resultado de este estudio concluyó con la elección del AWEDF para eliminar ruido de tipo gaussiano y/o uniforme que son los tipos de ruido mas comunes, y el AMF para ruido tipo sal y pimienta o impulsivo. El AWEDF tiene la opción de ajustar su nivel de filtrado, dependiendo de la zona en la imagen, auto-ajustándose para lograr una máxima preservación de los bordes, al tiempo que minimiza el ruido en la superficie de los granos en la imagen.

3.4 Filtro Adaptativo Implementado

Inicialmente se implementó el AWEDF tal como esta definido en la referencia 20 *Nonlinear Digital Filters, Principles and Applications* obteniendo buenos resultados,

y posteriormente fueron adicionados otros elementos que permitieron mejorar el filtrado. Dentro de estas mejoras se encuentran:

- Modificación de contraste adaptativo
- Modificación de brillo adaptativo
- Selectividad del grado de filtrado o pulimento digital
- Afilamiento de los bordes o enfoque.

Desde el punto de vista óptico, las adiciones hechas sobre la idea original del AWEDF le permiten al sistema enfocarse solo en los bordes de la imagen para que sean resueltos con mayor facilidad en la detección. La Figura 3.4 muestra un diagrama de bloques que permite entender el funcionamiento del AWEDF.

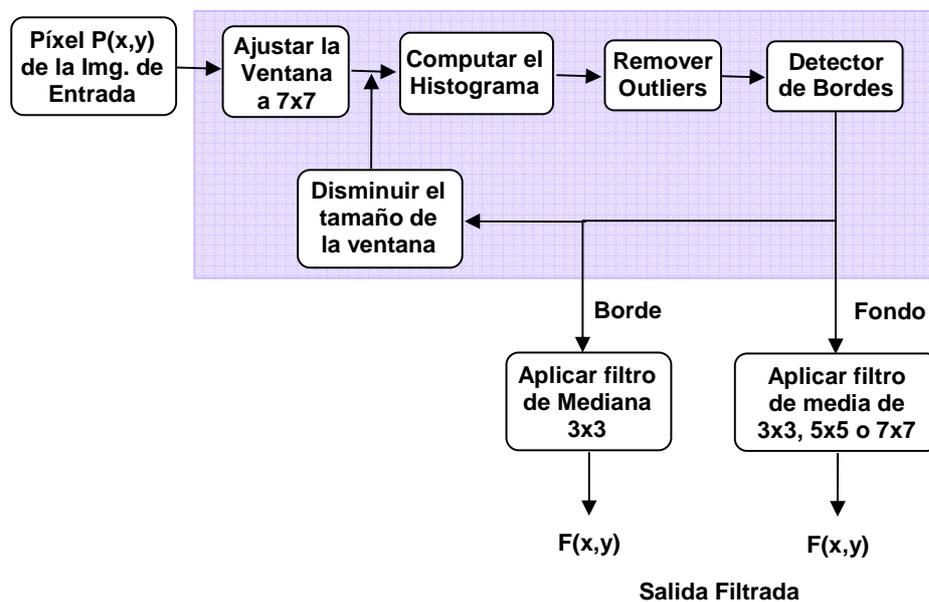


Figura 3.4. Diagrama de bloques del algoritmo general del AWEDF ^[20]

El AWEDF funciona de la siguiente manera. A medida que se realiza un barrido sobre la imagen, sobre cada píxel denominado $P(x,y)$ se ajusta una ventana de 7×7 píxeles con centro en $P(x,y)$. Seguidamente se calcula el histograma de la

ventana para detectar píxeles outliers o ruido sal y pimienta (por su naturaleza de alta frecuencia, los outliers se pueden confundir con bordes) y se eliminan. En la siguiente etapa se procede a detectar la presencia de posibles bordes en la ventana de 7x7.

Si existen bordes en la ventana de 7x7 se procede a disminuir el tamaño de la ventana a 5x5 y si nuevamente se detectan bordes se disminuye a 3x3. Cuando la ventana es de 3x3 píxeles y se detectan bordes, se asume que el píxel P en la posición (x,y) corresponde a un píxel de la frontera de grano y se procede a convolucionar un filtro de mediana de 3x3 y esta sería la salida del filtro.

Por otra parte si no se detectan bordes, se asume que el píxel P en la posición (x,y) corresponde a un píxel del fondo, o de la superficie de los granos, por lo tanto se procede a convolucionar un filtro de media del tamaño actual de la ventana, arrojando así la salida del filtro cuando el píxel corresponde al fondo.

La diferencia sustancial entre el AWEDF y el filtro implementado radica en la etapa de salida del segundo frente al primero. Se tomó la misma etapa para discriminar si el píxel P(x,y) pertenece al grano (fondo) o a la frontera de grano (borde), pero la salida $G(\alpha, \beta, \xi, \varphi)$ definida en la ecuación 3.1 está regida por cuatro variables que permiten modificar contraste α , brillo β y el grado de filtrado o pulimento digital ξ , φ se define como un parámetro del filtro. De esta forma la salida realza aun más los detalles en la imagen.

$$G(\alpha, \beta, \xi, \varphi) = \alpha [\varphi(x, y)] + \beta + \xi [P(x, y) - \varphi(x, y)] \quad (\text{ec. 3.1})$$

donde α , β , ξ , φ son parámetros del filtro y P(x,y) es el píxel de interés ^[21].

Por último, a la salida se le aplica un operador morfológico que permite afilar los bordes suavizados por causa del filtrado, al tiempo que combate la saturación en

la imagen ^[21]. La Figura 3.5 muestra esquemáticamente lo enunciado anteriormente.

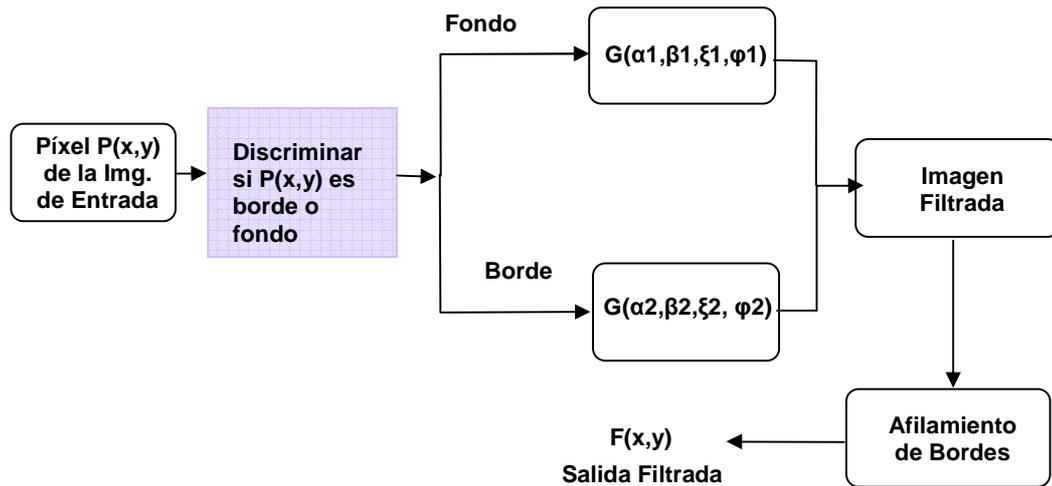


Figura 3.5. Diagrama de bloques del algoritmo general del AWEDF modificado

3.5 Resultados del Estudio en Imágenes

Para tener idea del nivel de ruido, se extraen de las imágenes 3.6, 3.7 y 3.8 perfiles de línea (Figuras 3.9, 3.10 y 3.11) correspondientes a la imagen original, salida de un filtro gaussiano y salida del filtro AWEDF modificado (AWEDFm), respectivamente.

La imagen de muestra (Figura 3.6) muestra un mal pulimento reflejado en el nivel de gris discontinuo que no permite diferenciar claramente las frontera de grano y los poros. Esto crea ruido en la detección de borde. La Figura 3.7 muestra la imagen después de la aplicación de un filtro lineal, gaussiano de 7x7 para obtener máximo filtrado. De una comparación directa entre las Figuras 3.6 y 3.7, se observa que el ruido por mal pulimento ha sido disminuido, observándose una superficie continua, pero con bordes borrosos. No obstante, la aplicación de un

filtro AWEDFm (Figura 3.8) disminuye aun mas el ruido preservando simultáneamente los bordes.

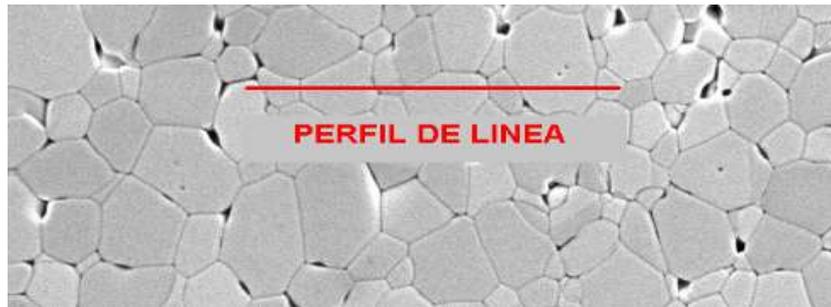


Figura 3.6. Imagen de Muestra. En ella se aprecia un mal pulimento.

Una forma mas cualitativa de análisis de la salida de los filtros se observa en las Figuras 3.9 – 3.11, donde se grafica el perfil de línea. Este gráfico resulta de recorrer la línea elegida en una fila tal de la imagen extrayendo el nivel de gris de cada píxel (intensidad).

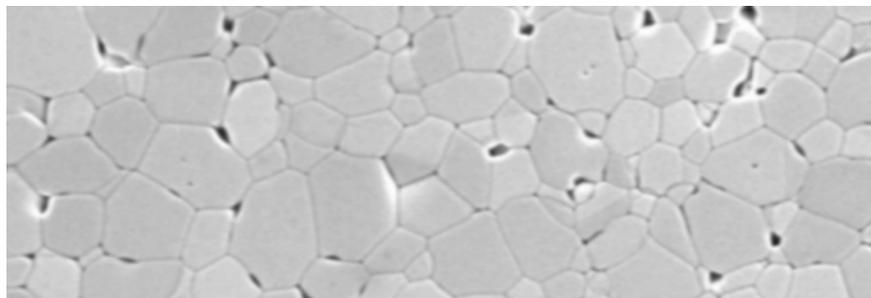


Figura 3.7. Salida del filtro Gaussiano de 7X7, claramente se observan bordes borrosos, pero el ruido ha sido eliminado (superficie continua).

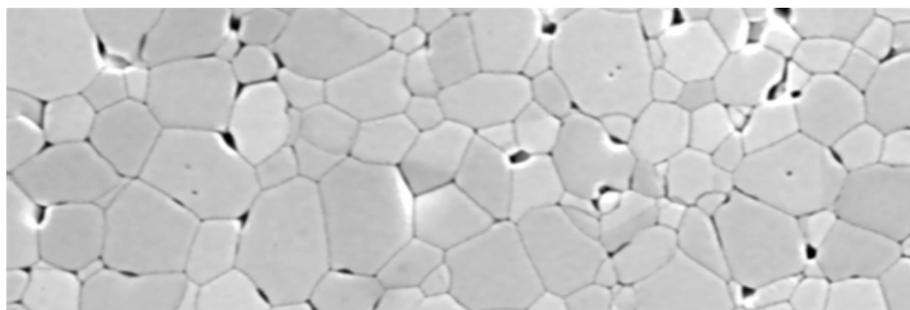


Figura 3.8. Salida del AWEDFm, se aprecia un fondo liso y bordes preservados.

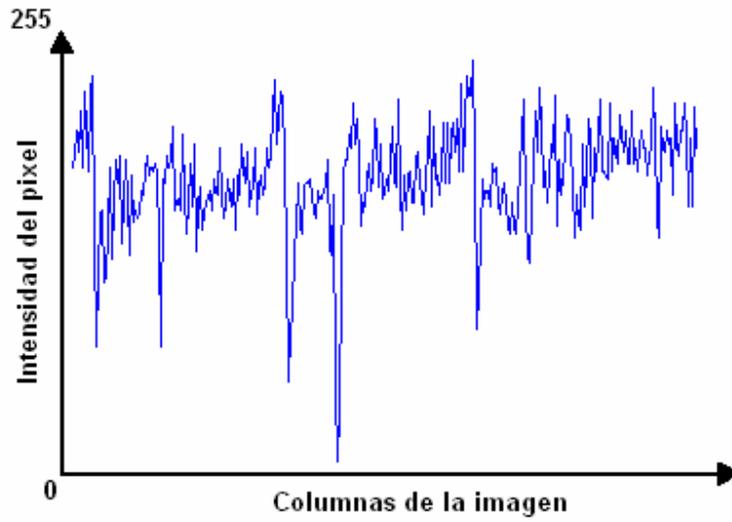


Figura 3.9. Perfil de línea de la imagen original

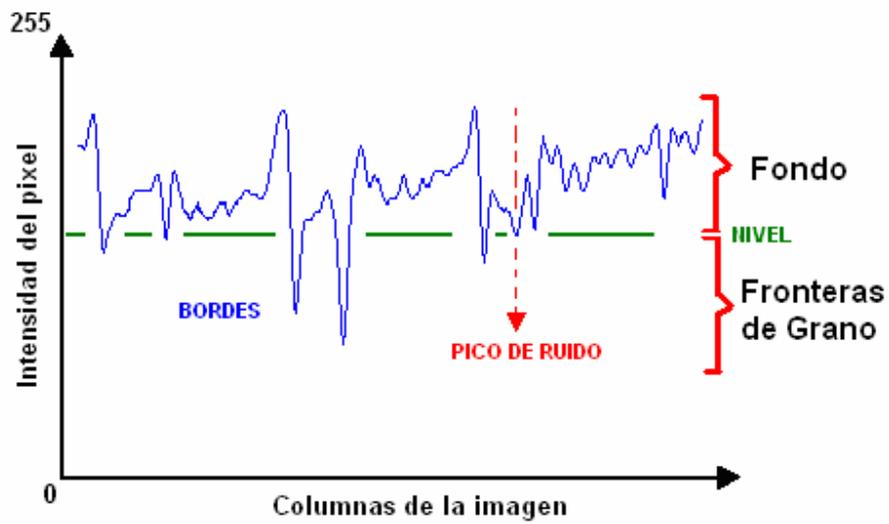


Figura 3.10. Perfil de la salida del filtro Gaussiano de 7 x 7, no se pueden ubicar con certeza ciertos picos

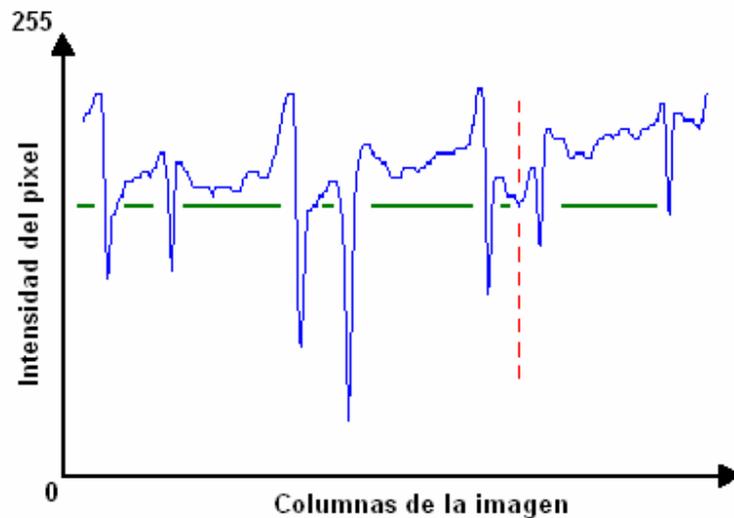


Figura 3.11. Salida del AWEDF, nótese la diferencia de las intensidades de los picos reales y la erosión de los falsos picos

La información registrada en las Figuras 3.9 – 3.11 es una representación continua de las imágenes (espacio discreto) de las Figuras 3.6 – 3.8. La línea de nivel (en verde) corresponde a la máxima intensidad de ruido en el intervalo de columnas correspondiente al perfil de línea analizado.

De los gráficos se observa la diferencia entre los filtros lineales y no lineales. Gracias a este filtrado, la segmentación de los bordes se hace más notoria, las regiones son más diferenciadas, lo que hace más fácil su detección, lo que se aprecia fijándose en los picos de las Figuras 3.9, 3.10, 3.11.

Una forma sencilla de ver lo provechoso que resulta el uso del filtrado no lineal es observar las líneas de color verde y rojas en las Figuras 3.10 y 3.11. La línea roja simboliza un pico de ruido que no fue eliminado tras el paso del filtro gaussiano en la Figura 3.10. Por el contrario en la Figura 3.11 claramente se ve la disminuida intensidad del mismo pico. Finalmente, con la ayuda del nivel marcado con la línea verde, se aprecia que la intensidad del ruido alcanza niveles iguales a la de los picos reales en la Figura 3.10, por lo cual en la etapa de segmentación se

detectará ruido. Por otro lado, en la Figura 3.11 el contraste entre el fondo y los picos es muy bueno y no habrá detección de ruido.

Se debe hacer hincapié en la importancia de la etapa de filtrado debido a la dificultad que presenta una **correcta preparación de la probeta**, traducido esto como la presencia de bordes fuertes y granos lisos en la imagen, o en otras palabras, superficies que presenten reflexión especular.

Otra manera de comparar la eficiencia de los filtros es observar la salida tras la aplicación de un detector de borde cualquiera. Para este caso en particular se utilizó el Laplaciano. En la Figura 3.12, a) da cuenta de la gran intensidad del ruido y la necesidad de la aplicación de algún tipo de filtrado. En b) se muestran bordes débiles y en general, bajo contraste en la imagen debido a que el filtrado lineal no hace distinciones entre el fondo y los bordes, mientras que en c) se aprecia un contraste mucho más alto con baja detección de ruido.

Una vez obtenida la salida del filtro pasabajos (elegido el filtro AWEDFm), se procede a la segmentación del borde. Para esto se compararon cada una de las salidas de los distintos detectores candidatos a elección. Comparando por ejemplo la salida del Laplacian of Gaussian (LoG) y la del detector por momentos estadísticos (DME) (ver las imágenes 3.13 y 3.14, siguiente página) se ve claramente la mayor sensibilidad al ruido del primero respecto al segundo, así se eleve el nivel de *threshold* al punto de comprometer la detección de muchos segmentos de los bordes. Algo para resaltar es la fácil determinación del nivel de *threshold* del DME respecto a los otros detectores de borde, ya que, nuevamente este no depende sólo del nivel de gris del píxel, sino de lo que este representa respecto a sus vecinos.

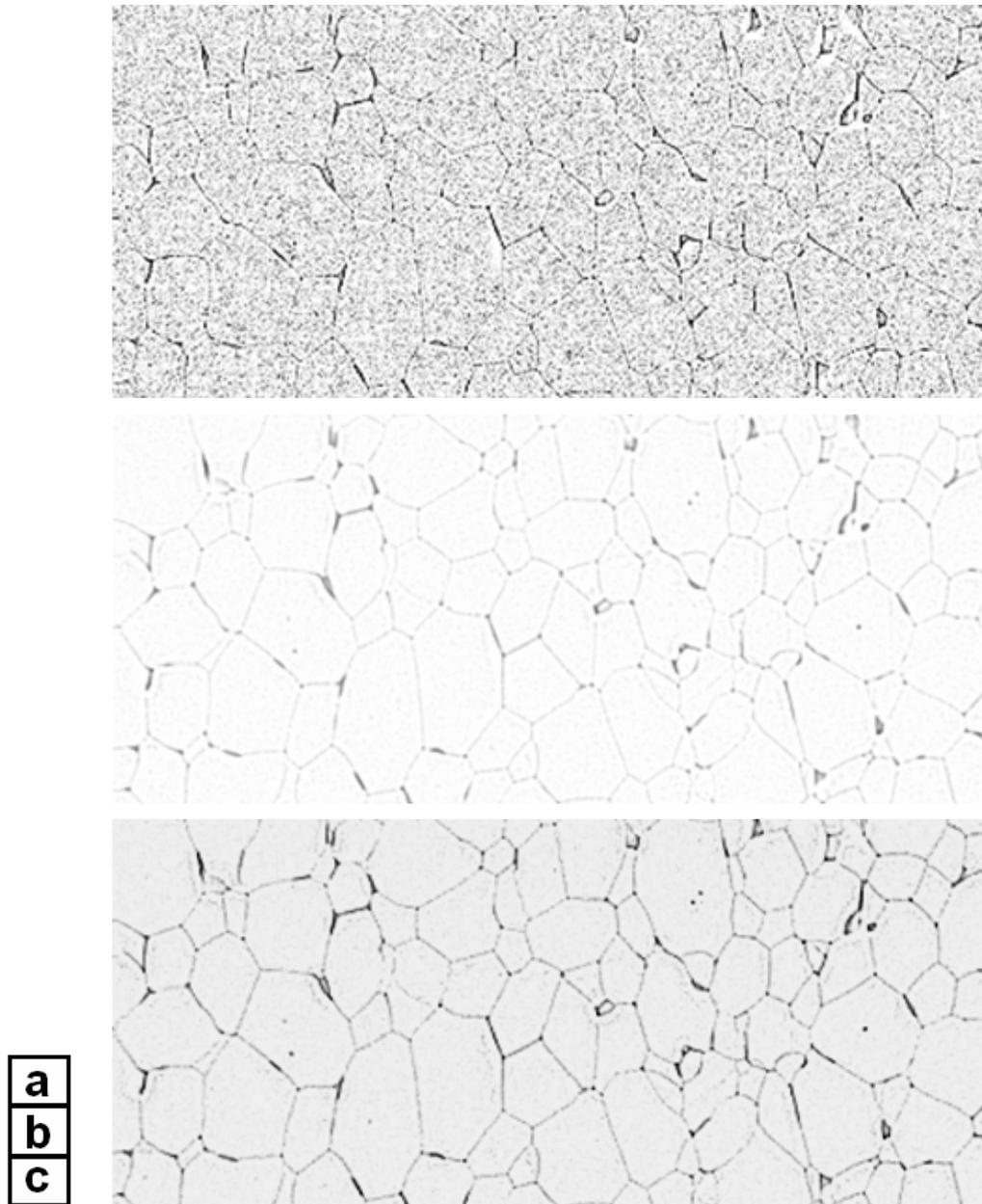


Figura 3.42. a) Salida del detector de borde de la imagen original, b) Salida para la imagen filtrada con Filtro Gaussiano, c) Salida para el AWEDF con borde fuertes. Las imágenes han sido invertidas.

En la Figura 3.13 se aprecia una alta detección de información parásita tras el paso del LoG, la cual necesita un número elevado de procesos morfológicos para ser eliminada, en contraste con la detección mucho mas limpia del DME mostrada en la Figura 3.14.

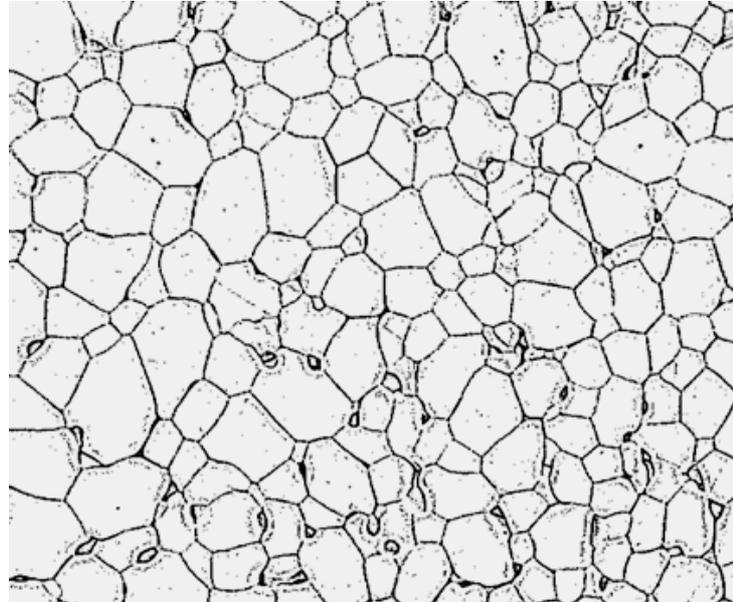


Figura 3.53. Salida del LoG (*Laplacian of Gaussian*), se aprecia detección de mucha información parasita que entorpecerá el análisis.

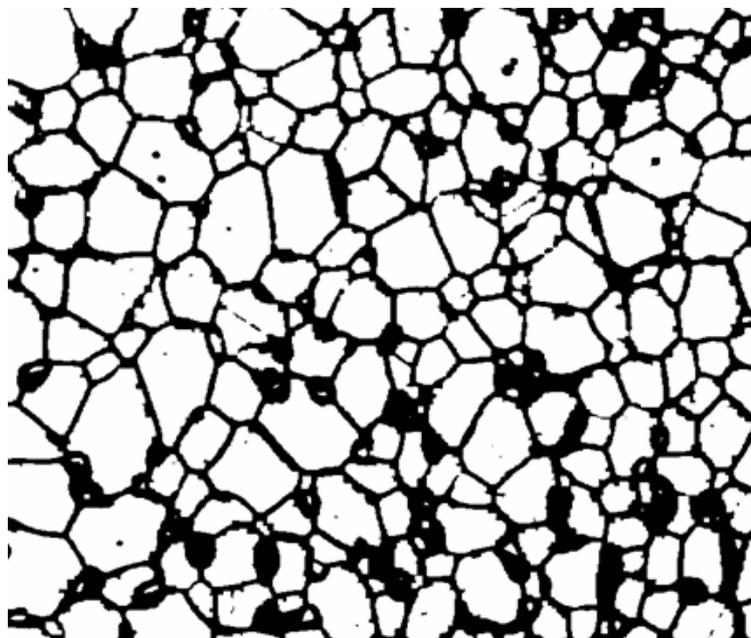


Figura 3.6 Salida del DME, detección más limpia en comparación con el LoG.

3.6 Morfología Matemática y Localización del Borde

Como se ha comentado anteriormente, la morfología matemática es una poderosa herramienta que, específicamente para este caso, permite mejorar la apariencia de las áreas segmentadas para su posterior análisis.

La Figura 3.15 es un esquema general de los procesos morfológicos que llevan al mejoramiento de la imagen segmentada, arrojando una imagen libre de información parasita, en donde el borde de los granos tiene el grosor de un píxel. Como primer proceso se encuentra el adelgazamiento, el cual consiste en reducir los bordes detectados en la etapa de segmentación, de tal forma que su grosor sea equivalente a un píxel.

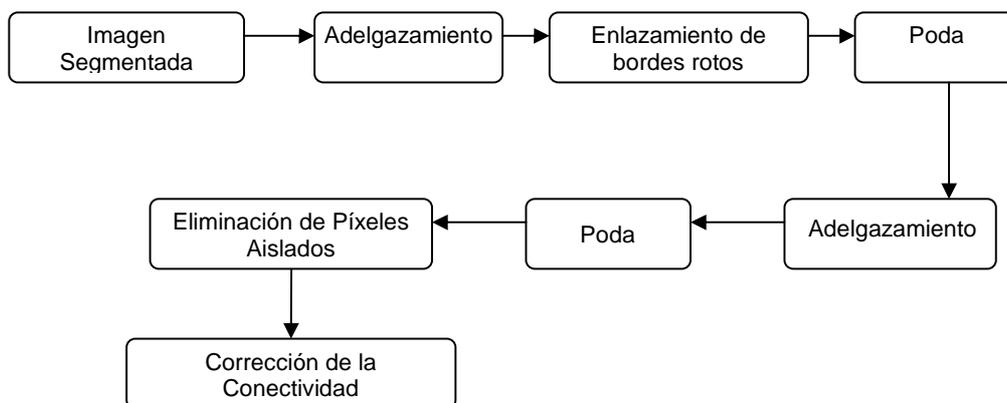


Figura 3.75. Procesos morfológicos que se siguen para localizar el borde

La Figura 3.16 es un ejemplo del proceso de adelgazamiento. Como se aprecia, luego de la operación de adelgazamiento quedan residuos, los cuales tienen formas similares a las de las ramas en los árboles, por lo cual se hace necesario aplicar una operación morfológica para eliminar dicha información, esta operación es denominada *poda*.

Se debe tener en cuenta que las “ramas” pueden indicar la presencia de un borde roto, por lo cual antes de podar los bordes, se realiza una etapa de *enlazamiento* o corrección de bordes rotos. La Figura 3.17 muestra la combinación de las operaciones de enlazamiento y poda.

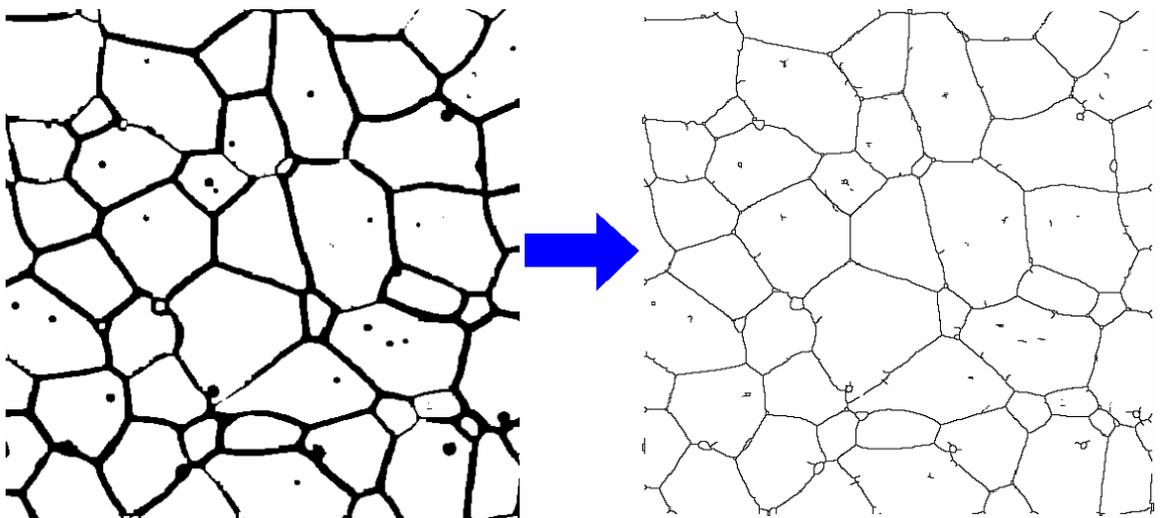


Figura 3.86. A la izquierda, imagen Segmentada. A la Derecha resultado del adelgazamiento a la imagen segmentada.

Luego de la aplicación de estas dos operaciones, la imagen toma cada vez más la apariencia deseada, aunque aun se nota información no deseada para el análisis de los granos.

Para eliminar la información no deseada, se realiza nuevamente una etapa de adelgazamiento y poda, obteniendo así una imagen en la cual la información parásita tendrá la apariencia de un píxel aislado, por lo cual se hace necesario aplicar una operación de “Eliminación de píxeles aislados”. El resultado es una imagen limpia similar a la muestra en la Figura 3.18, en la cual solo están presentes los bordes de los granos.

La etapa de morfología matemática finaliza con la “Corrección de la conectividad” como su nombre lo indica, asegura que los objetos en la imagen tenga

conectividad 8 ^[12-14], ya que luego de esta etapa lo que se hace es extraer de la imagen partícula por partícula para su análisis morfométrico.

Si el lector desea más información sobre la *Morfología Matemática*, se sugiere la lectura de la referencia [22].

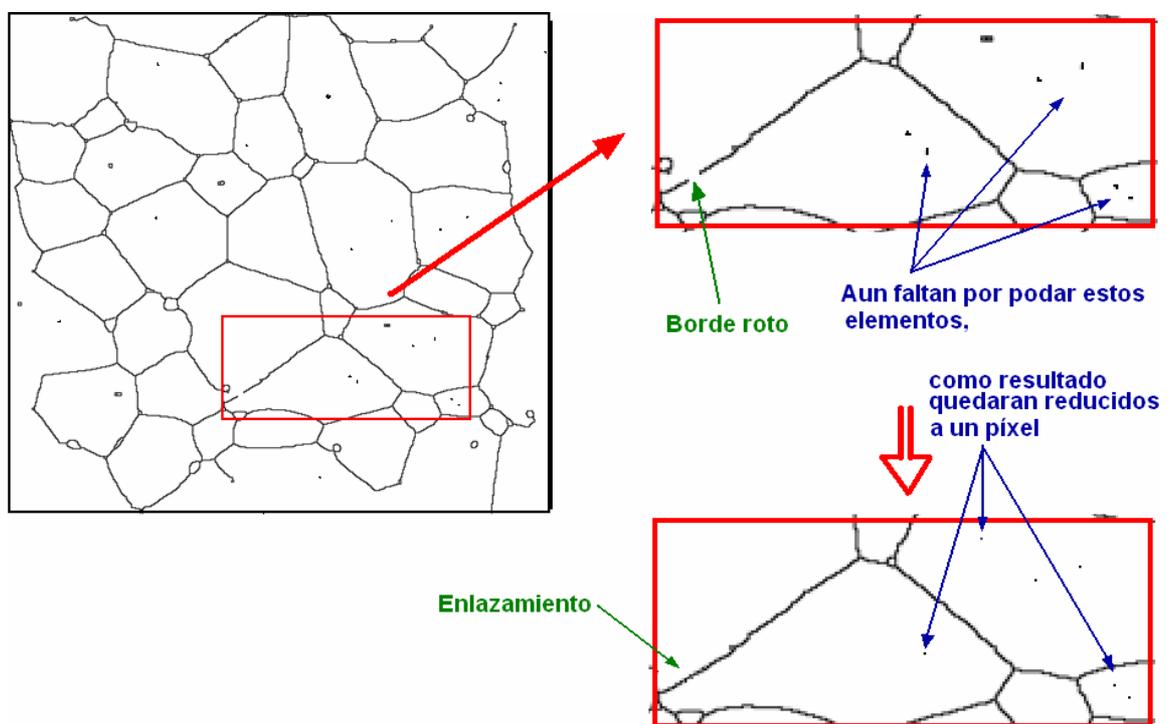


Figura 3.9 Procesos de enlazamiento y poda para disminuir la información parásita al tamaño de un píxel.

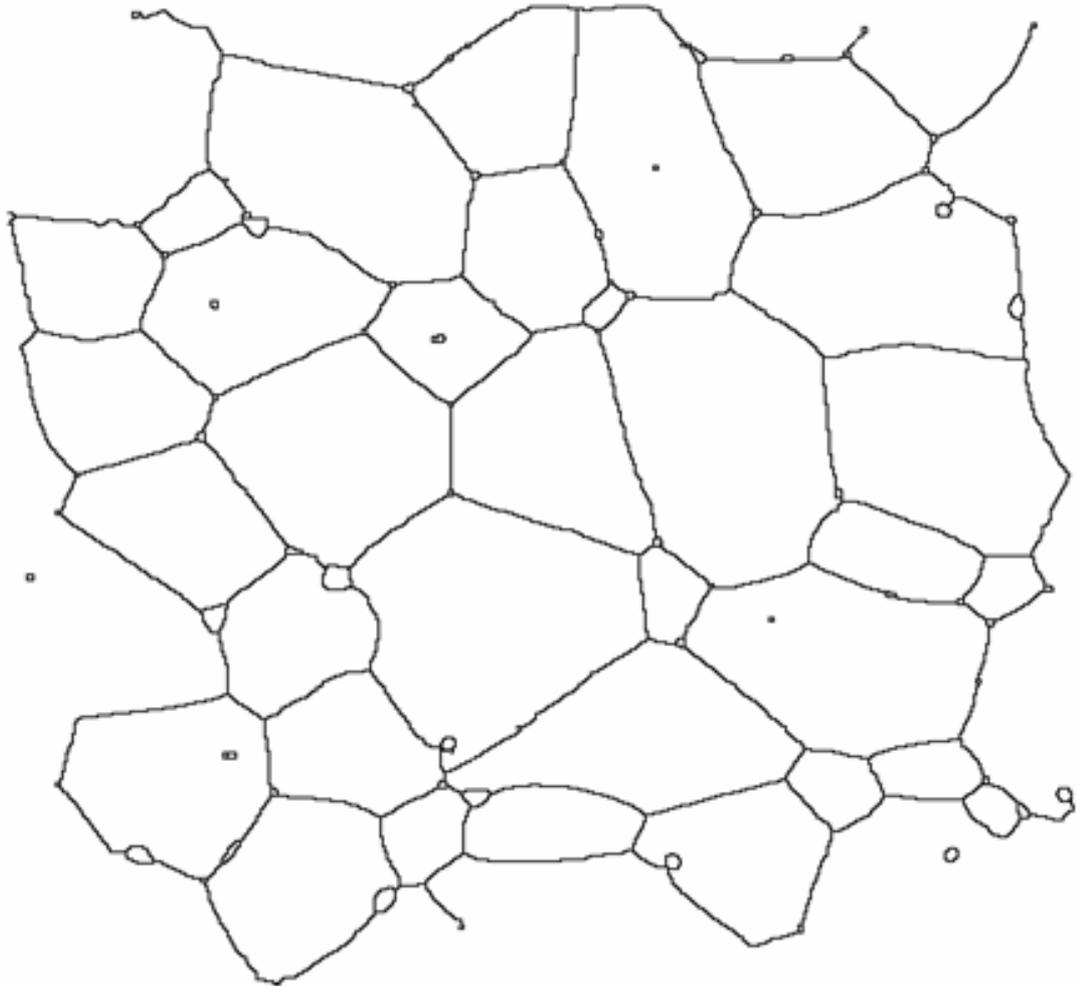


Figura 3.108. Eliminación de píxeles aislados. Como se observa en la imagen la información parásita ha sido eliminada y se ha corregido la conectividad.

4 Análisis de Imagen Aplicado a la Determinación de la Microestructura Cerámica.

Generalmente los sistemas de procesamiento de imágenes finalizan con el análisis de las regiones de interés segmentadas y tratadas previamente, y con el despliegue de los resultados obtenidos tras el análisis. En esta etapa se extrae la información que sea relevante o necesaria de la imagen, para un estudio en particular.

Esta etapa es tal vez donde se diferencia este sistema de extracción de características microestructurales con los demás software que se encuentran actualmente en el mercado o que se puedan tomar como antecedentes, ya que en este trabajo los métodos de medidas han sido propuestos en respuesta a la búsqueda de medidas confiables en cortos tiempos de análisis, eligiendo los descriptores de medidas adecuados para que esta herramienta le entregue al investigador las armas necesarias para un análisis detallado. Cabe anotar que unos de los paradigmas que se emplean en procesamiento de imágenes es la obtención de medidas, tediosas de hacer manualmente, en cortos tiempos de análisis, dejando a un lado la precisión de las medidas.

De esta manera, este sistema nace como respuesta a la necesidad del grupo CYTEMAC por mejorar los métodos que emplea en el análisis de este tipo de imagen y a su vez en proponer un método de medida que supere los métodos tradicional encapsulados en la normas ASTM E112 y ASTM 1382.

4.1 Algoritmo para el Análisis de las Micrografías

Una vez obtenida la imagen de salida tras la etapa de morfología matemática, se procede a seguir el siguiente algoritmo:

1. *Determinar el área de interés para analizar:* Se determina en la imagen un área en la cual solo se tienen en cuenta las partículas (granos y poros) que están completas dentro de la imagen, esto para evitar la introducción de error en las medidas, ya que en un grano incompleto la incertidumbre de su forma y tamaño se hace infinita.
2. *Extraer las partículas en la imagen:* Se extrae grano por grano y poro por poro para determinar sus características por medio de descriptores de medida, la Figura 4.1 y 4.2 muestra algunos ejemplos.

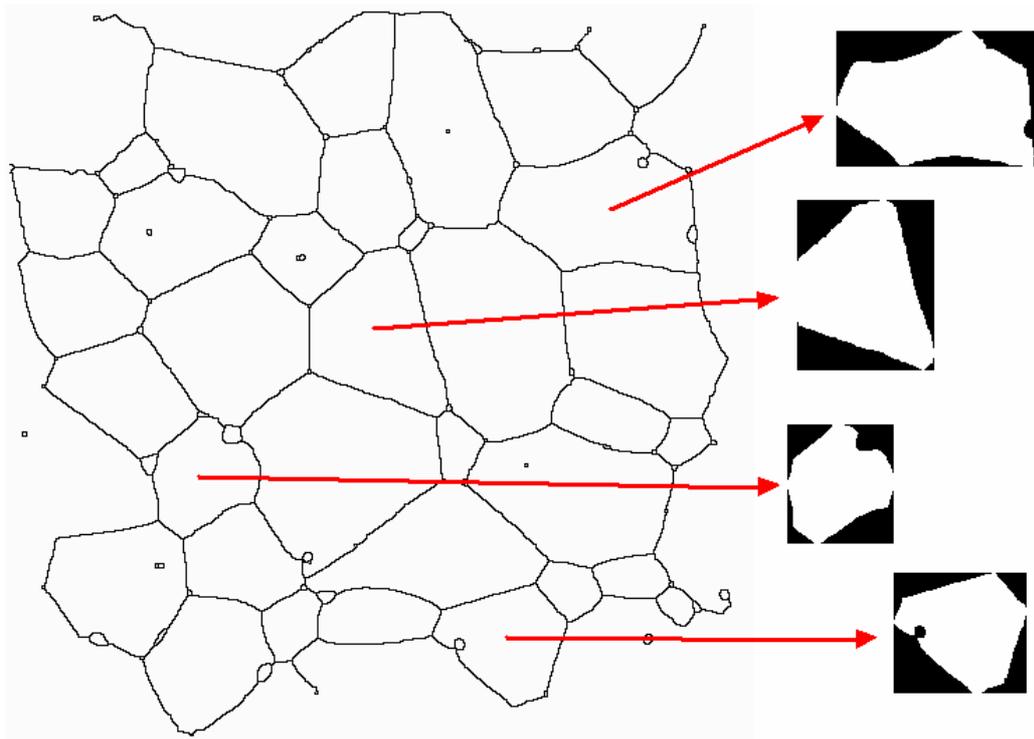


Figura 4.1. Extracción de los granos de la imagen de salida de la etapa de morfología matemática

Hay que aclarar que existen tres tipos de partículas¹, *los granos, los poros dentro de los granos y los poros en los intersticios*, por lo tanto se deben clasificar y medir por separado. En la Figura 4.2 por ejemplo, están segmentados poros dentro de

¹ Denominando partícula las diferentes especies en la imagen: granos, poros dentro de los granos y en los intersticios.

los granos y poros intersticiales en una misma imagen, por lo cual solo se extrae, en un caso, un tipo de poro, los intersticiales para los señalados con las flechas rojas, y en otro caso los que están encerrados en los recuadros amarillos para los poros dentro de los granos.

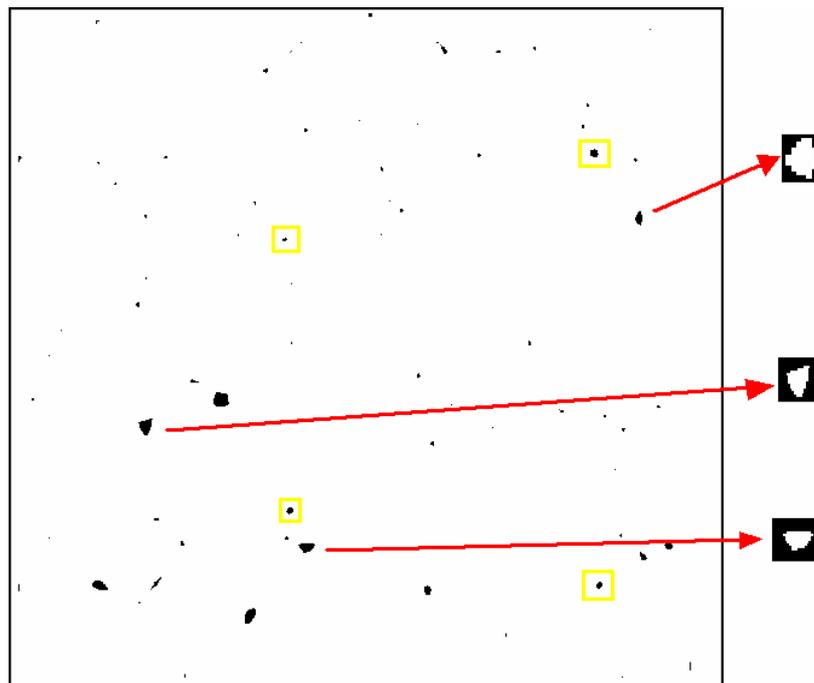


Figura 4.2. Extracción solo de los poros intersticiales o los señalados con las flechas en rojo.

3. *Medir las partículas extraídas:* Una vez extraídas, se procede a medir las partículas de acuerdo con los parámetros descritos en la siguiente sección.
4. *Guardar las características para ser desplegadas posteriormente:* Todos las medidas realizadas sobre las partículas serán guardadas en un archivo tipo de dato MS-Excel o *.xls, y en una imagen donde se despliegan los granos analizados, similar a la Figura 4.3.

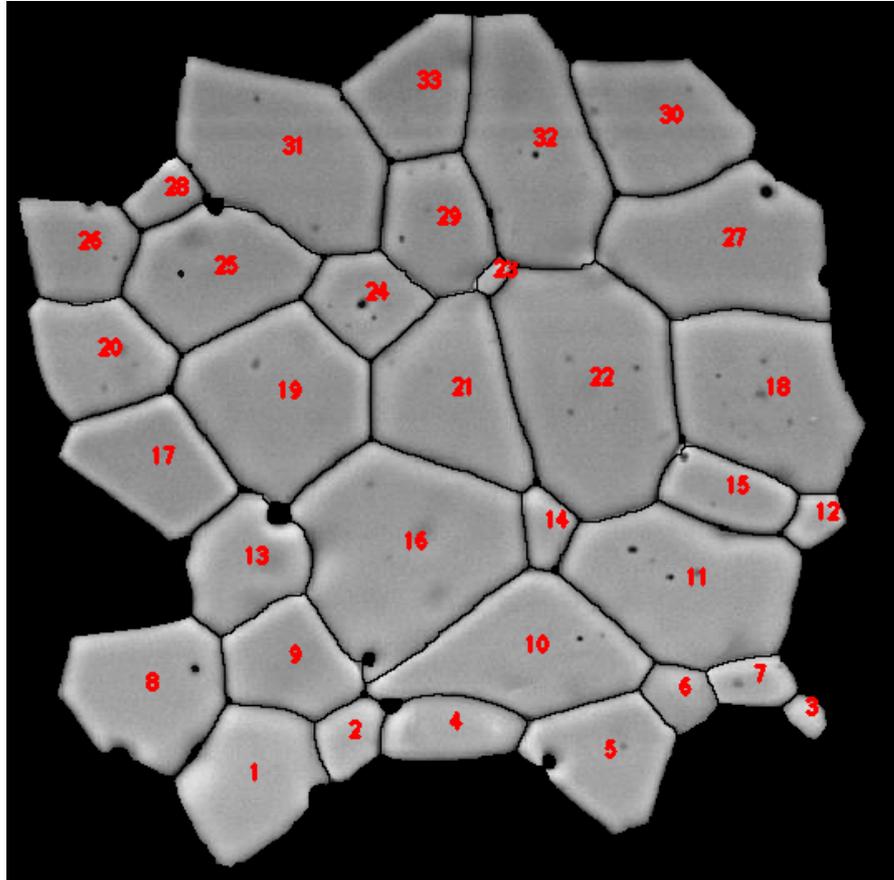


Figura 4.3. Imagen donde se muestran los granos analizados, así como el área de interés analizada.

4.2 Medidas en el Análisis de Imagen Aplicado a la Determinación de la Microestructura Cerámica

Los parámetros de medida que describen los elementos analizados pueden ser de mayor o menor grado de utilidad para el analista, esto depende exclusivamente del tipo de estudio que se desee hacer, los alcances de este y de los propósitos del mismo. Generalmente, en procesamiento de imágenes se clasifican los descriptores de medida en dos grandes grupos, los descriptores morfométricos o geométricos y los descriptores densitométricos ^[19, 23-25].

➤ **Descriptores de los Parámetros Morfométricos de Objeto** [19, 23-25].

Los parámetros de objeto son aquellas medidas que se realizan sobre cada uno de los objetos dispuestos en un campo en común, por ejemplo, las partículas extraídas en la Figura 4.1. En este trabajo se utilizaron los siguientes descriptores.

En la extracción de información de cada grano se emplearon:

Área: Área de un píxel previamente calibrado multiplicado por el número total de píxeles encerrados dentro del contorno del elemento analizado².

Perímetro: Longitud del contorno del elemento analizado.

Tamaño de Grano: Se mide de diferentes formas, en este trabajo se define como el promedio de la longitud de varios ejes que pasan por el centro de masa, que comienzan y terminan en el contorno de cada grano analizado. Dentro de los ejes empleados están el eje mayor, que también se denomina diámetro o la longitud de la recta más larga que pasa por el centro de masa, acotada entre dos puntos del contorno, y el eje menor o la longitud de la recta más corta que pasa por el centro de masa acotada entre dos puntos del contorno.

Con el fin de obtener un error porcentual inferior al 5% en las medidas, se determinó que eran necesarios como mínimo seis ejes bien distribuidos entre los ejes menor y mayor, por lo tanto el algoritmo de medida garantiza una medida confiable de tamaño de partícula siempre y cuando esta haya sido bien segmentada. Por otra parte, debido a la digitalización las medidas de longitud deben ser corregidas mediante factores de corrección que dependen del ángulo de inclinación de los ejes. Por

² Relativamente el área de cada grano también puede ser vista como una medida de campo.

ejemplo, cuando se mide una distancia entre dos puntos que forman una línea recta con pendiente 1, el factor de corrección será igual a $\sqrt{2}$, mientras que si la pendiente de la recta es 0, el factor de corrección será igual a 1.

La Figura 4.4 a) muestra gráficamente la posición de los ejes para la partícula allí segmentada. La Figura 4.4 b) es una interpretación gráfica del método el cual modela el grano en estudio como un promedio de varias partículas con simetría circular cuyo diámetro (de la respectiva circunferencia) es el tamaño de cada partícula modelada. En b) están señaladas las circunferencias de color rojo, verde y azul para tres ejes.

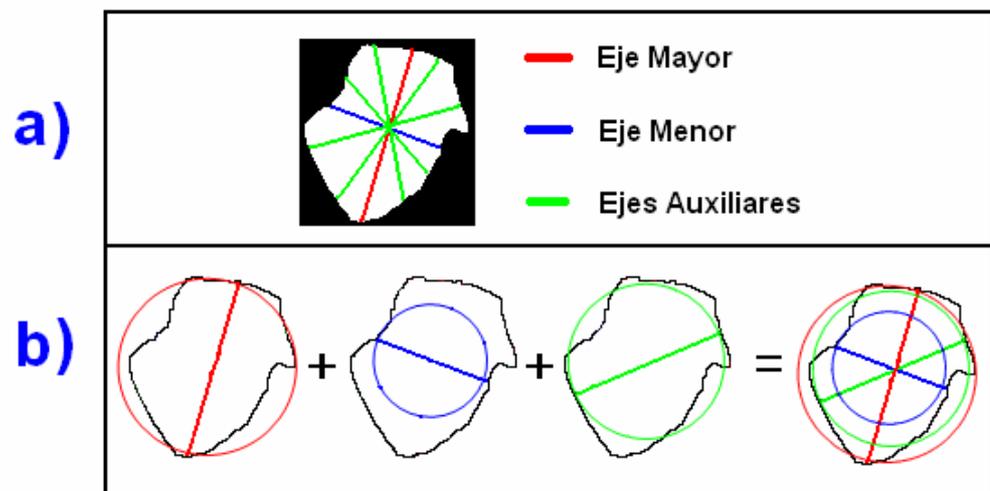


Figura 4.4. a) Ubicación de los ejes de medida en la partícula segmentada. Como se puede observar en la imagen, los ejes presentan diferentes grados de inclinación. b) Una interpretación gráfica del método para tres ejes, *rojo* para el eje mayor, *azul* para el eje menor y *verde* para 1 eje auxiliar.

Factor de Redondez: Factor de forma que está alrededor de uno y asigna uno al círculo. Este factor es la conocida relación entre el perímetro al cuadrado y el área.

Excentricidad: En este trabajo se define como el cociente entre la longitud eje mayor y la longitud del eje menor de la partícula.

Número de Poros Dentro del Grano: Total de poros que se detectaron dentro del grano analizado.

Tamaño Promedio de los Poros Dentro del Grano: Promedio del tamaño del total de poros que se detectaron dentro del grano analizado.

Aunque no se desplieguen en los resultados que entrega el sistema, se emplean otras medidas objeto que permiten llegar a los descriptores señalados anteriormente, entre los que se destacan *los centroides, los momentos, los ejes mayor y menor, la orientación y otros ejes auxiliares que pasan por el centroide de cada grano.*

Para la extracción de información de cada poro intersticial se emplean los siguientes descriptores:

Área y Perímetro: Descritos anteriormente.

Tamaño de Partícula por medio del Diámetro del Círculo Equivalente: Diámetro de un círculo que tiene la misma área de la partícula medida. Este método es una simulación del método empleado en la medición del tamaño de grano, y funciona bien para áreas pequeñas y simetría circular.

En general para la superficie analizada (la superficie analizada no se debe entender como la superficie total de la imagen) se utilizan los siguientes descriptores conocidos como parámetros de campo.

➤ **Descriptores de las Parámetros Morfométricos de Campo** ^[24, 25]:

Las medidas de campo, a diferencia de las medidas objeto, hacen referencia a las medidas que se realizan sobre el *campo* o el área de trabajo o la superficie de interés a analizar en la cual están contenidos los objetos, típicamente en morfometría existen 3 medidas principales: el número de partículas, el área que ocupa una fase en la imagen y el perímetro que limita una fase en la imagen.

En este trabajo son tenidas en cuenta: **el área total que se analiza, el área que ocupa una fase, la densidad de poros intersticiales, la densidad de granos, el número de granos analizados y el número de poros intersticiales analizados y por último la distribución de tamaño de granos y de poros.**

La medición de la distribución de tamaño grano y poros, es otra cualidad importante en este trabajo, ya que con los métodos tradicionales de medida no se pueden obtener, en lugar de esta se podría obtener la distribución del tamaño medio de grano (tras el análisis de numerosas imágenes), teniendo en cuenta que con los métodos tradicionales no se podría obtener medidas de objeto, como el tamaño de grano, sino medidas de campo, como el *tamaño medio* de grano.

El estudio de la distribución de tamaño de partícula es de suma importancia en materialografía. Se sabe que entre otras, que el tipo de distribución también esta estrechamente ligado con las propiedades del material.

➤ **Descriptores de los Parámetros Densitométricos** ^[19, 25]:

El término densitométrico hace referencia a la medida de las cantidades lumínicas (de brillo) de los objetos, ya que uno de los principales parámetros medidos es la densidad óptica (absorción por unidad de distancia, para una longitud de onda dada). Los parámetros densitométricos establecen una relación entre el brillo de

un objeto y alguna propiedad física, química o biológica. Para este trabajo un ejemplo sería la claridad de los granos frente a la opacidad de los poros.

Se debe hacer claridad en que las imágenes procesadas provienen de un microscopio electrónico de barrido (MEB) y no de un microscopio óptico, por lo tanto hablar de brillo en la imagen resulta discordante, ya que en un MEB la información no proviene de fotones, sino de electrones, pero haciendo una abstracción de la definición de *densitometría* (valores en niveles de gris sea cual sea la naturaleza de la procedencia de la información), el término resulta encajar perfecto en la distinción o detección de otras fases presentes en las fotomicrografías.

Emplear el brillo en la imagen como parámetro de medida resulta delicado ya que, en el estudio realizado sobre las imágenes, se encontró que éste no solo depende de la composición química del material (que sería lo ideal), sino que también lo es entre otros, del pulimento de la muestra y de la preparación de esta antes de ser escaneada por el MEB, específicamente del recubrimiento de la muestra generalmente con oro.

Determinar el brillo de cada grano es en esencia una medida fácil de obtener, pero por lo anteriormente expuesto se deja como trabajo futuro, en el cual se pueda encontrar alguna relación más directa entre el brillo y alguna propiedad física o química.

Por otra parte la detección y análisis de segundas fases compete exclusivamente al analista, debido a que es una tarea difícil de realizar, sin embargo el sistema de extracción le entrega al analista las medidas con las cuales éste determina el porcentaje de cada fase en la superficie analizada.

4.3 Despliegue de los Resultados

Una vez finalizada la etapa de medición, se procede a guardar una imagen similar a la mostrada en la Figura 4.3, en la cual aparece un índice por cada grano analizado en la imagen. El sistema automáticamente despliega un diálogo de guardar archivo, en el cual se puede seleccionar la ubicación dónde guardar la imagen, al igual que el nombre con que se quiera guardar la imagen.

El índice de cada grano es importante, ya que junto con el reporte permite ubicar y seguir las medidas de cada partícula, además la base de cada índice indica la posición del centro de masa para cada grano, por lo cual se puede validar las medidas realizadas por sospechas en la veracidad de las mismas.

Una vez se ha guardado esta imagen, automáticamente se despliega otro diálogo de guardar archivo, esta vez para guardar el reporte de las medidas para cada partícula analizada. Esto se hace escribiendo un archivo en Excel, con una apariencia similar a la Figura 4.5, en el cual aparece información que describe el material analizado, la fecha del análisis y las medidas realizadas, fundamental para conservar la información de forma ordenada.

Con las medidas desplegadas en el reporte, el analista realiza el trabajo estadístico necesario para obtener medidas derivadas, por ejemplo, la distribución de tamaño de grano o de poro, el cálculo refinado del tamaño de grano promedio, o simplemente puede descartar por duda medidas entregadas por el sistema.

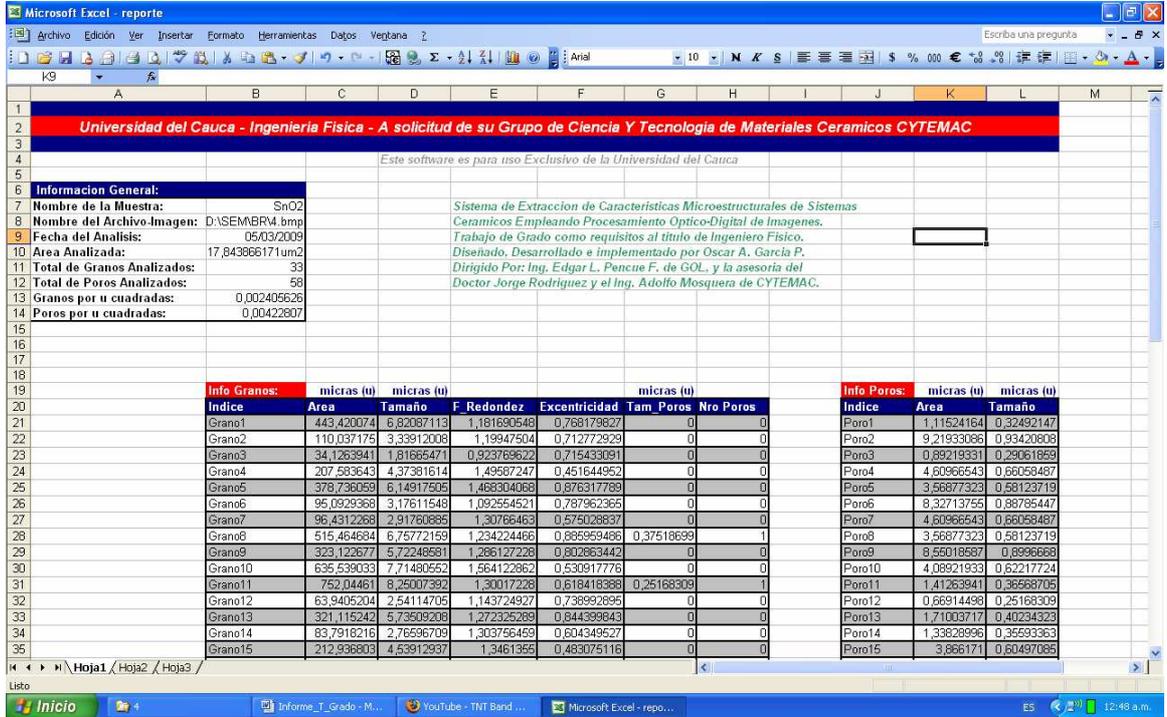


Figura 4.5. Aspecto del Reporte generado tras el análisis de la imagen.

5 Resultados, Análisis y Comparación con otros Software Comerciales

Una vez desarrollado y proyectado el procedimiento descrito en los capítulos anteriores, a continuación se presentan los resultados del trabajo, en consideración al logro de los objetivos planteados. Para esto, se hizo una amplia búsqueda con el fin de encontrar otros sistemas o software de medidas empleando imágenes o video digital.

En realidad no fue posible encontrar un software que incluyera todos los descriptores de medida que están contenidos en el sistema desarrollado en este trabajo, sin embargo, se encontraron varios software que realizan algunas de estas medidas por aparte e implementando otras metodologías, por ejemplo el tamaño de grano ASTM, el contenido de porosidad, y tamaño de partícula semiautomático.

Es importante mencionar que las medidas realizadas por la metodología propuesta fueron corroboradas con mediciones manuales, guardando todas las precauciones y comparadas con imágenes patrones. Al no contar con un patrón ceramográfico de medida bien establecido, se procedió a explotar la *ventajas* que tiene el sistema propuesto de *extraer partícula por partícula*, calcular cada *centro de masa*, etc. y corroborarlas con la inspección visual³. Además, se *desarrolló una metodología propia* que buscó encontrar factores de corrección en las medidas, debido a defectos introducidos por causa de la digitalización. En esta aplicación de la teoría de medida se encontró que luego de obtener bordes bien segmentados, las medidas contarán con un alto grado de fidelidad, sin embargo la descripción detallada de las medidas es otra *ventaja*, cuando se opta por omitir una muestra en aras de no afectar al promedio.

³ Se debe tener en mente que el mejor detector de bordes y formas con que cuenta la humanidad son sus propios ojos, su eficiencia es tal que construyen mentalmente los bordes donde ni siquiera los hay.



De acuerdo con los objetivos planteados en el anteproyecto, uno de los propósitos del trabajo era realizar una interfaz de usuario amigable, teniendo en cuenta los recursos computacionales con que en la actualidad cuenta el grupo CYTEMAC, por lo cual se codificó el algoritmo general en Visual C# Express, una herramienta poderosa con la cual mucha gente trabaja alrededor del mundo, debido a que la versión Express permite desarrollos con licencia libre.

El plataforma de programación C# permite diseñar elaboradas interfaces de usuario para ser cargadas bajo sistemas operativos Windows, tales como XP o Vista, justamente siendo el sistema operativo de mayor uso en la UNICAUCA. En este trabajo C# fue empleado exclusivamente en la interfaz hombre-máquina (*Shell*), pero el fuerte del trabajo, se realizó utilizando OpenCV.

OpenCV es poderosa y versátil librería diseñada ya hace algunos años exclusivamente para trabajar en procesamiento de imágenes y video por Intel. OpenCV puede ser llamada desde las plataformas de desarrollo mas comunes, como Dev-C, Matlab, Visual C++, C#, Linux, Pithon y Mac OS X. La ventaja de utilizar OpenCV respecto otras librerías como el ToolBox de Matlab para procesamiento de imágenes, o las librerías de Visual Studio para manejo de imágenes, es que OpenCV es de *licencia libre*, lo que permite su uso libremente para propósitos comerciales y de investigación, además de gestionar mejor la

información, tanto en manipulación como en acceso en cortos tiempos y en memoria, aunque los desarrollos en procesamiento de imágenes están generalmente codificados en Matlab.

El uso de OpenCV permite utilizar los algoritmos implementados en el sistema propuesto, de no contar con esta poderosa librería, difícilmente se hubieran implementado los algoritmos mas importantes, debido a que se necesitarían amplios tiempos para operar tal volumen de información.

5.1 Evaluación del Método de Medida Propuesto

Evaluar el método propuesto en este trabajo es importante ya que permite conocer los alcances del analizador, indicándole al analista confiabilidad en la herramienta. Para este fin se procedió a cargar diferentes imágenes patrones en el analizador desarrollado y a comparar las mediciones obtenidas con el patrón.

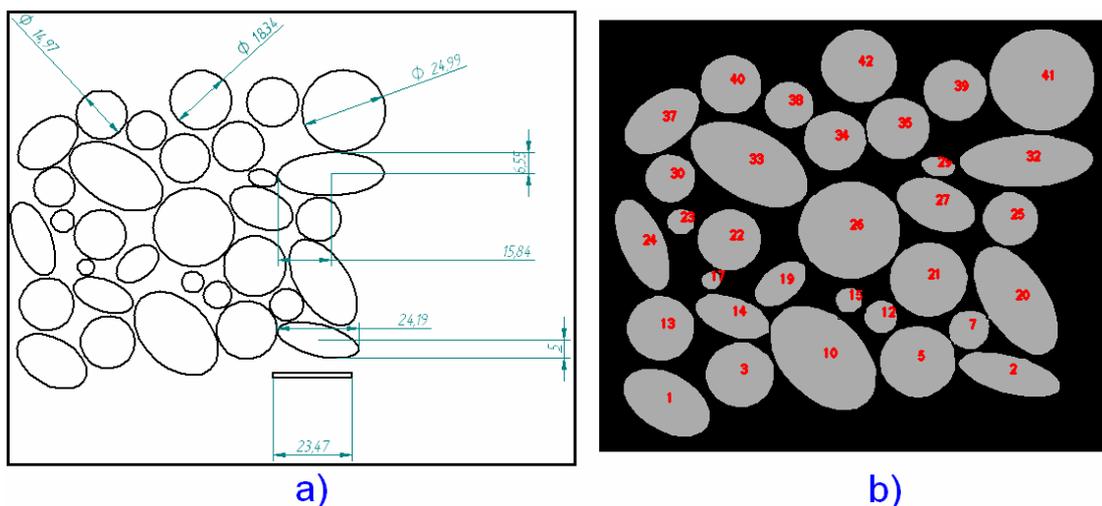


Figura 5.1. a) Una de las imágenes patrones empleadas para determinar la precisión de las medidas. b) Salida del analizador propuesto en donde se muestran las partículas analizadas.

Las imágenes patrones son similares a la mostrada en la Figura 5.1 a), en donde se aprecian dos tipos de partículas, circunferencias y elipses. La Figura 5.1 b) es

la salida tras el análisis del sistema desarrollado para la imagen 5.1 a). El hecho de que las partículas tengan simetría circular permite conocer la precisión del cálculo del promedio de los seis ejes empleados en la medida del tamaño y los factores de forma. Por otra parte la simetría elipsoidal de las demás partículas da cuenta de la precisión del cálculo de los ejes mayor y menor indicados en el descriptor de excentricidad. En la Tabla 5.1 se muestran los resultados más destacados de la comparación entre las medidas arrojadas por el sistema desarrollado y las imágenes patrones.

En la tabla se cotejan las partículas modeladas con simetría circular con respecto a la longitud del diámetro, esto porque es el parámetro que mejor ofrece una medida de alta precisión. De igual manera para el caso de las partículas modeladas con simetría elipsoidal, se comparó la excentricidad o el cociente entre el eje menor y el eje mayor, debido a que la excentricidad una medida derivada esto hace mas notorio el grado de precisión en la medida de los ejes mayor y menor.

Tabla 5.1. Comparación entre las medidas realizadas por el analizador y la muestra patrón

Grano - Simetría	Diámetro Patrón	Diámetro Analizador	Excentricidad Patrón	Excentricidad Analizador	Error Porcentual
1 - Elipse	----	----	0.61	0.61	0%
2 - Elipse	----	----	0.60	0.58	3.3%
3 - Circunferencia	15.77	15.79	----	----	0.13%
19 - Elipse	----	----	0.59	0.60	1.7%
26 - Circunferencia	23.71	23.11	----	----	2.5%
32 - Elipse	----	----	0.42	0.43	2.3%
37 - Elipse	----	----	0.61	0.62	1.6%
40 - Circunferencia	14.97	15.02	----	----	0.33%
41 - Circunferencia	24.99	24.85	----	----	0.56%
42 - Circunferencia	18.38	18.91	----	----	2.8%

Centrando el análisis en la columna de *Error Porcentual*, se observa un bajo nivel de error atribuido a la detección, localización de los bordes y a la digitalización. Este bajo nivel de error indica que las medidas calculadas por el analizador desarrollado son de alta confiabilidad, ya que las diferencias en las medidas son en su mayoría del orden de las centésimas de micras.

En rojo se muestran los valores de error porcentual mínimo y máximo, siendo el máximo 3.3%, pero este valor un poco elevado de error no indica que se haya realizado mal la medida sino que por causa de la segmentación se disminuyó un poco el área de la partícula detectada, tal vez en uno o en un par de píxeles. El criterio de la anterior afirmación se basa en la inspección visual de las partículas en la imagen patrón y en la imagen de detección, ya que al estar la imagen en un espacio discretizado se puede cuantificar fácilmente las áreas y las longitudes para luego ser comparadas.

La inspección visual en la mayoría de los casos resulta el método de determinación de precisión mas seguro gracias a la digitalización.

Una vez demostrada la precisión en la metodología que se emplea en el cálculo de las medidas, se procedió a determinar el nivel de detección de las partículas, ya que la detección es de quien realmente depende la precisión del analizador. Si no se detecta una partícula nunca será medida y si se detecta mal, pues será mal medida. Nuevamente se debe resaltar la importancia de una imagen bien tomada y una probeta bien preparada para no enmascarar la microestructura. Desde el punto de vista del procesamiento de imágenes, en la actualidad no se cuenta con desarrollos en ciencia e ingeniería que permitan emular la capacidad del ojo humano en la detección de bordes, por lo tanto estos deben estar bien definidos en las imágenes.

Para corregir esto, se implementaron varias herramientas que permiten:

1. Modificar la frontera de grano o el borde de los granos haciéndolos mas gruesos o mas afilados, con el fin de favorecer la detección.
2. Realzar los detalles de interés de la imagen por medio de la modificación del brillo y el contraste adaptativamente.

3. Unir bordes rotos.
4. Editar manualmente la imagen cuando definitivamente el sistema propuesto es incapaz de segmentar adecuadamente un área de interés.
5. Eliminar del reporte una partícula considerada como mal segmentada.
6. Combatir la saturación en las imágenes.

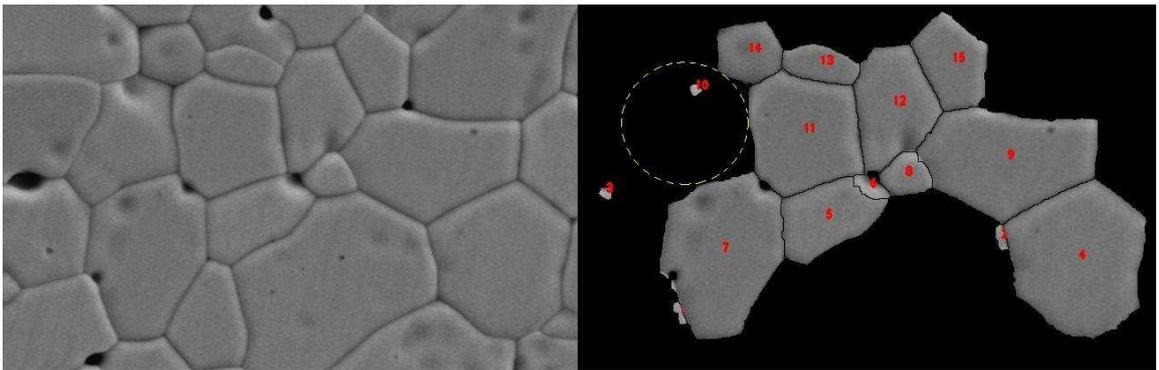


Figura 5.2. Salida de sistema desarrollado para la imagen de la izquierda.

Para ilustrar mejor la idea que se está presentando, se muestra la Figura 5.2, en la cual se observan los granos detectados y posteriormente analizados por el sistema propuesto. Como se ve en la imagen de la derecha, el sistema ha detectado muy bien algunos granos (granos 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13 y 15), pero a la vez ha detectado falsas partículas (granos 1, 2, 3 y 10) y debido a la saturación de la imagen se han detectado dos granos que en realidad corresponde a un solo (granos 5 y 6). Además de esto faltó un grano por analizar (señalado con línea punteada), esto debido a que físicamente tiene un borde roto. Nuevamente se hace hincapié en la preparación de la muestra. Analizando detalladamente la imagen de la Figura 5.2 se puede decir que se pulió adecuadamente la muestra, los poros están bien revelados, pero existen partes en las cuales la frontera de

grano no esta bien revelada, lo que causó que no se detectara una partícula. Por último, hay partes en la imagen saturada, lo que causó que se detectaran dos granos en vez de uno.

En la Figura 5.3 se observa la salida del sistema pero esta vez empleando las herramientas de edición que complementan la detección en la etapa de segmentación.

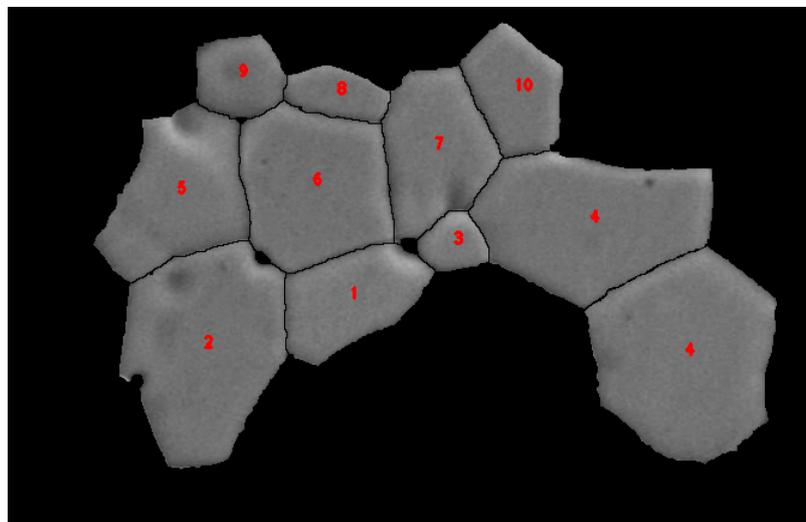


Figura 5.3. Salida del sistema complementando la detección por edición automática y manual.

Como se observa en la Figura 5.3, se logró combatir los defectos en la imagen que provocan falsas detecciones, mejorando la calidad del análisis.

5.2 Comparación de la Medida del Tamaño de Grano Promedio entre el método desarrollado y el IQMaterials

El IQMaterials es uno de los software más populares en el mundo, diseñado por la empresa *MediaCybernetics* ^[26], utilizado tanto en las industrias como en las instituciones de investigación para determinar el tamaño de grano ASTM para

diferentes muestras materialograficas. A nivel local lo distribuye la empresa *Soluciones Científicas*, de la ciudad de Cali, quienes enviaron una cotización a la UNICAUCA por valor de 31 millones de pesos, esto para conocer el valor que tiene actualmente en el mercado un analizador de imágenes en ciencia de materiales. Un asesor comercial de la empresa analizó en el IQMaterials diferentes imágenes de varios cerámicos, para conocer el tamaño promedio de grano ASTM. Estos resultados se muestran en la tabla comparativa 5.2. En el Anexo A se puede ver el aspecto del reporte entregado por el IQMaterials.

En adelante se hará referencia al analizador de ceramografías desarrollado como **AnaCe** y sus medidas arrojadas se tomaran como referencia, patrón o valor verdadero para calcular la diferencia porcentual entre los métodos, ya que anteriormente se demostró la alta precisión de la medidas arrojadas por el AnaCe.

Tabla 5.2. Medidas del tamaño de grano promedio

Muestra	Tamaño Promedio AnaCe (μm)	Granos Analizados por AnaCe	Patrón ASTM de prueba	IQMaterials Tamaño ASTM (μm)	Diferencia Porcentual entre los métodos
a	8.85	10	Círculos	10.5	18.6%
a	8.85	10	Líneas Diagonales	10.09	14.01%
a	8.85	10	Líneas Vertical.	10.65	20.3%
b	5.93	33	Círculos	14	136.1%
c	7.71	14	Círculos	10.92	41.6%
d	3.73	166	Círculos	13.01	248.8%
d	3.73	166	Líneas Horiz.	1.95	47.7%
d	3.73	166	Líneas Vert.	4.16	11.5%

Las muestras analizadas en la tabla 5.2 se muestran en la Figura 5.4. Como se puede ver, la diferencia entre los métodos es notoria, destacando como máxima diferencia **248.8%** y como mínima **11.5%**, sin embargo se debe tener en cuenta que este resultado es puede ser parcial y puede promediarse con otros resultados, por lo tanto seguramente el máximo puede bajar un poco y el mínimo subir un tanto mas, pero en ultimas estarán por encima del 10%, lo que indica un alto grado

de error. Estos resultados dependen fundamentalmente del patrón de prueba ASTM, en otras palabras, si se emplean líneas verticales, horizontales, diagonales o círculos. En general, el analista que usa el IQMaterials no tendría con que comparar sus resultados, por lo que tendría que emplear todos los patrones ASTM y luego computar el promedio de las medidas.

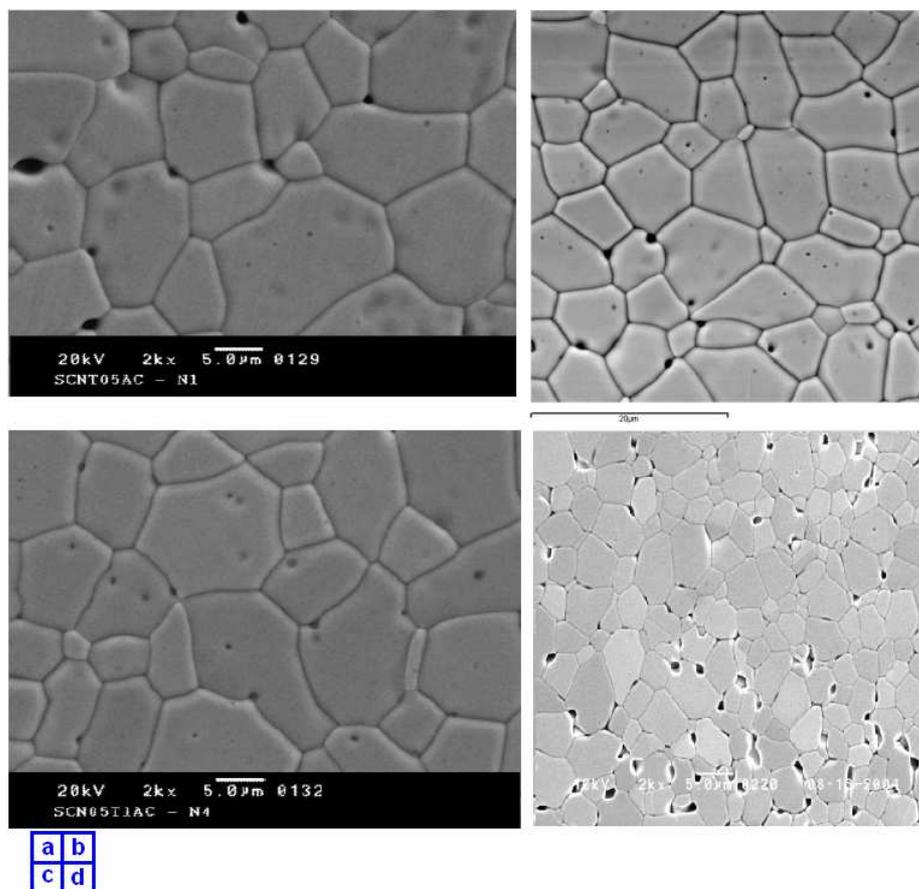


Figura 5.4. Muestras Analizadas en la comparación del AnaCe con otros software comerciales. Fuente: CYTEMAC-UNICAUCA

Comparando lo obtenido a partir del sistema desarrollado con las medidas manuales (tomadas como patrones) y las obtenidas mediante el IQMaterials se puede ver que el uso del método propuesto proporciona medidas de tamaño de grano promedio de alta confiabilidad, necesarias en los procesos de obtención y procesamiento cerámico. Normalmente la diferencia en los tiempos de análisis

entre ambos métodos no es notorio, sin embargo el método propuesto proporciona muchos mas descriptores de medida que el IQMaterials.

Es importante mencionar que el método propuesto tiene la ventaja de suprimir falsos positivos en el análisis de los resultados reportados, debido a que el reporte es detallado y se hace partícula por partícula, de esta forma se minimiza el error.

5.3 Comparación de la Medida del Tamaño de Grano entre el Método Desarrollado y el DMP1000

Otro software de amplia difusión es el DMP1000, diseñado por la empresa californiana ZVIEW ^[28]. La metodología utilizada por este software para la medición del tamaño de partícula es sencilla, práctica y fiable. En primer lugar se debe calibrar el software, en otras palabras se determina el factor de conversión de píxeles a micras, y por último simplemente se hace click en dos puntos de la frontera de cada grano. El sistema simplemente mide la distancia que hay entre los dos puntos empleando una recta que pase por ellos y se almacena esta información. En el Anexo B se puede apreciar la apariencia del DMP100.

Las medidas de tamaño de partícula con el DMP1000 se muestran en la Tabla 5.3. Al observar la información de esta tabla se aprecia la escasa diferencia entre las mediciones hechas con los dos métodos, todo depende del analista y de su capacidad de hallar el centro de masa de cada grano utilizando sus propias habilidades. Los datos obtenidos son arrojados tras analizar la imagen de la Figura 5.3 b), en donde se analizan los 33 granos completos dentro de la imagen.

Evaluando el IQMaterials y el DMP1000, se rescata la rapidez en la obtención de las medidas en ambos. El DMP1000 tiene la ventaja de proporcionar la distribución de tamaño de partícula, mientras que el IQMaterials **no**, este solo

puede proporcionar la distribución del *tamaño medio* de partícula, desaprovechando la información contenida en cada imagen, por lo cual se hace necesario emplear numerosas imagen para mejorar el perfil de la distribución gracias a la estadística.

Tabla 5.3. Comparación entre el Método propuesto y el DMP1000. Los resultados dentro del recuadro rojo fueron hechos por un analista experimentado, los demás por uno menos experimentado.

Granos medidos (33)	Tamaño Grano AnaCe (μm)	Tam. Grano DMP1000 (μm)	Diferencia %
Grano1	6,86	7,20	-4,96%
Grano2	3,36	3,47	-3,27%
Grano3	1,83	1,65	9,84%
Grano4	4,41	6,27	-42,18%
Grano5	6,21	5,48	11,76%
Grano6	3,18	2,96	6,92%
Grano7	2,92	3,71	-27,05%
Grano8	6,81	7,01	-2,94%
Grano9	5,54	5,03	9,21%
Grano10	7,77	6,43	17,25%
Grano11	8,31	9,17	-10,35%
Grano12	2,56	2,80	-9,38%
Grano13	5,78	5,64	2,42%
Grano14	2,77	2,37	14,44%
Grano15	4,57	5,60	-22,54%
Grano16	9,92	10,07	-1,51%
Grano17	6,54	5,01	23,39%
Grano18	8,61	7,70	10,57%
Grano19	8,51	7,39	13,16%
Grano20	5,84	6,48	-10,96%
Grano21	7,80	6,53	16,28%
Grano22	9,65	7,34	23,94%
Grano23	1,40	2,15	-53,57%
Grano24	4,78	4,02	15,89%
Grano25	6,81	7,45	-9,39%
Grano26	5,37	5,94	-10,61%
Grano27	8,27	8,89	-7,49%
Grano28	3,00	3,79	-26,33%
Grano29	5,65	4,57	19,12%
Grano30	7,16	8,94	-24,86%
Grano31	9,20	6,16	33,04%
Grano32	8,30	6,84	17,59%
Grano33	6,17	5,90	4,38%
Tamaño Promedio	5,94	5,76	3,03%

Una medida hecha con el DMP1000 es obtenida rápidamente y la precisión depende de la elección de los dos puntos, observando la Tabla 5.3 se observa que el mínimo error es 1.51%, relativamente pequeño, y el máximo es mucho mas grande 53.57%, pero es debido a que la partícula es pequeña, lo que hace mas notorio el error. También debe tenerse en cuenta que las primeras 16 medidas

fueron realizadas por un experto mientras que las siguientes 17 no, sin embargo el error porcentual del promedio esta por debajo del 5%, lo que indica que algunas partículas se detectaron mas pequeñas y otras mas grande, pero en promedio las medidas son precisas.

La desventaja de este se presenta en que el proceso es repetitivo, tedioso y a todo lo que conlleva el análisis semiautomático o manual, siendo esto más notorio en cuanto aumenta el número de partículas (mayor de 10). Un claro ejemplo, es tratar de analizar la Figura 5.4 d), en la cual hay 166 granos completos, *¡una difícil tarea!*

5.4 Comparación de la Medida del Tamaño de Grano del AnaCe con el Dewinter Metallurgy Software, el Material Plus

El Software para análisis de metalografías de la empresa India *Dewinter*, el *Material Plus* ^[29], emplea diferentes herramientas para editar, operar y procesar las imágenes con el fin de mejorar la visibilidad de las regiones de interés. Permite calcular principalmente el contenido de porosidad, el tamaño de grano ASTM, el diámetro de círculo equivalente, el factor de redondez y la ubicación de las partículas en la imagen, pero es el tamaño de grano ASTM el principal descriptor de medida que analiza este software, ya que se debe trabajar mucho sobre la imagen, para obtener los demás resultados. En el Anexo C se puede apreciar la apariencia del reporte entregado por el Material Plus.

La medida que entrega este software se da en *Número de Grano*, un factor que indica un rango posible de tamaños de grano. El número de grano es una medida adimensional empleada generalmente en las industrias que dice que tan finos o que tan gruesos son los granos de una muestra, siendo los granos mas finos a medida que el numero de grano aumenta y mas gruesos a medida que el número

disminuye. Por lo tanto, el número de grano = 2, indica que el grano es bastante grueso.

Al igual que el IQMaterials el tamaño promedio en unidades del Sistema Internacional está por encima del 10% de error porcentual, en el mejor de los casos, lo cual resulta un error bastante grande para comparar con el método desarrollado.

5.5 Comparación de la Medida del Contenido de Porosidad entre el Método Propuesto y el Software UNALMED

Ya que los software anteriores no incluyen la medida del contenido de porosidad, se dispuso a comparar esta medida con un software desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín UNALMED en conjunto con la Institución Universitaria de Envigado IUE, durante una visita realizada en el año 2008 a la UNALMED. El software fue desarrollado por el señor John William Branch (UNALMED) y el señor Hugo de Jesús Mesa (IUE) en el año de 2004. Este software fue desarrollado bajo el trabajo ***Caracterización de Poros en Carbones Tratados Térmicamente Empleando Procesamiento Digital de Imágenes y Microscopía Asistida por Computador***, presentando como conclusión general, la obtención de una metodología que permite la determinación del contenido de porosidad con un alto grado de precisión en rango donde otros métodos resultan ineficaces.

Nuevamente la calidad de imagen y/o la preparación de la muestra influyen en la detección de los poros, ya que estos deben de presentar un rango de intensidades en niveles de gris diferentes a los niveles de gris de los bordes. También, es importante resaltar que el proceso de filtrado No-lineal ayuda a mejorar las áreas

ocupadas por los poros, facilitando la detección y la buena segmentación de los poros.

Afortunadamente el proceso de segmentación en ambos sistemas se realiza por medio de la umbralización. Para el caso del método propuesto, se encontró que el detector de borde no es capaz de resolver estas partículas debido principalmente a su reducido tamaño en las imágenes, por lo cual se utilizó la umbralización.

La tabla 5.4 permite tener idea de las medidas realizadas por ambas metodologías. Realmente no se presentan una gran cantidad de resultados porque con los ocho mostrados es suficiente para ilustrar que la diferencia en las mediciones es bastante estrecha, y no es para menos, ya que se emplean métodos similares. Las diferencias están relacionadas con el tipo de filtrado, pues el sistema UNALMED esta diseñado para operar con imágenes ópticas, y con pulimentos de alto grado, mientras que el sistema propuesto esta diseñado para ayudar al analista del grupo CYTEMAC, pues es difícil lograr buenos pulimentos en los sistemas cerámicos.

Tabla 5.4. Comparación de las medidas de porosidad entre el AnaCe y el sistema UNALMED

Muestra	AnaCe (μm)	Método UNALMED (μm)	Error porcentual (%)
Poros 1	0,49	0,48	2,04%
Poros 2	0,47	0,49	-4,25%
Poros 3	0,52	0,5	3,84%
Poros 4	0,8	0,77	3,75%
Poros 5	0,1	0,1	0
Poros 6	0,32	0,29	9,37%
Poros 7	0,12	0,11	8,33%
Poros 8	1	0,9	10%

Además, en el sistema UNALMED se centró el análisis en el *número de poros* ya que este parámetro les presenta mayor representatividad en sus estudios. Para los análisis de resultados en esta sección, se emplearon 19 imágenes o 2319 poros en total contados manualmente. El software UNALMED contó 2326, mientras que el software propuesto 2337, lo que equivale a un error aproximado

del 0.47%, esto se debe principalmente a que el sistema en ocasiones confunde partes del borde detectándolas como poros.

5.6 Comparación de la Medida de los Granos y el Contenido de Porosidad entre el AnaCe y el SPIP

SPIP son las siglas en inglés de *Scanning Probe Image Processor*, software diseñado por la empresa *Image Metrology* ^[30], con sede en Hørsholm, Dinamarca. El SPIP es un procesador de imágenes a escala nanométricas y micrométricas, que cuenta con 14 módulos para trabajos específicos. Con el SPIP se pueden procesar imágenes proporcionados por los microscopios AFM, STM, SPM, SEM, TEM, interferométricos, ópticos, confocales y perfiladores. Entre sus muchísimas aplicaciones se destacan el detectar celdas unitarias en imágenes de películas delgadas tomadas con AFM, análisis de rugosidad y dureza, análisis de granos, análisis de imágenes de espectroscopia de tunelamiento y el análisis de curvas de fuerza atómica.

El SPIP trabaja de forma similar al AnaCe, detectando bordes para analizar granos y segmentando por umbralización para el análisis de poros. Realmente es muy difícil segmentar positivamente todos los granos a la vez con el SPIP, por lo cual se debe hacer un barrido por varios umbrales, con el fin de segmentar los granos de interés, al tiempo que se hace click en estos granos para conocer sus descriptores por ejemplo el diámetro del círculo equivalente, pero en el reporte entregado por el SPIP no aparece la distribución de tamaños sino el tamaño de grano promedio, por lo cual se debe elegir un umbral en el cual estén la mayoría de granos bien segmentados (idealmente todos bien segmentados). La apariencia del SPIP se presenta en el Anexo D.

El análisis de los poros se realiza por *Threshold*, y al igual que en el análisis de granos se debe hacer un barrido para segmentar los poros de interés, una vez detectados se hace un click sobre este poro y se lee la información del dialogo de resultados. Los resultados en la tabla 5.5 fueron obtenidos para comparar los dos métodos.

Tabla 5.5. Resultados obtenidos con el Met.Propuesto y el SPIP, donde M.D y/o D.D son respectivamente Mala Detección y/o Doble Detección.

Muestra	AnaCe (μm)	SPIP(μm)	Diferencia Porcentual
Grano1	1,4	M.D y/o D.D	-----
Grano 2	4,2	6,1	-45,24%
Grano 3	5,2	5,9	-13,46%
Grano 4	4,4	5,2	-18,18%
Grano 5	2,9	M.D y/o D.D	-----
Grano 6	7,8	7,6	2,56%
Grano 7	3,8	3,7	2,63%
Grano 8	5,3	4,9	7,55%
Grano 9	2,1	4,3	-104,76%
Grano 10	5,6	5,5	1,79%
Grano 11	5,2	M.D y/o D.D	-----
Grano 12	4,6	4,7	-2,17%
Grano 13	1,4	1,4	0
Grano 14	4,2	3,8	9,52%
Tam.promedio	4,15	3,79	8,67%

Claramente se ve que la diferencia entre las dos medidas es muy escasa, cuando los granos que presentan simetría circular, pero se aleja cuando los granos analizados son alargados, debido a que el SPIP mide el tamaño de grano utilizando el diámetro del círculo equivalente. Por otra parte se han segmentado mal algunos granos, bien sea porque se han detectado dos granos como uno solo o porque el grano se detecta como dos granos por separado, por lo tanto el error en las medidas depende de las fronteras de borde y del pulimento de las superficies.

En definitiva el SPIP arroja buenos resultados del *tamaño de grano promedio* pese a lo difícil que resulta calibrar el sistema de medidas (píxeles – micras o manómetros) y segmentar las partículas.

En cuanto a los poros, las diferencias entre el SPIP y AnaCe son muy pequeñas ya que emplean el mismo algoritmo de detección y de medida, las discrepancias en las mediciones se presentan debido a que el tipo de filtrado que se obtiene con el SPIP es diferente al AnaCe, en la Tabla 5.6 se presentan los resultados mas significativos del análisis entre las dos metodologías.

Tabla 5.6. Cotejo de las medidas de porosidad entre el SPIP y el AnaCe

Muestra	AnaCe (μm)	SPIP (μm)	Error porcentual (%)
Poro 1	0,51	0,51	0%
Poro 2	0,96	0,95	1,04%
Poro 3	0,27	0,27	0%
Poro 4	0,69	0,70	-1,45%
Poro 5	0,59	0,59	0%
Poro 6	0,35	0,36	-2,86%
Poro 7	0,29	0,28	3,45%
Poro 8	0,15	0,15	0%
Poro 9	0,23	0,25	-8,69%
Poro 10	0,24	0,23	4,17%
Poro 11	0,25	0,26	-4%
Poro 12	0,25	0,25	0%
Tam.Promedio	0,39	0,4	-0,42%

5.7 Comparación entre las Diversas Interfaces de Usuario y la Interfaz del AnaCe

Las interfaces son aquellos canales o medios que utilizan los humanos para comunicarse con un sistema, máquina o equipo, por tal razón deben ser cómodas a los sentidos, fácil de entender, de accionar y debe permitirle al usuario intuir cierto proceso desconocido.

Dentro de los objetivos de este trabajo se incluyo la realización de una interfaz gráfica de usuario teniendo en cuenta que los usuarios del AnaCe no necesariamente deberían tener un conocimiento previo en procesamiento de

imágenes, se enfrentarían a la obtención de buenas preparaciones de sus muestras, al análisis de un gran cantidad de imágenes y al cansancio visual, por lo tanto la interfaz debe ser rápida, agradable y cómoda al analista.

Al revisar la forma como se procesan las imágenes en los diferentes analizadores con que se comparó el AnaCe, se encontró que en todas la interfaz es poco intuitiva y que es necesario contar con una preparación previa en procesamiento de imágenes para poder hacer una elección correcta de los filtros disponibles dependiendo del tipo de ruido presente en la imagen de interés, son interfaces sobrecargadas de objetos gráficos y menús que le hacen sentir al usuario que los utiliza por primera vez un potencial que no le permite interactuar con la herramienta.

Se puede decir que este tipo de interfaces gráficas no proporcionan una comunicación interactiva y amigable entre el usuario y el sistema a través del lenguaje visual, haciéndolas poco accesibles para el uso de los analistas comunes en ciencia de materiales. El AnaCe por lo contrario, es un software que realiza todos los procesos de forma automática, siguiendo unos cuantos lineamientos dictados por el usuario, guiándolo paso a paso a través del algoritmo de análisis de cada imagen para disuadirlo de cometer errores.

6 El AnaCe y su Aplicación en otros Campos de la Investigación Científica

En diversos campos de la investigación científica es importante determinar los parámetros que describen las estructuras en las cuales se dispone la materia, conectando cada parámetro con una propiedad física, química o biológica de interés para el analista.

- *En Geotecnología e Ingeniería de Suelos y Pavimentos*

La caracterización de los materiales que componen la mezcla asfáltica permite modelar sus propiedades físicas y químicas, entre las que se resaltan la resistencia a la abrasión, la adhesión, la fricción, la resistencia mecánica y la calidad del recubrimiento asfáltico. La evaluación de dichas propiedades se puede realizar con bajo costo por medio de la microscopia, determinando los diferentes parámetros morfométricos presentes en la estructura. En la Figura 6.1 a) y c) se pueden observar diferentes partículas que componen los llenantes asfálticos. Las muestras fueron facilitadas por el grupo de Ingeniería de Suelos y Pavimentos de la UNICAUCA.

Estas imágenes fueron tomadas con el microscopio electrónico de transmisión MET de la unidad de microscopia de la UNICAUCA, mostrado en la Figura 6.1 b). El análisis de las imágenes se realizó utilizando el AnaCe para determinar el área, la distribución de tamaños o granulometría y de formas, siendo de especial interés para los analistas en pavimentos la forma de partículas, ya que de estas depende fundamentalmente la fricción del asfalto.

La Figura 6.1 d) es la salida de la etapa de detección del AnaCe. Como se observa en la imagen la detección ha sido muy limpia y precisa.

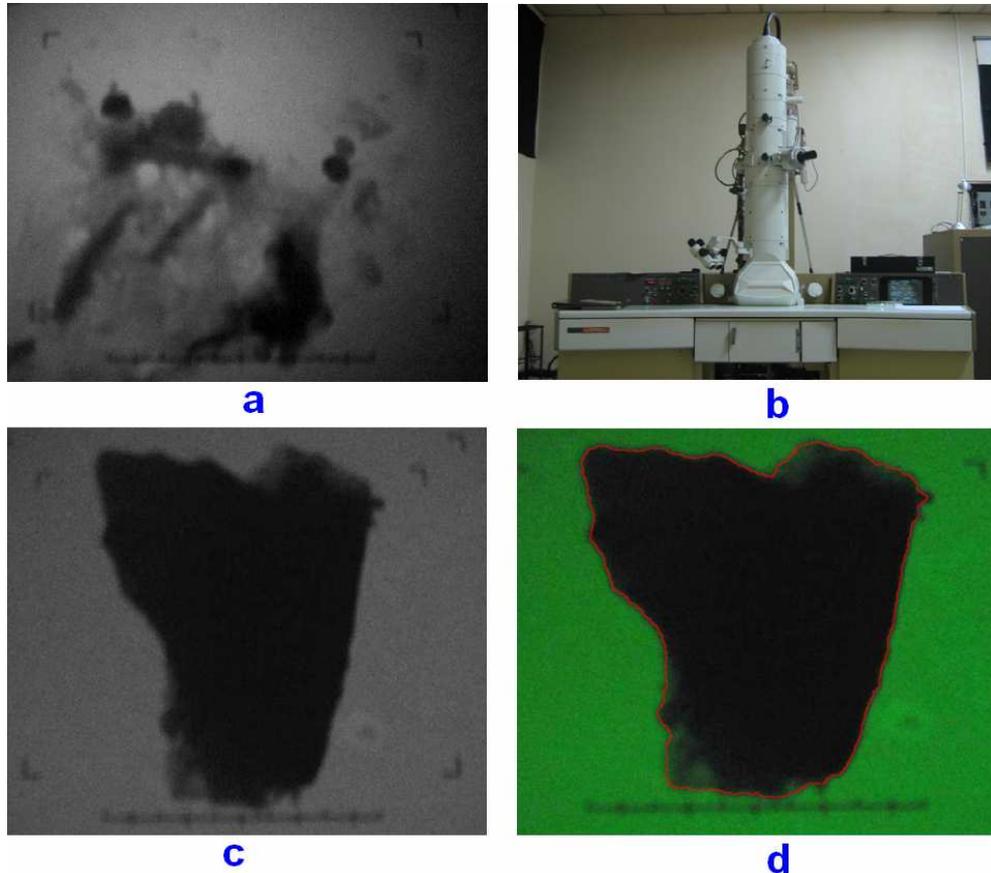


Figura 6.1. a) Muestra de un llenante en donde el material presenta diferentes simetrías, tamaños y presencia de materia orgánica. b) MET de la UNICAUCA con que se tomaron las imágenes. c) Muestra de un Llenante de aproximadamente 30 nm. d) Detección del AnaCe de la partícula.

- *En Películas Delgadas*

En el laboratorio del grupo de Física de Bajas temperaturas FISBATEM del programa de ingeniería física de la UNICAUCA se trabaja en otro campo de la ciencia de materiales, las películas delgadas. Materiales que presentan propiedades físicas interesantes.

Dentro de la caracterización de estos materiales se hace una inspección por medio de microscopios de alta resolución como el AFM o microscopio de fuerza atómica, regularmente en escala manométrica. La imágenes obtenida por AFM

presentan estructuras que el AnaCe puede resolver ópticamente. En el caso de los recubrimientos duros un estudio preciso de la morfometría describirá o dará cuenta de las propiedades del material, como es el caso de resistencia a la abrasión, la dureza y la fricción entre otros.

En la Figura 6.2 se muestra una imagen de una película delgada (a) y el análisis por medio del AnaCe (b).

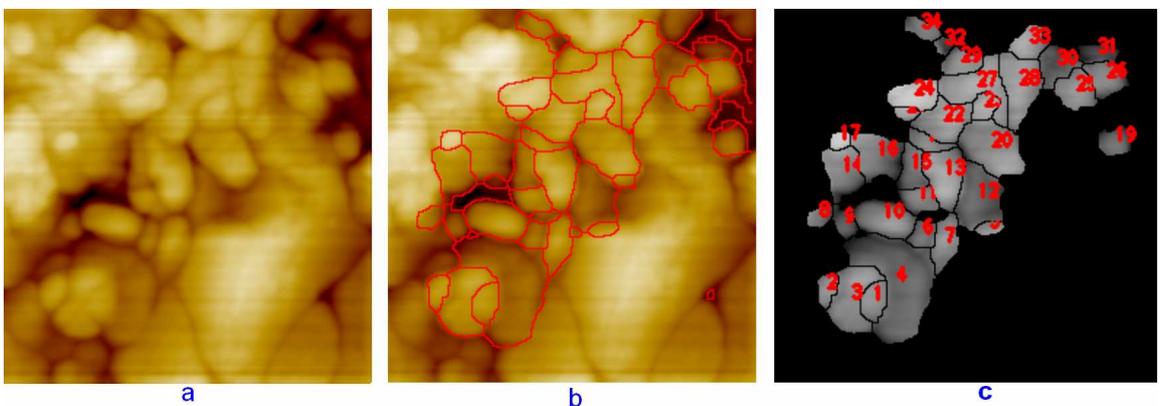


Figura 6.2. a) Imagen de una Película delgada por medio de AFM. Fuente: FISBATEM – UNICAUCA. b) Análisis por medio del AnaCe

- *En Exploración Petrolífera y geología*

Las imágenes empleadas para medir el grado de porosidad en las rocas, con el fin de estudiar el almacenamiento de petróleo y de gas natural, al igual que la determinación del tamaño de partícula o granulometría en general, en los estudios geológicos, presentan similitudes con las imágenes empleadas en el estudio de la microestructura cerámica, lo que hace que las técnicas empleadas en este trabajo se puedan reproducir para tales fines, principalmente en la extracción de los parámetros morfométricos de cada uno de los elementos de estudio, como el tamaño, la forma, el área y la distribución de estos. En la Figura 6.3 se pueden ver

muestras de material geológico en donde se aprecia la misma estructura de los sistemas cerámicos.



a)

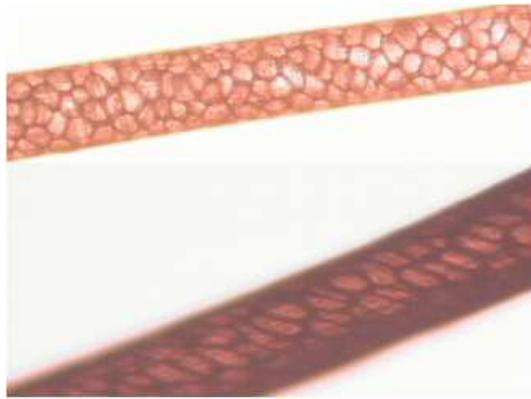


b)

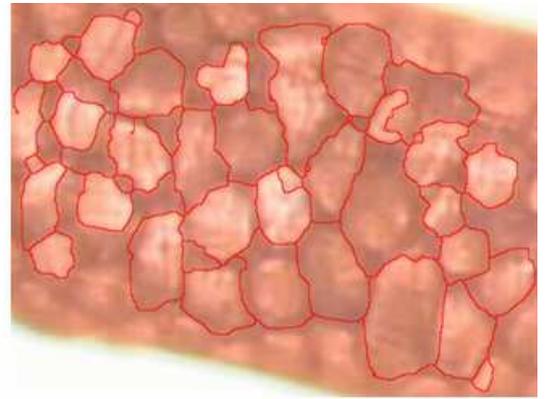
Figura 6.3. a) Imagen de una columna de material pétreo. b) Análisis de la sección transversal de una columna similar a a) por medio del AnaCe.

- *En Biología*

En la realización de una clasificación taxonómica de diferentes especies a partir del análisis morfométrico de las escamas en la medula de los pelos de los animales empleando imágenes similares las mostradas en la Figura 6.4, investigación enmarcada en el trabajo de grado titulado **Hábitos Alimenticios del Puma (*puma con color*) en el Parque Nacional Natural Puracé**, por el estudiante **Andrés Hernández**.



a)



b)

Figura 6.4. a) Imágenes de pelos de puma del parque Puracé. b) Análisis morfométrico por medio del AnaCe.

7 Conclusiones

Los resultados obtenidos, al realizar la comparación entre el método propuesto y los métodos tradicionales indican la eficacia del primero frente a los segundos, por lo cual se puede considerar como un sistema útil para la extracción de los parámetros microestructurales importantes en las investigaciones en ciencia de materiales cerámicos, fusionando confiabilidad en las medidas y rapidez en los tiempos de análisis.

Aunque en las aplicaciones industriales no se requiere un cálculo preciso de los parámetros microestructurales, lo que explica la vigencia de los métodos tradicionales, la tecnología actual va requiriendo cada vez de la exactitud en la medida de los mismos. Por otro lado, en las investigaciones que precisan de un enfoque sistémico, se requiere integrar una serie de herramientas que proporcionen precisión en las medidas realizadas, es allí donde tiene importancia este trabajo, ya que los métodos tradicionales son muy limitados.

El método aquí expuesto propone una nueva manera de clasificar los parámetros microestructurales en sistemas cerámicos, haciendo un estudio preciso y detallado de las partículas a partir de una misma imagen. De esa forma se obtiene una mejor aproximación a la realidad física del objeto en estudio. Aunque “toda medida implícitamente presenta un grado de error”, el propósito de este trabajo es reducir este error al mínimo.

El analizador desarrollado en este trabajo presenta un estudio para la determinación contenido de porosidad dentro de los granos, parámetro clave por ejemplo en la medición de la densificación de las piezas sinterizadas, estudio que no se ha tenido en cuenta en las metodologías tradicionales, ni en los sistemas más populares con los que se comparó el sistema desarrollado.

8 Recomendaciones y Trabajos Futuros

- En adelante varios trabajos de grado, que permitan el análisis de diferentes muestras, todas relacionadas con la microscopía asistida por computador aplicada al campo de ciencia de materiales, tales como el análisis de imágenes obtenidas con microscopía óptica, microscopía electrónica de transmisión y microscopía de fuerza atómica, estas últimas de gran importancia para los estudiantes que trabajan en películas delgadas.
- Todo sistema en que sea necesaria la detección de los bordes, será esta etapa la mas importante de todo el proceso, pero curiosamente resulta la mas difícil de implementar con buenos resultados. Es por esto que toda la ciencia alrededor del procesamiento de imágenes tiene su atención puesta en diseñar algoritmos de todo tipo, que detecten bordes con mucha precisión. El sistema propuesto no fue la excepción, por lo cual en caso tal que se encuentre un detector de bordes mejor, en un trabajo futuro, el diseño del sistema propuesto permite fácilmente *sustituir* esta etapa, debido a que desde el principio se pensó que esta etapa estaría sujeta a cambios futuros. En otras palabras, si se quisiera mejorar el sistema propuesto, se debe fijar la atención en la etapa de *detección de bordes*.
- Para el analista del grupo CYTEMAC, se recomienda seguir apropiadamente las etapas de la preparación de muestras, como revelado, pulimento, etching, deposición de recubrimiento de oro previo a la toma de la imagen con MEB, entre otras, y la toma de imágenes, buscando siempre zonas en las cuales esté clara la microestructura. Garantizándose esto, seguramente las medidas entregadas por el analizador propuesto serán de mayor provecho para el analista.

9 Referencias

- [1] CHINN R.E, *Ceramography*, ASM international and the American Ceramic Society, 2002.
- [2] SMITH C.S., *A History of Metallography*, University of Chicago Press, 1960.
- [3] BARRY CARTER C., GRANT NORTON M., *Ceramic Materials Science and Engineering*. Springer – Verlag New York, LLC. April 2007.
- [4] CALLISTER W. D., *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [5] Página de consulta Revista Future Ceramics URL:
<http://www.futureceramics.com>, última visita 28 de mayo 2009.
- [6] Página de consulta The American Ceramic Society URL:
<http://www.acers.com>, última visita 28 de mayo 2009.
- [7]] Página de consulta Revista Ceramic URL:
<http://www.ceramics.com>, última visita 28 de mayo 2009.
- [8]] Página de consulta The European Ceramic Society URL:
<http://www.ecers.org>, última visita 28 de mayo 2009.
- [9] BARSOUM, M. *Fundamentals of Ceramics*, revised edition, CRC Press, Boca Raton, FL. 2003.

- [10] RICOTE SANTAMARÍA, Jesús. Relaciones microestructura-propiedades ferropiezoelectricas en titanato de plomo modificado. Universidad compútense de Madrid. 2005.
- [11] MANN, Steven. Intelligent Image Procesing. Wiley-Interscience.2002
- [12] GONZÁLEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. Tratamiento digital de imágenes. Addison-Wesley/Días de Santos. Delaware. USA. 1996.
- [13] PRATT, William K. Digital image processing. 4ed. John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [14] MYLER, Harley R; WEEKS, Arthur R. Computer Imaging in C. University of center Florida. P T R Prentice Hall.1993.
- [15]] Página de consulta The American Section of the International Association for Testing Materials URL:
<http://www.astm.org>, última visita 28 de mayo 2009
- [16] CRANE, Randy. A Simplified Approach to Image Processing. Prentice Hall. 1997.
- [17] BATCHELOR, Bruce. Intelligent Vision System for Industry. University of Wales - Springer. 2002.
- [18] BALLARD, Dana. Computer Vision. Prentice-Hall.1982
- [19] PERTUSA, José. Técnicas de análisis de imágenes. Aplicaciones en biología. Publicaciones de la Universidad de Valencia. 1993.

- [20] PITAS, I; VENATSANOUPULOS, A.N. Nonlinear Digital Filters, Principles and Applications. Kluwer Academics Publishers. 1999.
- [21] PAPANIKOLAOU, V; PLATANIOTIS, K.N. Adaptive Filters for Color Image Processing. Mathematical Problems in Engineering. Volume 4, pp. 529-538. 2000
- [22] FACON, Jacques. Morfologia Matemática: Teoria e Exemplos. Editora Universitária Champagnat da Pontífica Universidade Católica do Parana – Curitiba, 1996.
- [23] AGUADO, A. S; NIXON, M. S. Feature Extraction and image Processing. Newnes. 2002
- [24] BALDOCK, R; GRAHAM, J. Image Processing and Analysis. OXFORD University Press. 2000.
- [25] HENDEE, W,R. Medical Imaging Physics. Wiley-Liss. 2002.
- [26] Página de consulta Empresa Media Cybernetics URL:
<http://www.mediacy.com>, última visita 28 mayo 2009.
- [27] Página de consulta Empresa ZVIEW URL:
<http://www.zview.com>, última visita 28 mayo 2009.
- [28] Página de consulta Empresa DEWINTER OPTICAL INC URL:
<http://www.dewinterindia.com>, última visita 28 de mayo 2009.
- [29] Página de consulta Empresa Image Metrology URL:
<http://www.imagemet.com>, última visita 28 de mayo de 2009.

10 Bibliografía

- MOSQUERA, A. A. Conformado de Dispositivos VDRS (“Voltage Dependent Resistors”) con Base en Oxido de Estaño. Universidad del Cauca. 2006
- ALBAN, E; LEVEELAHTI, L. Color Enhancement and Edge Detection for Confocal Microscopy Fluorescent Images. Proceedings of 6th Nordic Signal Processing Symposium. 2004.
- AL-NAFFOURI, T.Y; SAYED, A.H. Adaptive Filters with Error Nonlinearities: Mean-Square Analysis and Optimum Design. EURASIP Journal on Applied Signal Processing. pp 192-205. 2001.
- SMITH, W.F. and HASHEMI, J. *Foundations of Materials Science and Engineering*, 4th edition, McGraw-Hill, Boston. 2006.
- ASKELAND, D.R. and PHULÉ, P.P. *The Science of Engineering Materials*, 5th edition, Thompson Engineering, Florence, KY. 2005.

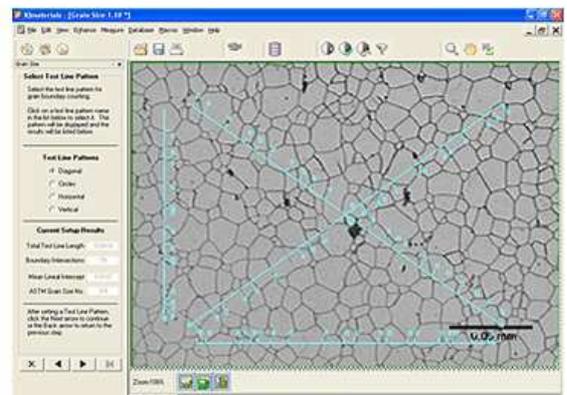
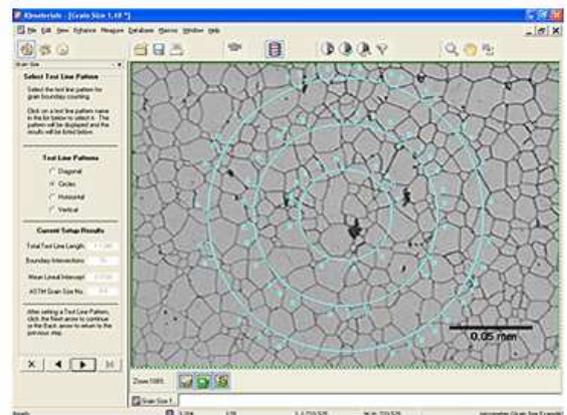
Anexo A

A la izquierda la apariencia del reporte, a la derecha la apariencia de la interfaz empleada por el IQMaterials.



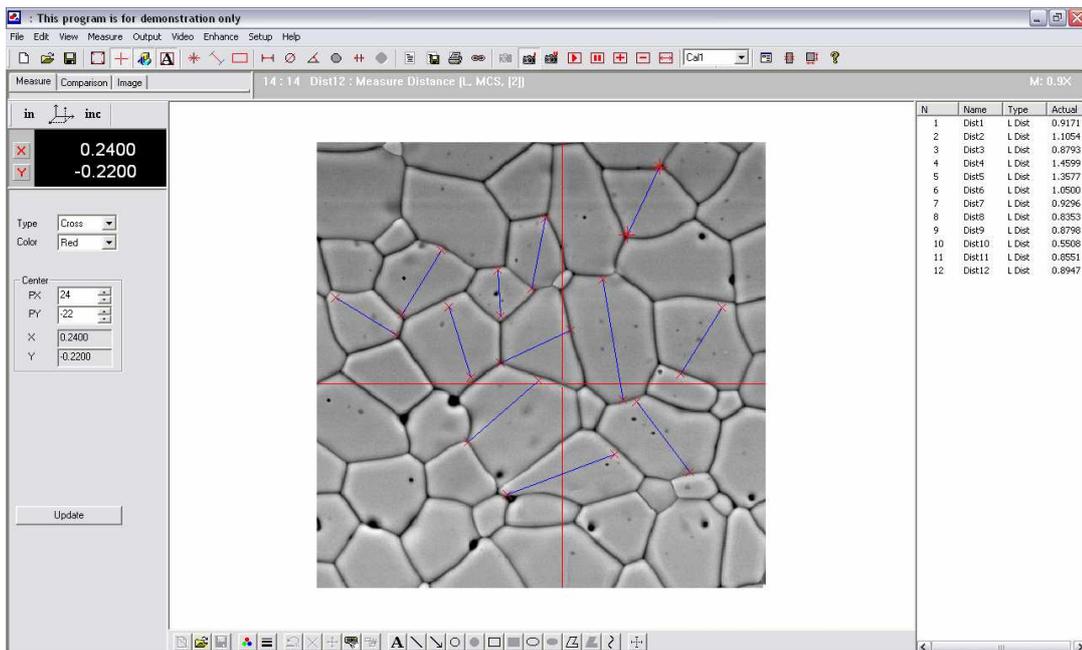
Microsoft Excel - Book1

ASTM Grain Size						
1	ASTM Grain Size					
2	Journal Entry:					
3	Date: 20-Mar-06					
4	Operator:					
5	Requester:					
6	Specimen ID: 3-20-2006 Specimen - 1					
7	Calibration: Grain Size Example Pixel					
8	Field Area: 65877.1					
9	Specimen Area: 167631.2					
10						
11	Stats Structure:					
12	Statistics:					
13	Average: 8.00					
14	Standard Deviation: 0.002156					
15	Number: 3					
16	99 % Confidence Interval: 0.005356					
17	% Relative Accuracy: 35.370789					
18						
Field No.	Image Name	ASTM Grain	Mean Lineal Intercept	Boundary Intersections	Total Test Line Length	Test Pattern
20	1 Grain_Size_1.tif	8.4	0.0172	86	1.1348	Circles
22	2 Grain_Size_2.tif	8.8	0.0153	74	1.1348	Circles
23	3 Grain_Size_3.tif	9.3	0.0129	88	1.1348	Circles
24						
25						
26						
27						



Anexo B

Apariencia de la interfaz empleada por el DMP1000.



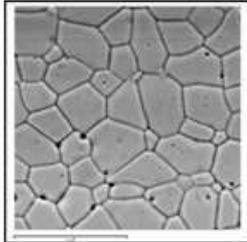
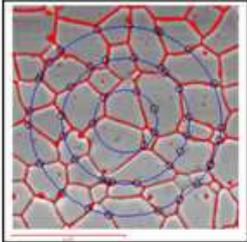
Anexo C

Apariencia del reporte entregado por el Material Plus.

APPROVED

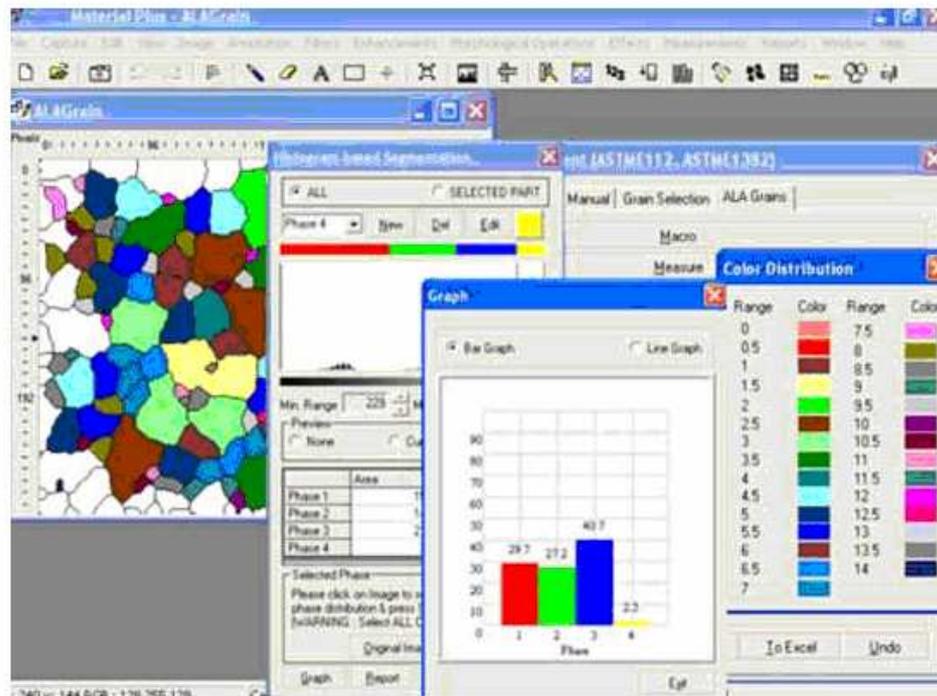
CUSTOMER	Colombia Southamerica	MATERIAL	Enter Material Name
DATE	24/3/2009	DESCRIPTION	Grain Size
HEATNO		GRADE	Austenitic Steel

MICROSTRUCTURE TEST REPORT

ABRAMS 3 CIRCLE PROCEDURE ASTM E 1382-97/E112

FIELD	INTERCEPT_NO	GRAIN_NO
1	47	4



Anexo D

Apariencia del SPIP

