

***Trabajo final presentado
en opción al Título de
Master en Automática***

Autor: Ing. Jeamichel Puente Torres

Tutores: Dr. Rafael Trujillo Codorniu

Consultante: Dr. Ángel Luis Brito Sauvanell

Dr. Harold Crespo Sariol

Santiago de Cuba

2019



**UNIVERSIDAD
DE ORIENTE**

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Ingeniería en Automática

Trabajo final presentado en opción al Título de Master en Automática

Título: Diseño e implementación de una aplicación para el procesamiento digital de imágenes radiológicas para la caracterización del grado de agotamiento de carbones activados granulares para uso médico.

Autor: Ing. Jeamichel Puente Torres.

Tutores: Dr. Rafael Trujillo Codorniu

Consultante: Dr. Ángel Luis Brito Sauvanell

Dr. Harold Crespo Sariol

Pensamientos

“La lógica te llevará de la A a la Z; la imaginación te llevará a todas partes.”.

Albert Einstein

“Es ley maravillosa de la naturaleza que solo esté completo el que dá: y no se empieza a poseer la vida hasta que no vaciamos sin reparo y sin tasa, en bien de los demás, la nuestra”.

José Martí

Dedicatoria

A mi padre Edgar.

Por ser la primera persona que creyó en mí para seguir el camino de la ciencia. Gracias por la confianza y el apoyo, y por encima de todo, gracias por tu tiempo, a fin de cuentas, es la única riqueza que nunca regresará.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, por todo el apoyo que me han brindado, a mi madre por darme la vida y a mi padre por su comprensión.

Doy gracias a mis tutores, los Doctores en Ciencias Rafael Trujillo Cordorniu, Ángel Luis Brito Sauvanell y Harold Crespo Sariol por su apoyo incondicional en la realización de este trabajo y trabajos futuros.

A la Master en Ciencias Dayli Milanés Hermosilla, por sus excelentes consejos en la culminación de este trabajo.

Agradezco a mi pareja y compañera de vida Carmen Rosa por su presencia, por su amor y entendimiento en esta etapa de mi vida, gracias a ella por quererme y gracias a su familia por aceptarme.

Gracias a mis amigos de siempre Fide y Frank, gracias chicos, gracias por estar, gracias por las risas y gracias por poder contar con ustedes.

Gracias a todas las personas que de una forma u otra han brindado su granito de arena para culminar este trabajo de manera exitosa, gracias al personal de la Ronera Santiago, del Hospital Provincial y Hospital Clínico Quirúrgico de la provincia, gracias a todos aquellos que contribuyeron a mi formación profesional y muchas gracias a todas esas personas que se tomen el trabajo de leer esta tesis, gracias por su tiempo.

Muchas Gracias.

Resumen

El presente trabajo de investigación está enfocado en el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario utilizando MATLAB® para realizar todo el volumen de cálculo relacionado con el método de absorción de radiación X (XRA) y su aplicación en la caracterización del grado de agotamiento de carbones activados granulares (CAGs) en la industria médica, específicamente en la producción de agua para diálisis, indispensable en el funcionamiento de las máquinas de hemodiálisis o riñones artificiales que mantienen con vida a los pacientes aquejados de insuficiencia renal crónica u otro padecimiento de tipo renal que necesite este tipo de tratamiento. En el trabajo se describen los métodos clásicos de caracterización de carbones activados granulares, los conceptos básicos del procesamiento digital de imágenes (PDI) utilizados para la concepción de la herramienta de software, así como las ventajas y desventajas del uso de MATLAB® en el desarrollo de interfaces gráficas de usuario. Se presenta una propuesta de interfaz gráfica capaz de solucionar el problema que se plantea en el trabajo de investigación y se demuestra la validez de la herramienta de software en la correcta caracterización de los CAGs para uso médico.

Palabras clave: procesamiento digital de imágenes, XRA, carbón activado, hemodiálisis, interfaz gráfica de usuario

Abstract

The current investigation is mainly focused in the development of a graphical user interface using MATLAB® to develop all the calculations related with the X ray absorption method (XRA) and its application in the characterization of the exhaustion degree of granular activated carbons for medical industry. The production of dialysis water is extremely important for the precise operation of hemodialysis machines or artificial kidneys; allowing to the patients affected of severe kidney damage or other related disease wait by a viable transplant. In this work, the classical methods for granular activated carbon characterization and the basic concepts of digital image processing related with the development of the proposed software tool are described in depth, as well as the advantages and disadvantages of the use of the software MATLAB® in the development of graphical user interfaces. A proposal of graphical user interface with the ability of resolve with reliable results the investigation problem, is exposed. The importance of the proposed graphical user interface is demonstrated, as an indispensable tool in the application of XRA method and the correct characterization of the exhaustion degree of granular activated carbons for medical use.

Key Word: digital image processing, XRA, activated carbon, hemodialysis, graphical user interface.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Caracterización del Carbón activado granular (CAG) para uso médico, fundamentos de PDI y uso de MATLAB® en el diseño e implementación de interfaces gráficas de usuario.....	8
Introducción.....	8
1.1. Proceso de caracterización del Carbón activado granular (CAG) utilizado en las plantas de pre-tratamiento para la producción de agua para diálisis.	8
1.1.1. Métodos actuales de caracterización de CAGs.	10
1.2. Procesamiento digital de imágenes.	15
1.2.1. Histograma de una imagen.	19
1.2.2. Transformada discreta de Fourier en dos dimensiones.....	20
1.2.3. Filtrado espacial.....	21
1.3. Entorno de programación MATLAB®.	24
1.3.1. MATLAB® en el procesamiento de imágenes digitales.....	25
1.3.2. Interfaz gráfica de usuario en MATLAB® (MATLAB GUIDE).	25
1.3.3. Generación de ejecutables (.exe).....	26
1.4. Caracterización del CAG utilizado en las plantas de pre-tratamiento para la producción de agua de diálisis en Cuba.	27
1.4.1. Método de absorción de radiación X (XRA).	28
Conclusiones del capítulo.....	36
Capítulo 2. Diseño e implementación de la interfaz gráfica de usuario usando MATLAB®.....	37
Introducción.....	37
2.1. Fundamentos teóricos de la propuesta.....	37
2.2. Diseño e implementación de la interfaz.	38

2.2.1. Lectura de la imagen original.	45
2.2.2. Realización de recortes ("crops").	51
2.2.3. Menú de gráficos ("Plots") y edición ("Edit").	57
2.2.4. Barra de herramientas.	62
2.3. Valoración o corroboración de los resultados alcanzados	64
2.3.1. Análisis valorativo de los aspectos económicos, sociales y medioambientales.	75
Conclusiones del capítulo.	78
Conclusiones	79
Recomendaciones	81
Bibliografía.	82
Anexos.	85
Anexo 1: Segmento de código para la creación de pestañas	
Anexo 2: Avals de las entidades relacionadas con el proyecto	

Lista de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

Notación	Descripción
XRA	Método de absorción de radiación X
CA	Carbón activado
CAGs	Carbones activados granulares
PDI	Procesamiento digital de imágenes
CAG	Carbón activado granular
CAs	Carbones activados
OI	Ósmosis inversa
SEM	Microscopia electrónica de barrido
FTIR	Transformada de Fourier del espectro infrarrojo
TGA	Análisis termogravimétrico
EA	Análisis elemental
XRF	Análisis de fluorescencia de rayos X
TD-GC/MS	Análisis de desorción térmica acoplada a cromatógrafo de gases y espectrómetro de masas
TG	termogravimetría
GC	Cromatografía gaseosa
MS	Espectrometría de masas
TD	Desorción térmica
PC	Computadora
FFT2	Transformada rápida de Fourier en dos dimensiones
σ	Desviación estándar del filtro gaussiano implementado
N	Intensidad de fotones atenuados
GSI	Nivel de intensidad de gris en una escala normalizada
N_0	Intensidad del haz de fotones incidente
GSI_0	Intensidad de gris inicial en la imagen XRA
mAs	Miliamperios por segundo

Lista de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas.

Notación	Descripción
keV	Kiloelectronvolts
S_c	Concentración espacial
T_P	Total de píxeles
TAC	Tomografía axial computarizada
JPEG	Joint photographic expert group
L	Posibles niveles de intensidad de gris
G	Valor límite de la escala de gris sin normalizar en función de la cantidad de bits utilizada para representar la imagen
GUI	Interfaz gráfica de usuario
GUIDE	Entorno de programación visual de MATLAB®
HOCL	Ácido hipocloroso
OCL^-	Ion hipoclorito

INTRODUCCIÓN

Los Carbones Activados (CAs) son excelentes adsorbentes debido a su gran área superficial, alto volumen de poro, estructura porosa y grupos funcionales específicos presentes en su estructura. Estos han sido ampliamente utilizados para la remoción de olores, colores y sabores indeseables, así como para la eliminación de otras impurezas orgánicas e inorgánicas procedentes del sector doméstico e industrial [1-3]. En Cuba, el compuesto Cloro es comúnmente añadido a los suministros de agua de las ciudades, así como en los reservorios de agua utilizados en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis con el objetivo de desinfectar el agua y reducir el riesgo de contaminación microbiológica [4, 5]. Entre otros efectos indeseables, el cloro destruye las membranas semipermeables usadas en los filtros para diálisis (dializador), así como las membranas de ósmosis inversa (OI) utilizadas en el sistema de pre-tratamiento para la obtención de agua para diálisis; las cloraminas formadas en el proceso de desinfección pueden provocar daño celular severo, anemia, hemólisis severa y meta-hemoglobinemia [6-12]. El cloro y las cloraminas no pueden ser eliminados de manera eficiente por las membranas de ósmosis inversa, que constituyen la etapa final del sistema de pre-tratamiento para la obtención del agua para diálisis con los estándares de calidad requeridos.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de accidentes reportados, causados por la exposición de los pacientes a estos contaminantes, el carbón activado granular (CAG) es utilizado en los hospitales para remover el cloro y las cloraminas presentes en el agua. El uso de carbón activado granular en el sistema de tratamiento de agua es por tanto esencial.

El carbón activado utilizado en las unidades de pre-tratamiento puede fabricarse utilizando varios materiales como madera, cáscara de coco u otro material precursor después de la pirólisis y una activación adecuada [8, 9]. Los controles de calidad del agua para diálisis producida están enfocados principalmente en mediciones de conductividad del agua de salida de la planta (en S/cm).

No obstante, estas mediciones de conductividad están directamente relacionadas con la concentración total de iones presentes en el agua, brindando una indicación del funcionamiento general del filtro pero no del grado de agotamiento a diferentes capas en la cama de CAG. Esto debe ser realizado por métodos más adecuados. De manera adicional la aplicación de métodos específicos a la caracterización del CAG utilizado en los filtros (adsorbedores) para la remoción de cloro en los sistemas de pre-tratamiento podría ayudar a formular una estrategia de regeneración y reúso adecuada para el carbón activado utilizado.

Los valores típicos de conductividad, para el agua procedente de los embalses, están aproximadamente entre 100 – 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para el agua para diálisis, se demandan valores de entre 2 – 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Si la conductividad del agua para diálisis supera los 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el sistema de pre-tratamiento debe ser detenido hasta que la causa del incremento de conductividad sea encontrada. Si no se encuentra el motivo del aumento de conductividad en el agua para diálisis, el CAG es declarado como agotado, posteriormente descartado y remplazado por CAG virgen. El CAG utilizado en las plantas de tratamiento para la producción de agua para diálisis no es de producción nacional; debe ser importado en su totalidad desde países europeos como España y Bélgica a precios elevados, de acuerdo al mercado internacional. En las plantas de tratamiento, el agua pasa a través de lechos en cama fija de carbón activado granular contenidos en tanques cilíndricos o “filtros” diseñados al efecto.

Una vez que el carbón no garantiza los estándares de calidad del agua a la salida del filtro, el carbón se declara como material agotado y es desechado por completo. Teniendo en cuenta que el ciclo de uso del carbón es relativamente corto no supera los 6 meses de uso el carbón catalogado como desecho es un problema económico, debido a su frecuencia de renovación en el año y su costo de importación, unido al problema ambiental que provoca su destino final. De aquí se deriva que cada alternativa que aporte nuevas estrategias que contribuyan a un manejo adecuado de este recurso y/o la optimización del proceso de adsorción, trae acompañado un ahorro económico significativo para el país; lo cual se traduce en mejoras importantes en el aspecto social y medioambiental en un área tan sensible como el servicio médico Cubano.

Adsorción: proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material.

Para una correcta estrategia de manejo del CAG la caracterización, explotación, regeneración y reúso de este recurso deben combinarse en un ciclo cerrado para garantizar la eficiencia en el uso de este material adsorbente.

En adición, el grado de agotamiento de las capas de CAG en un filtro de tratamiento de agua depende de la posición de la muestra en la cama de CAG en el filtro [13-17]. El sistema de pre-tratamiento de agua utilizado para los tratamientos de hemodiálisis también está diseñado para eliminar iones metálicos (aluminio, cobre y zinc), electrolitos (calcio, magnesio, sodio, sulfatos) y algunos microorganismos. Diferentes métodos analíticos cuantitativos pueden ser utilizados para la caracterización del CAG para uso médico.

Métodos analíticos que lidian con la morfología de la muestra como los análisis de microscopia electrónica de barrido (SEM) por sus siglas en inglés, así como otras técnicas que abordan la composición y característica estructural de la muestra como los análisis de Transformada de Fourier del Espectro Infrarrojo (FTIR); análisis termogravimétrico (TGA), análisis elemental (EA), análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), desorción térmica acoplada a cromatografía de gases y espectrometría de masas (TD-GC/MS) por mencionar algunos. Recientemente el uso de nuevos métodos de caracterización han arrojado resultados confiables en la caracterización del grado de agotamiento de CAGs para diferentes usos; entre estos, los métodos de caracterización usando análisis acústicos y el método de absorción de radiación X (XRA) resaltan como alternativas a los métodos clásicos utilizados para la caracterización de este material [13 -17].

El método de absorción de radiación X (XRA) [13, 17] aprovecha los diferentes niveles de absorción de radiación X por materiales de diferentes densidad; con el objetivo de hacer comparaciones y determinar cuan agotado está un CA usado respecto al material virgen. El carbón activado está compuesto por elementos de bajo número atómico como carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre; esto provoca que el carbón activado virgen (sin usar) sea prácticamente “transparente” a la radiación X.

Adsorbente: sólido que tiene la capacidad de retener sobre su superficie un componente presente en corrientes líquidas o gaseosas. Se caracterizan por una alta superficie específica y por su inercia química frente al medio en el que se van a utilizar.

En contraste un carbón agotado o de uso, habrá adsorbido diferentes compuestos, los cuales aumentarán los niveles de absorción de radiación X de la muestra. El nuevo método de caracterización "X-Ray-Absortion" (XRA) por sus siglas en inglés, aprovecha estas diferencias en absorción de radiación X en conjunto con imágenes de radiografía digital y técnicas de procesamiento digital de imágenes para emitir conclusiones acerca del grado de agotamiento de muestras de carbón activado respecto al material virgen, incidiendo de manera directa en la caracterización (cuantitativa) del grado de agotamiento de este material. Al conocer los compuestos que agotan el carbón por adsorción, será posible proponer una eficiente estrategia de regeneración y posible reúso acorde a las condiciones reales del país y los sistemas de pre-tratamiento que se utilizan en la actualidad.

En la actualidad no existe en nuestro país la infraestructura analítica para realizar la caracterización químico-física y textural del carbón activado usado en plantas de tratamiento de agua para hemodiálisis y así realizar un correcto manejo del carbón activado utilizado. El proceso de caracterización, regeneración y reúso de este material en nuestro país es prácticamente inexistente, solamente se realiza la explotación de este material y su desecho al medioambiente una vez declarado como agotado. La determinación del grado de agotamiento de los filtros de carbón activado granular para la producción de agua para diálisis se basa principalmente en mediciones de conductividad y análisis químicos para detectar la presencia de cloro libre en el agua. Estos métodos brindan información general acerca del estado del filtro como un todo, pero no proporcionan información suficiente acerca del grado de agotamiento a diferentes capas en el filtro.

La aplicación del método de absorción de radiación X permitirá realizar una correcta caracterización de este recurso, en base a los resultados de la caracterización será posible trazar un plan de regeneración adecuado, en vista a un posible reúso de este material. Aun así la técnica de absorción de radiación X presenta limitaciones importantes a la hora de realizar el procesamiento de las imágenes obtenidas con este método. Hasta la fecha el procesamiento digital de las imágenes obtenidas aplicando el método de absorción de radiación X se realizaba de forma manual, utilizando la ventana de comandos de MATLAB®, aspecto que provoca demoras significativas en

el tiempo de ejecución de un estudio de agotamiento, y por tanto en la obtención de la información necesaria para definir una estrategia de manejo adecuada para el carbón activado en uso. La automatización de este proceso mediante la implementación de una aplicación informática; incidirá de manera significativa en la disminución del tiempo necesario para realizar el procesamiento digital de las imágenes de absorción de radiación X, así mismo mejorará significativamente la calidad del procesamiento realizado y permitirá obtener la información necesaria del proceso de caracterización de manera rápida y confiable y de esta forma determinar una estrategia de regeneración y reúso adecuada; aspecto que disminuirá de manera significativa los efectos económicos y medioambientales adversos que provoca el uso incorrecto de este recurso. Por tanto en base a lo anteriormente expresado se plantea como **problema de la investigación** la necesidad de un sistema informático que permita automatizar el proceso de caracterización del carbón activado granular usado en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis. De esta forma se define como **objeto de la investigación** la caracterización del carbón activado granular utilizado en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis y como **objetivo general**: Diseñar e implementar una herramienta de software que permita automatizar el proceso de caracterización del carbón activado granular que se utiliza en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis. Como **campo de acción** se define el procesamiento de imágenes de radiografía digital obtenidas usando el método de absorción de radiación X para la caracterización del carbón activado granular usado en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis. Del análisis efectuado se llega a la siguiente **hipótesis**: Si se diseña una aplicación rápida, interactiva y versátil se logrará automatizar el proceso de caracterización del carbón activado granular que se utiliza en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis, incidiendo de manera significativa en la correcta caracterización de este recurso.

Para el cumplimiento del objetivo propuesto se han asumido las siguientes **tareas de investigación**:

1. Describir el proceso y las técnicas actuales de caracterización del carbón activado granular usado en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis.
2. Describir los conceptos fundamentales del Procesamiento Digital de Imágenes.
3. Describir el proceso de desarrollo de interfaces gráficas de usuario usando la plataforma seleccionada.
4. Describir el estado actual en el proceso de caracterización del carbón activado granular usado en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis en nuestro país y las limitaciones que este presenta.
5. Realizar el diseño gráfico de la herramienta de software propuesta.
6. Implementar la herramienta de software propuesta.

Durante el estudio se utilizaron como métodos de investigación el análisis y la síntesis, a fin de establecer una consistente fundamentación teórica del tema, al adoptar puntos de vistas a partir de la crítica a diferentes fuentes, así como establecer generalizaciones a partir del estado actual en que se encuentra el objeto de estudio. Se aplicó la experimentación para probar el desempeño del programa en el desarrollo de las operaciones de cálculo relacionadas con el uso del método de absorción de radiación X; con el objetivo de entender con facilidad cada aspecto teórico dentro de la propuesta.

El presente trabajo cuenta con una introducción, desarrollo con dos capítulos, las conclusiones, las recomendaciones, las referencias bibliográficas y los anexos. El Capítulo I aborda el Marco Teórico de la Investigación. En este se describe el proceso de caracterización del carbón activado granular utilizado en la industria médica. También se estudian las herramientas de procesamiento digital de imágenes a ser utilizadas en la propuesta de aplicación informática, además se muestran las ventajas

del uso de la plataforma de programación seleccionada para el desarrollo de la propuesta de software. Se analiza el proceso de caracterización del carbón activado granular de uso médico en Cuba y las limitaciones en los métodos utilizados actualmente para la caracterización de este material en nuestro país. En el Capítulo II se describe el proceso de diseño e implementación de la interfaz gráfica de usuario basado en los conceptos y técnicas expuestos en el Capítulo I, se exponen las funcionalidades que brinda esta herramienta, así como las ventajas y posibilidades que esta ofrece en la correcta caracterización del CAG para uso médico. Se realiza un análisis valorativo de los aspectos económicos, sociales y medioambientales relacionados con la implementación de la propuesta de software en la industria médica.

Aporte Práctico de la Investigación: Obtención de un sistema informático que posibilite realizar una correcta caracterización del carbón activado granular usado en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis utilizando la plataforma seleccionada (MATLAB®). La implementación de esta herramienta informática en combinación con el método XRA permitirá formular una correcta estrategia de manejo del CAG para uso médico y de esta forma reducir los costos asociados al uso incorrecto de este recurso. La puesta en práctica de la propuesta de software en los servicios de hemodiálisis del país permitirá que el proceso de caracterización pueda ser realizado por los operarios de las plantas de tratamiento sin necesidad de tener conocimientos amplios de MATLAB® o programación en general.

Capítulo 1. CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO GRANULAR (CAG) PARA USO MÉDICO, FUNDAMENTOS DE PDI Y USO DE MATLAB® EN EL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE INTERFACES GRÁFICAS DE USUARIO.

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el proceso de operación de las plantas de pre-tratamiento de agua utilizadas para asistir los tratamientos de hemodiálisis. Así mismo, se describe la aplicación e importancia del uso del CAG en los sistemas de pre-tratamiento y las técnicas actuales de caracterización de este material. Se estudian los conceptos y herramientas de procesamiento digital de imágenes (PDI) con vista a su posible utilización en la caracterización de los filtros de CAG utilizados en los sistemas de pre-tratamiento. Finalmente se analizan las ventajas que brinda el software MATLAB® para su utilización como plataforma de desarrollo de la herramienta de software propuesta y se describe el proceso de caracterización actual del CAG utilizado en las plantas de pre-tratamiento en nuestro país.

1.1. PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO GRANULAR (CAG) UTILIZADO EN LAS PLANTAS DE PRE-TRATAMIENTO PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA PARA DIÁLISIS.

Los filtros de CAG utilizados en el sistema de purificación de agua para asistir los tratamientos de hemodiálisis poseen una cama de CAG de aproximadamente 1 m de altura y de aproximadamente 50 cm a 60 cm de diámetro, consistentes con una masa aproximada de 120 kg de CAG. Una vez que el filtro es declarado fuera de operación o agotado, basado principalmente en mediciones de conductividad se procede a tomar las muestras a diferentes profundidades de la cama de CAG con el objetivo de determinar, utilizando diferentes técnicas analíticas que tan agotado está el CAG utilizado en el sistema, así como las características de los compuestos adsorbidos.

La figura 1.1 muestra un esquema simplificado de una planta de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis.

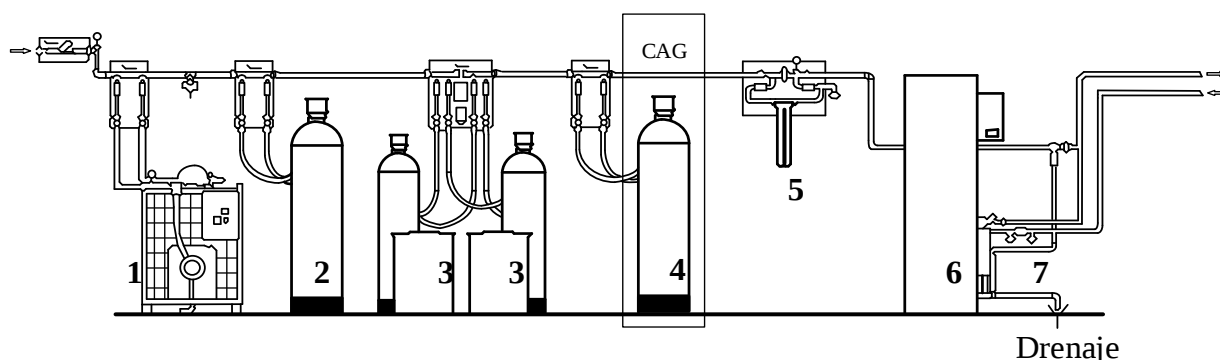


Figura.1.1. Diagrama general de la planta para la producción de agua para diálisis (presión mínima y flujo: 1.0 bar y 20L/min): 1: Bomba; 2: Filtro para remoción de elementos pesados y partículas en suspensión; 3: sistema de ablandamiento de agua (resina de intercambio iónico); 4: Filtro de Carbón Activado Granular; 5: pre-filtro; 6: Unidad de ósmosis inversa y 7: Lazo de conexión para la desinfección.

Las muestras a diferentes profundidades en la cama de carbón se toman desde el fondo del filtro hasta el tope utilizando una herramienta específicamente diseñada para este propósito [14]. Las muestras se toman cada 20 cm en el filtro de CAG como se muestra a continuación en la figura 1.2.

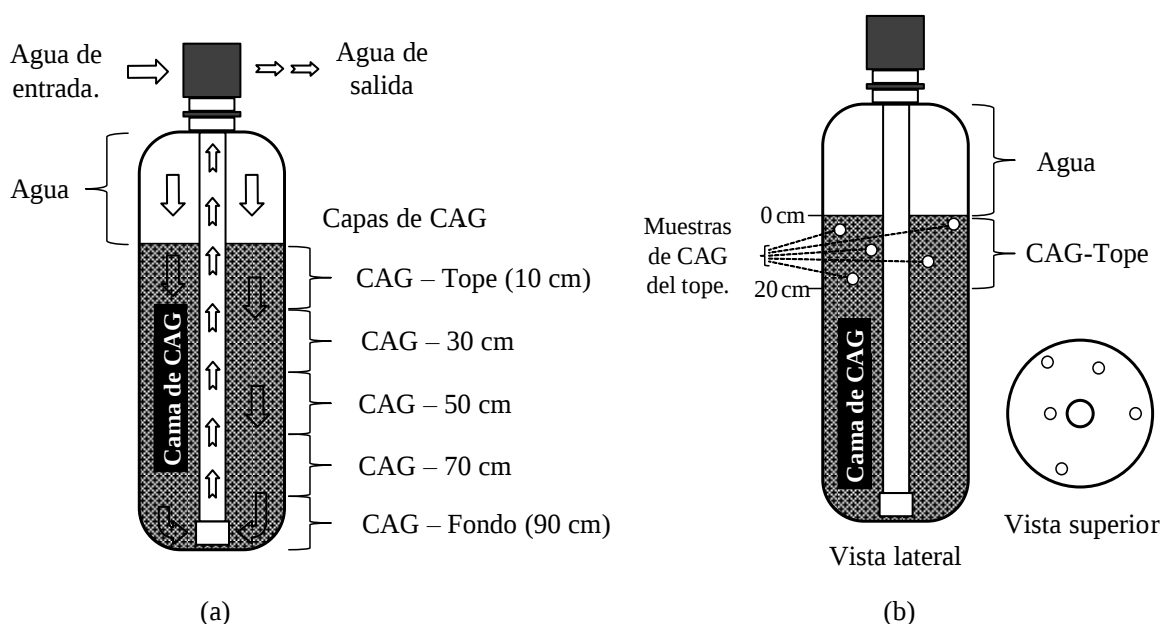


Figura.1.2. Diagrama del filtro de CAG utilizado para obtener agua para diálisis para tratamientos de hemodiálisis y la localización de las muestras a diferentes profundidades en la cama de carbón (a) así como el diagrama del proceso de muestreo desarrollado (b).

De acuerdo a la figura 1.2 (a), el agua cargada con cloro libre y/o cloraminas entra al filtro de CAG por el tope (Agua de entrada), el agua fluye hacia abajo a través de la cama de CAG bajo una presión específica (3 bar) que se controla utilizando electroválvulas específicamente diseñadas para esta función.

Un espacio de agua de aproximadamente 30 cm se deja entre la entrada del filtro y la cama de CAG. Una vez que el agua atraviesa la cama de carbón, el agua filtrada sube por un tubo central (a causa del gradiente de presión) colocado con este objetivo. El agua filtrada es posteriormente ultra-filtrada usando un filtro de membrana y luego va hacia la unidad de ósmosis inversa (ver figura 1.1).

La figura 1.2 (a) muestra las profundidades seleccionadas para realizar la caracterización de las muestras utilizando diferentes técnicas analíticas (TGA, EA, TD-GC/MS, FTIR, XRF, XRA, etc.). La figura 1.2 (b) muestra cómo se realizó el proceso de muestreo, cinco muestras a cada profundidad de 20 cm fueron seleccionadas para el análisis.

1.1.1. MÉTODOS ACTUALES DE CARACTERIZACIÓN DE CAGs.

Los métodos de caracterización actuales de CAG para diferentes usos, constituyen herramientas fundamentales en la obtención de información estructural y funcional del material analizado. La mayoría de estos métodos explora el comportamiento de la muestra analizada bajo condiciones extremas de temperatura, radiaciones ionizantes, radiofrecuencias o simplemente luz, estos evalúan como varían las propiedades del material bajo estas condiciones y obtienen información importante sobre las características físico-químicas de este; permitiendo obtener información sobre la naturaleza y concentración de los compuestos adsorbidos y de esta forma emitir conclusiones acerca del grado de agotamiento del material.

La ultrafiltración es un tipo de filtración por membranas, en la cual la presión hidrostática fuerza un líquido contra una membrana semipermeable. Los sólidos suspendidos y los solutos de alto peso molecular son retenidos, mientras que el agua y los solutos de bajo peso molecular atraviesan la membrana

➤ **Análisis termogravimétrico (TGA).**

La termo-gravimetría (TG) o análisis termogravimétrico, "termogravimetric analysis " (TGA) por sus siglas en ingles es un análisis termal ampliamente reconocido y utilizado en la investigación científica. El análisis TGA es utilizado en la investigación científica y la industria en el desarrollo de nuevas sustancias, ingeniería y caracterización de materiales con el objetivo de obtener conocimiento acerca de la estabilidad termal y composición de la muestra analizada.

En el análisis de termogravimetría una termo balanza es utilizada para medir los cambios de masa de la muestra como función de la temperatura o del tiempo, bajo un ambiente controlado, respecto a la tasa de calentamiento, atmósfera de gas, tasa de flujo, el tipo de material, etc. La aplicación del análisis TGA a muestras de CAG permite obtener información importante acerca del tipo y las características térmicas del material adsorbido por las muestras de CAG.

Usando este análisis es posible determinar si en las muestras analizadas se han adsorbido sustancias mayormente orgánicas o inorgánicas, teniendo en cuenta las temperaturas de descomposición de estos compuestos, así como tener una idea relativa de la concentración de estas sustancias analizando las pérdidas de masas respecto a la muestra virgen del mismo material [13, 15]. Utilizando esta información es posible emitir conclusiones acerca del grado de agotamiento de las muestras analizadas respecto a la muestra virgen.

➤ **Análisis elemental (EA).**

El análisis elemental es un método utilizado tanto en química orgánica como analítica para determinar la composición elemental en forma de la formula empírica o mínima expresión, de un compuesto orgánico puro, por combustión de la muestra bajo condiciones donde los productos resultantes de la combustión puedan ser analizados cuantitativamente. El CAG está compuesto principalmente por carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre.

El estudio de la concentración de estos elementos a cada profundidad del filtro respecto a la muestra virgen brinda información importante en el proceso de caracterización del grado de agotamiento del CAG. Los CAGs cargados o agotados con compuestos orgánicos presentan un aumento en la concentración de nitrógeno

respecto a la muestra virgen; por el contrario los CAGs cargados con compuestos inorgánicos presentan un aumento en la concentración de oxígeno respecto a la muestra virgen, provocado principalmente por la formación de óxidos inorgánicos debido a la concentración de sales de carácter inorgánico en el agua como carbonato de calcio (CaCO_3), cloruro de sodio (NaCl_2) y cloruro de magnesio (MgCl_2) [15, 16].

En el CAG utilizado en las plantas de tratamiento de agua la determinación de la concentración de oxígeno a diferentes capas en el filtro de tratamiento brinda información crucial en la cuantificación de posibles óxidos inorgánicos y la influencia de estos en el grado de agotamiento de la muestra respecto a la muestra virgen del mismo material.

➤ **Análisis de desorción térmica, acoplada a cromatografía gaseosa y espectrometría de masas (TD-GC/MS).**

Mediante el acoplamiento de un analizador termogravimétrico (TG) a un equipo de cromatografía gaseosa y un espectrómetro de masas "gas chromatography and mass spectrometer" (GC-MS) por sus siglas en inglés, es posible obtener información relacionada con el tipo de gases liberados en el proceso de calentamiento de la muestra como una función del tiempo o la temperatura, proporcionando una huella digital del material analizado.

La cromatografía gaseosa (GC) es un método de alta resolución utilizado para separar compuestos volátiles y semivolátiles. Los diferentes gases involucrados en la combinación son separados en base a las diferencias en la distribución de componentes entre la fase estacionaria y la fase móvil. Esto lleva a diferentes demoras o diferentes tiempos de retención para cada componente gaseoso.

La espectrometría de masas (MS) se aplica como un sistema de detección altamente sensitivo a la salida de la columna de separación con el objetivo de registrar la distribución temporal de los componentes gaseosos separados en la purga del flujo de gases. Esta técnica combinada (GC-MS) brinda información estructural detallada de la mayoría de los compuestos gaseosos liberados producto del calentamiento (TD), siendo una herramienta esencial en la identificación y cuantificación de los compuestos orgánicos adsorbidos por la muestra respecto a la muestra virgen, incidiendo de

manera significativa en la caracterización del grado de agotamiento de la muestra analizada respecto al material virgen [13-16].

➤ **Análisis del espectro infrarrojo por espectrometría usando la transformada de Fourier (FTIR).**

En la espectroscopia infrarroja, un haz de luz situado en el espectro infrarrojo se hace pasar a través de la muestra analizada. Una parte de la radiación infrarroja es absorbida por la muestra y otra parte atraviesa la muestra sin sufrir cambios. El espectro resultante representa la absorción y transmisión molecular, creando una huella digital de la muestra analizada.

Como una huella digital, dos moléculas con diferente estructura, no producen el mismo espectro infrarrojo. Esto provoca que esta técnica sea especialmente útil para la identificación de materiales nuevos, la determinación de la calidad o consistencia de una muestra, así como determinar la cantidad de compuestos presentes en una mezcla. Los picos de absorción corresponden a las frecuencias de vibración entre las uniones de los átomos que conforman el material.

Debido a que cada diferente material es una combinación única de átomos, dos compuestos diferentes no producen el mismo espectro infrarrojo; por tanto, la espectroscopia infrarroja puede resultar en la identificación positiva (análisis cuantitativo) de cada material diferente. En adición, el tamaño de los picos en el espectro es una indicación directa de la cantidad de material presente, aspecto que resulta de gran utilidad en la caracterización del grado de agotamiento de las muestras de CAG respecto a una muestra virgen del mismo material [13].

➤ **Análisis de fluorescencia de rayos X (XRF).**

La técnica de fluorescencia de rayos X, "X ray fluorescence" (XRF) por sus siglas en inglés, es una técnica que se utiliza para determinar las concentraciones de elementos químicos en diversos tipos de muestras [18]. El análisis de la composición de la muestra mediante la medición de un espectro de XRF se lleva a cabo en diversas áreas de la investigación como biología, medicina, control ambiental, geología, arte por nombrar algunas [18]. Es un método analítico de alta precisión, que presenta la

ventaja de ser un método no destructivo en la mayoría de las aplicaciones además de permitir un preparado de la muestra bastante simple.

El término *fluorescencia* se utiliza para denominar el fenómeno por el cual la absorción de radiación de una energía específica, genera reemisión de radiación de una energía diferente, generalmente menor. Cada elemento químico posee orbitales electrónicos de energías características. Al producirse la remoción de un electrón de una capa interior por un fotón energético proveniente de una fuente primaria de radiación, un electrón de una capa exterior se desplaza y ocupa el hueco que se había formado.

Existe una cantidad finita de variantes de esta transición [19]. Cada una de estas transiciones produce un fotón fluorescente dotado de una energía característica que es igual a la diferencia energética entre los orbitales inicial y final. La radiación fluorescente se puede clasificar mediante el análisis de las energías de los fotones (análisis dispersivo de energía) o por separación de las longitudes de onda de la radiación (análisis dispersivo de longitud de onda).

Una vez ordenadas, la intensidad de cada radiación característica se relaciona directamente con la cantidad de cada elemento químico del material de la muestra, constituyendo la base de una poderosa técnica utilizada en química analítica. En base a estos principios el uso de la técnica de fluorescencia de rayos X permite cuantificar la cantidad de elementos químicos en forma de óxidos metálicos presentes en la muestra analizada, brindando una herramienta muy fuerte en la caracterización del nivel de agotamiento de muestras de CAG con respecto a la muestra del material virgen analizado.

➤ **Método de absorción de radiación X (XRA).**

El método de absorción de radiación X, surge como una alternativa a las técnicas convencionales de caracterización de materiales porosos, específicamente de CAGs usados en disímiles aplicaciones [13, 17]. Este método explora los efectos de absorción de radiación X por una muestra de CAG que ha sido expuesta a un haz de radiación X, el resultado de la absorción de rayos X de la muestra es almacenado como una imagen digital en escala de gris, esta imagen es convenientemente procesada para extraer la información necesaria con el objetivo de determinar el grado

de agotamiento de la muestra analizada respecto a una muestra virgen (sin usar) del mismo material [13].

La atenuación de radiación X (intensidad) responde a una ley exponencial directamente proporcional al número atómico y espesor de la muestra, así como a la energía utilizada en la exposición (poder penetrante) [19]. El carbón activado está compuesto por elementos de bajo número atómico como carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre; esto provoca que el carbón activado virgen (sin usar) sea prácticamente “transparente” a la radiación X; en contraste un carbón agotado o de uso, habrá adsorbido diferentes compuestos, los cuales aumentarían los niveles de absorción de radiación X de la muestra, esto provoca que la imagen resultante de la exposición de la muestra a un haz de rayos X pueda atribuirse a los compuestos adsorbidos por el material [13, 17].

El nuevo método de caracterización “X-Ray-Absortion” (XRA) por sus siglas en inglés el cual constituye una Novedad científica a nivel internacional, aprovecha estas diferencias en absorción de radiación X en conjunto con imágenes de radiografía digital y técnicas procesamiento digital de imágenes para emitir conclusiones acerca del grado de agotamiento de muestras de carbón activado respecto al material virgen incidiendo de manera directa en la caracterización (cuantitativa) del grado de agotamiento de este material.

El método XRA ha sido utilizado con resultados satisfactorios en la caracterización del grado de agotamiento de carbón activado granular usado en la producción de Ron en Cuba [13]; y recientemente se ha extendido al CAG utilizado en la industria médica para la producción de agua de diálisis [17].

1.2. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.

Una imagen en escala de grises puede ser definida como una función bidimensional, $f(x, y)$, donde (x, y) son coordenadas espaciales, y la amplitud de $f(x, y)$ en cualquier par ordenado (x, y) es denominado intensidad o nivel de gris de la imagen en ese punto [20, 21]. Cuando (x, y) , y los valores de amplitud de $f(x, y)$ son todos finitos y discretos, es posible decir que la imagen es una imagen digital. Cada valor $f(x, y)$ tiene una posición y valor específico. De esta manera a cada unidad de la imagen conformada por su posición e intensidad se denomina píxel [20-22].

El término Pixel, es el término más ampliamente utilizado para denotar las unidades (o la mínima unidad) de una imagen digital. El área de análisis automático de texto, puede ser utilizado para aclarar los conceptos mencionados con anterioridad.

El proceso de adquirir una imagen, el pre-procesamiento de esa imagen, extracción (segmentación) de caracteres individuales almacenando los mismos de una manera adecuada para el procesamiento por computadora y reconocer esos caracteres individuales entra en el ámbito de lo que llamamos procesamiento digital de imágenes [22]. El procesamiento digital de imágenes, como ha sido definido con anterioridad, es usado con éxito en un amplio rango de áreas de un valor económico y social excepcional.

➤ ***Orígenes del procesamiento digital de imágenes.***

Una de las primeras aplicaciones de imágenes digitales fue en la industria periodística (diarios). La introducción del sistema de transmisión de imágenes por cable Bartlane [21, 22], en los comienzos de 1920 redujo el tiempo necesario para transportar una imagen a través de Atlántico de más de una semana a menos de tres horas [22]. Aunque el sistema Bartlane no es considerado como un sistema de procesamiento digital en el contexto de la definición expuesta con anterioridad debido a que las computadoras no estaban involucradas en la creación de las mismas; sin duda representa el comienzo del procesamiento de imágenes.

La historia del procesamiento digital de imágenes está íntimamente ligado al desarrollo de la computadora digital. Las imágenes digitales necesitan capacidad de almacenamiento y poder de cómputo, de manera que el desarrollo en el campo del procesamiento digital de imágenes ha sido dependiente del desarrollo de las computadoras digitales y las tecnologías asociadas que permitieron incrementar la capacidad de almacenamiento de datos, visualización y transmisión.

Las primeras computadoras suficientemente poderosas para llevar a cabo tareas de procesamiento digital de imágenes de importancia aparecieron en los comienzos de 1960 [21, 22]. El nacimiento de lo que hoy se llama procesamiento digital de imágenes se debe en gran medida a la habilidad de esas máquinas y el comienzo de del programa espacial durante ese periodo.

Las técnicas de procesamiento digital de imágenes comienzan a finales de 1960 y comienzos de 1970 para ser usadas en imágenes médicas y astronomía. La invención a comienzos de 1970 de la tomografía axial computarizada (TAC) representa uno de los eventos más importantes en la aplicación del procesamiento digital de imágenes en diagnóstico médico. Desde 1960 hasta el día de hoy, el campo de procesamiento de imágenes ha crecido vigorosamente. De manera conjunta a las aplicaciones en medicina y el programa espacial, técnicas de procesamiento digital de imágenes han sido usadas para mejorar el contraste o los niveles de intensidad de gris en imágenes de rayos X con el objetivo de mejorar su comprensión [22].

➤ ***Etapas fundamentales en un sistema de procesamiento digital de imágenes.***

El primer paso, o acción a realizar en cualquier sistema de procesamiento digital de imágenes es la adquisición de la imagen; por lo general este proceso incluye varias etapas como el pre-procesamiento y el escalado. El siguiente paso en el sistema de procesamiento digital sería el perfeccionamiento de la imagen. Este paso se basa fundamentalmente en traer a la luz detalles oscurecidos de la imagen o resaltar algunas características de interés.

El perfeccionamiento de la imagen es un área muy subjetiva en el procesamiento digital de imágenes, ya que responde a las necesidades particulares de una aplicación determinada. El siguiente paso a realizar es la restauración de la imagen (en caso que sea necesario). El procesamiento en color es la próxima etapa de un sistema de procesamiento digital de imágenes. Esta área ha venido ganando importancia con el paso del tiempo debido a la amplia variedad de aplicaciones (Internet, detección de vegetación, visión artificial,..., etc.) [21]. El procesamiento o modificación de la resolución de la imagen constituye el siguiente paso del sistema de procesamiento digital; en este paso la transformada de Wavelets [21] juega un papel fundamental.

El paso siguiente es la compresión; como el nombre lo indica esta etapa juega con las técnicas necesarias para disminuir la cantidad de bytes necesarias para almacenar una imagen en función de las capacidades de almacenamiento o el ancho de banda disponible para el proceso de transmisión de la misma. Uno de los formatos de compresión más conocidos por los usuarios es el JPEG (Joint Photographic Experts

Group) por sus siglas en inglés. El cambio en aspectos morfológicos de la imagen o el procesamiento morfológico constituye el siguiente paso en el sistema de procesamiento. Seguidamente se procede con los procedimientos de segmentación; este último se basa en separar una imagen en sus partes constituyentes u objetos. La segmentación automática representa una de las tareas más interesantes y complicadas dentro del procesamiento digital de imágenes. La figura 1.3 muestra los pasos fundamentales en el procesamiento digital de imágenes.

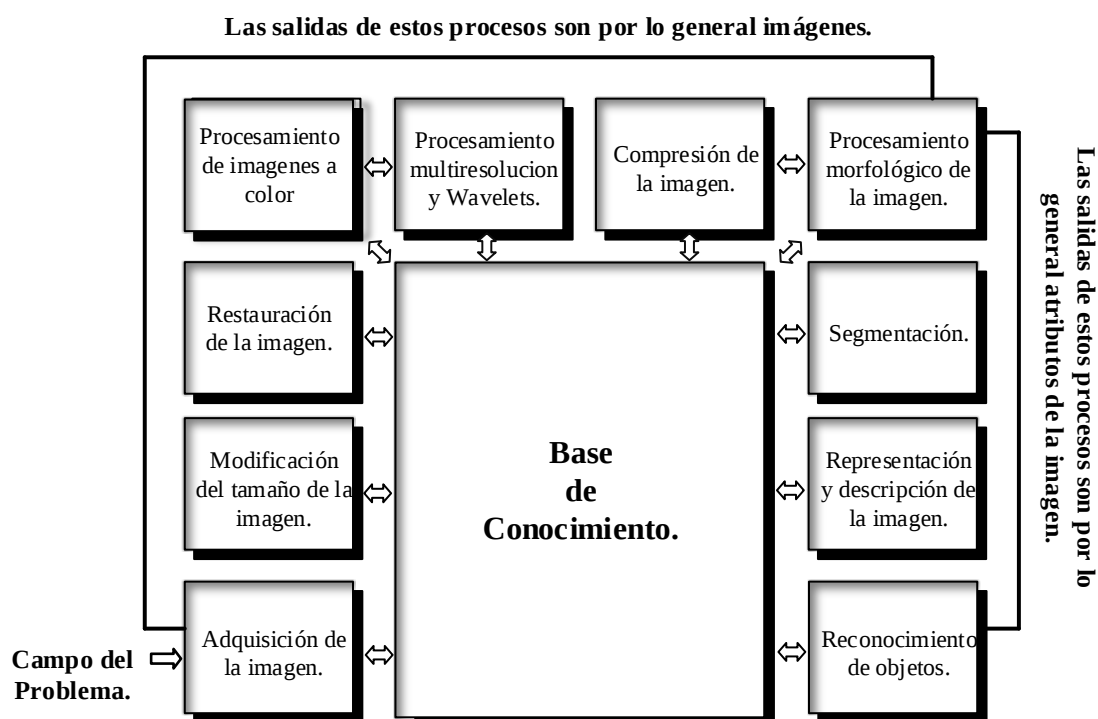


Figura.1.3: Pasos fundamentales del procesamiento digital de imágenes. (Adaptado de [8]).

La última etapa es el reconocimiento; se caracteriza principalmente por asignar un identificador (ejemplo "edificio") a un objeto específico basado en su descriptor [21]. Es posible concluir el sistema de procesamiento digital de imágenes con el desarrollo de métodos para el reconocimiento de objetos individuales en la imagen (reconocimiento de patrones), aunque no necesariamente todas las aplicaciones deben utilizar todos los pasos explicados con anterioridad.

1.2.1. HISTOGRAMA DE UNA IMAGEN.

En estadística, un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados, ya sea en forma diferencial o acumulada. Sirven para obtener una "primera vista" general, o panorama, de la distribución de la población, o la muestra, respecto a una característica, cuantitativa y continua, de la misma y que es de interés para el observador.

Las transformaciones de intensidad basadas en información extraída del histograma de una imagen juegan un papel fundamental en el procesamiento digital de imágenes. En áreas como el perfeccionamiento, compresión, segmentación y descripción, el uso del histograma resulta de importancia vital. El histograma de una imagen digital con L posibles niveles de intensidad de gris en el rango $[0, G]$, se define como una función discreta de la forma [21, 22]:

$$h(r_k) = n_k \quad (1.1)$$

Donde:

r_k : Nivel de intensidad (k) en el intervalo $[0, G]$ (adimensional).

n_k : Cantidad de píxeles de la imagen cuyo nivel de intensidad es r_k (adimensional).

El valor de G es de 255 para imágenes de 8 bits o 65535 para imágenes de 16 bits; por lo general el histograma suele expresarse en valores de gris normalizados, de manera que $[0, G] = [0, 1]$. Esto puede expresarse matemáticamente usando la expresión que se muestra a continuación [21]:

$$p(r_k) = \frac{h(r_k)}{n} = \frac{n_k}{n} \quad (1.2)$$

Donde:

n : Total de píxeles en la imagen (adimensional).

Para $k = 1, 2, \dots, L$.

Es posible notar que $p(r_k)$ constituye un estimado de la probabilidad de ocurrencia del nivel de intensidad r_k .

El histograma de una imagen brinda información valiosa acerca de la distribución de píxeles en un determinado nivel de gris en la imagen, esto hace posible realizar diferentes operaciones utilizando la información que brinda el histograma; aunque el concepto de histograma está definido para valores discretos en el intervalo $[0, G]$.

1.2.2. TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER EN DOS DIMENSIONES.

La transformada de Fourier constituye una piedra angular en el filtrado lineal de imágenes digitales [21]. Esta herramienta ofrece una flexibilidad considerable en el diseño de filtros digitales así como en áreas como el perfeccionamiento de la imagen, restauración, compresión y otras; también de interés práctico. Sea $f(x, y)$ una función discreta de dos dimensiones (imagen), para $x = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ y $y = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, representando una imagen de $M \times N$ filas y columnas. La transformada bidimensional discreta de Fourier DFT (por sus siglas en inglés) de f , denotada por $F(u, v)$, esta dada por la ecuación 1.3 [21, 22]:

$$F(u, v) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j\left(\frac{2\pi}{M}\right)u x} e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)v y} \quad (1.3)$$

Para: $u = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ y $v = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

Es posible expandir la exponencial en senos y cosenos con las variables u y v determinando sus frecuencias [21, 22]. El dominio de frecuencia es simplemente el sistema de coordenadas expandido por $F(u, v)$ con u y v como variables (frecuencias). La región rectangular $M \times N$ definida por $u = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ y $v = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ se conoce como rectángulo de frecuencia [20-22]. Es posible notar que el tamaño del rectángulo de frecuencia coincide con la dimensión de la imagen de entrada. La inversa de la transformada discreta de Fourier en dos dimensiones viene dada por la expresión:

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} F(u, v) e^{j\left(\frac{2\pi}{M}\right)u x} e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)v y} \quad (1.4)$$

Para: $x = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ y $y = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

Los valores de $F(u, v)$ en la ecuación 1.4 son referidos en la literatura como coeficientes de expansión de Fourier [20, 22]. El valor de la transformada discreta de Fourier en dos dimensiones en el origen de coordenadas ($F(0,0)$) es denominado componente de directa de la transformada [21]. Este término se hereda del campo de la ingeniería eléctrica y está directamente relacionado con el concepto de tensión o corriente directa (tensión o corriente de frecuencia cero). Es posible notar que para $u = v = 0$ la ecuación 1.8 adopta la forma:

$$DC_{component} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(x, y) \quad (1.10)$$

Para: $x = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ y $y = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

De esta manera el valor de la transformada discreta de Fourier en dos dimensiones en el origen de coordenadas coincide con la suma de los valores de intensidad de todos los píxeles en la imagen analizada. Incluso cuando $f(x, y)$ es real, por lo general su transformada es compleja. El método más utilizado para visualizar y analizar el resultado de la transformada es visualizar su espectro (la magnitud de $F(u, v)$) o la imagen resultante de este.

1.2.3. FILTRADO ESPACIAL.

El filtrado espacial en procesamiento digital de imágenes (PDI), está basado en operaciones de vecindad deslizante. Estas operaciones trabajan con los valores de los píxeles en la vecindad y los correspondientes valores de una sub-imagen que posee la misma dimensión que la vecindad utilizada [20-22]. Esta sub-imagen es denominada filtro, mascara, núcleo, plantilla o ventana [21], siendo los tres primeros términos la terminología que prevalece.

Los valores en una sub-imagen de filtro son referidos como coeficientes en vez de píxeles. El concepto de filtrado tiene su base en el uso de la transformada de Fourier para procesamiento de señales en el llamado dominio de la frecuencia [21]. El termino filtrado espacial tiene como objetivo diferenciar los procesos de filtrado de vecindad deslizante respecto a los procesos de filtrado tradicionales en el dominio de la

frecuencia. De manera general, el filtrado lineal de una imagen f de dimensiones $M \times N$ con una máscara o núcleo de tamaño $m \times n$ está dado por la ecuación 1.5 [22]:

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (1.5)$$

Con:

$$a = \frac{m-1}{2} \text{ y } b = \frac{n-1}{2} \quad (1.6)$$

Donde:

$g(x, y)$: Imagen Filtrada.

$w(s, t)$: Mascara o núcleo del filtro.

m : Numero de columnas en la máscara del filtro.

n : Numero de filas en la máscara del filtro.

La operación de filtrado espacial en la imagen completa se garantiza para: $x = 0, 1, 2, \dots, M \rightarrow \infty$ y $y = 0, 1, 2, \dots, N \rightarrow \infty$. De esta forma es posible asegurar que la máscara procesa todos los píxeles en la imagen. El proceso de filtrado lineal que se muestra en la ecuación 1.5 es similar al concepto de convolución, que también tiene su origen en el dominio de la frecuencia. Teniendo en cuenta esto, las operaciones de filtrado espacial suelen llamarse: "convulsionando una máscara con una imagen".

De manera similar, las máscaras de los filtros suelen llamarse mascarar de convolución. Los filtros espaciales no lineales también se basan en operaciones de vecindad deslizante. En general, la operación de filtrado (lineal o no lineal) utiliza los valores de los píxeles en la vecindad analizada, y no necesariamente usa coeficientes en la suma de productos que se muestra en la ecuación 1.5 [22].

Un ejemplo de esto es la aplicación de filtros no lineales a la reducción de ruido, utilizando como función base el cómputo de la mediana del valor de intensidad de gris en la vecindad en la que se encuentra el filtro. El cálculo de la mediana es una operación no lineal así como el cálculo de la varianza [21, 22].

El mecanismo de filtrado espacial en PDI se muestra a continuación en la figura 1.4.

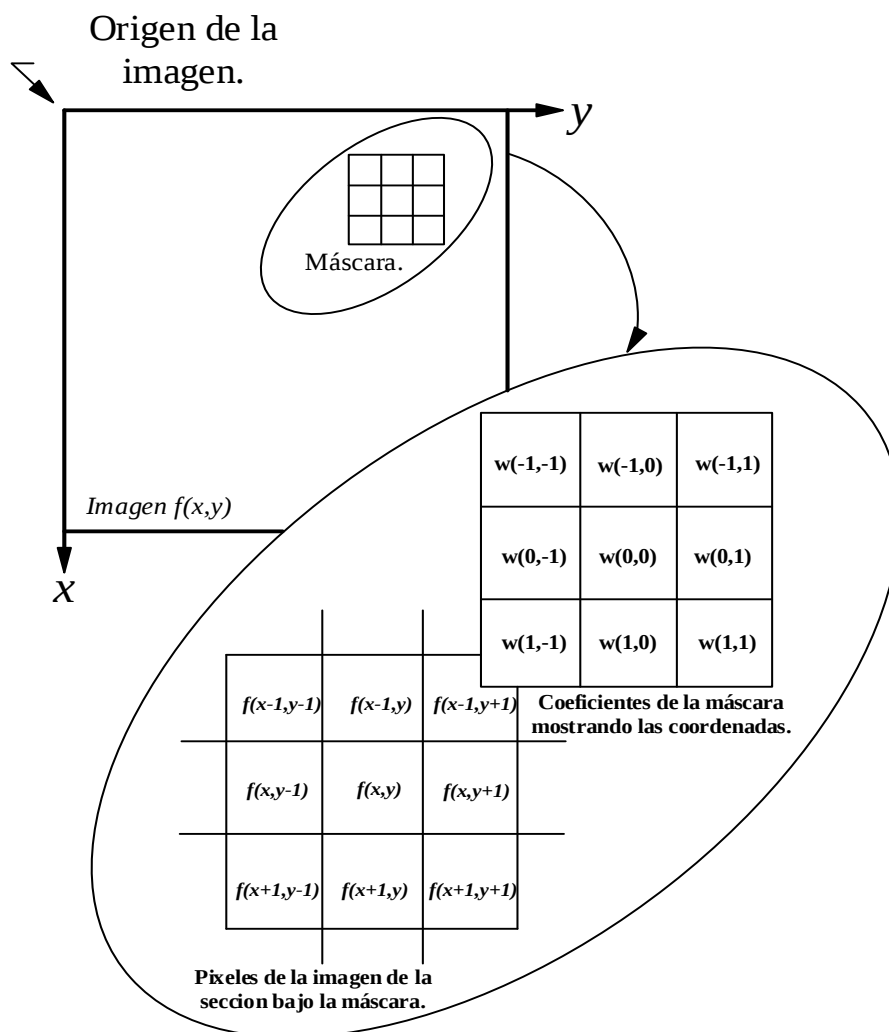


Figura 1.4. Mecanismo de filtrado espacial en PDI. (Adaptado de [16]).

Una consideración importante a la hora de implementar operaciones de vecindad deslizante para filtrado espacial es el problema que surge cuando el centro del filtro se acerca al borde de la imagen. Considerando (como ejemplo) una máscara cuadrada de $n \times n$. Al menos un borde de dicha máscara coincidirá con el borde de la imagen cuando el centro de la máscara esté a una distancia de $(n - 1)/2$ píxeles del borde de la imagen. Si el centro de la máscara se mueve más cerca del borde, una o más filas o columnas de la máscara estarán fuera de la imagen.

Existen varias formas de manejar esta situación. La más simple consiste en limitar las incursiones del centro de la máscara del filtro a una distancia no menor que $(n - 1)/2$ píxeles del borde de la imagen (ver ecuación 1.6) [22]. La imagen filtrada resultante será más pequeña que la imagen original, pero todos los píxeles de esta habrán sido procesados en su totalidad por la máscara.

Si se requiere que la imagen filtrada sea del mismo tamaño que la imagen original, entonces la solución que se emplea usualmente consiste en filtrar todos los píxeles solo con la sección de la máscara que está completamente contenida en la imagen. Con este último método existirán píxeles cercanos a los bordes de la imagen que habrán sido procesados de manera parcial por una máscara incompleta [20-22]. La única forma de obtener una imagen perfectamente filtrada es limitando el número de incursiones del centro de la máscara a una distancia no menor que $(n - 1)/2$ píxeles del borde de la imagen original aunque esto signifique que la imagen filtrada resultante sea más pequeña que la imagen original.

1.3. ENTORNO DE PROGRAMACIÓN MATLAB®.

MATLAB® es un potente lenguaje diseñado para la computación técnica [24]. El nombre MATLAB® tiene su origen en la expresión en inglés "Matrix Laboratory", teniendo en cuenta que el tipo de dato básico que gestiona este software es una matriz ("array") [24]. MATLAB® puede ser utilizado en computación, matemática, modelado y simulación, análisis y procesamiento de datos, visualización y representación de gráficos, así como para el desarrollo de algoritmos e interfaces gráficas de usuario.

El lenguaje de programación de MATLAB® es del tipo interpretado, esto significa que no requiere un código a ser compilado, ya que consiste en "scripts" que son interpretados en tiempo real por un intérprete (programa que convierte el código escrito a lenguaje de máquina), aspecto que permite maximizar la eficiencia de los programas [24, 25]. Lo anterior implica que utilizar MATLAB® es equivalente a programar en MATLAB®. Esta característica particular tiene una gran ventaja y es que permite modificar una rutina o una función sin interrumpir la ejecución del programa.

Cuando éste llame a la rutina, la ejecutará sin que haya que hacer compilaciones ni enlazados. Adicionalmente no es necesario preocuparse de reservar memoria ni tareas similares muy importantes en otros lenguajes de programación.

1.3.1. MATLAB® EN EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES.

El entorno matemático y de creación MATLAB® es ideal para el procesado de imágenes, ya que estas imágenes son, desde un punto de vista matemático, matrices. El "toolbox" o caja de herramientas implementado en MATLAB® para PDI proporciona al software un conjunto de funciones que amplía las capacidades de desarrollo de aplicaciones y nuevos algoritmos en el proceso y análisis de imágenes. Esta caja de herramientas incorpora funciones para [24]:

- Diseño de filtros.
- Mejora y retocado de imágenes.
- Análisis y estadística de imágenes.
- Operaciones morfológicas, geométricas y de color.
- Transformaciones en dos dimensiones (2D).

El procesamiento digital de imágenes es un campo de trabajo absolutamente crucial para el diagnóstico en campos como la medicina, astronomía, geofísica, ciencias medioambientales, análisis de datos de laboratorio, inspección industrial, etc.

Los programas actuales de procesado y análisis de imágenes se clasifican en dos categorías:

- Librerías de bajo nivel para programadores profesionales.
- Paquetes de aplicación, con capacidades limitadas de personalización.

El "toolbox" de procesamiento digital de imágenes de MATLAB® entra en la categoría de familias de funciones que, desde el entorno de trabajo de MATLAB®, permitirá al profesional efectuar una exploración exhaustiva y desde un punto de vista matemático de las imágenes y gráficos que se deseen tratar o analizar [27].

1.3.2. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO EN MATLAB® (MATLAB GUIDE).

Para que un lenguaje de programación revele todo su potencial debe permitir que los usuarios puedan interactuar con los programas de una forma cómoda. Teniendo en cuenta esta idea se desarrolló el concepto de GUI (Graphical User Interface). En MATLAB® es posible desarrollar interfaces gráficas de usuario de dos maneras: desde

cero, definiendo por texto (código) cada una de las partes que configuran la GUI; o haciendo uso de la utilidad que incorpora MATLAB® con este objetivo: GUIDE.

GUIDE es un entorno de programación visual disponible en MATLAB® para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos [27, 28]. Posee las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++ [28-30]. Para construir una GUI usando GUIDE es necesario generar una distribución de las partes que formaran la interfaz gráfica (botones, textos, paneles, desplegables, etc.); GUIDE compilará estos objetos en un fichero con extensión *.fig* y creará un fichero *.m* que debe ser codificado o programado para obtener las funcionalidades deseadas para cada uno [27].

1.3.3. GENERACIÓN DE EJECUTABLES (.EXE).

A partir del archivo *.m* o código MATLAB® es posible generar archivos ejecutables (.exe), de manera que la interfaz gráfica desarrollada pueda ser ejecutada en una PC que no tenga MATLAB® instalado [27].

La forma de realizar esto es usando el compilador de MATLAB® (MATLAB® compiler™). MATLAB® Compiler™ permite compartir programas de MATLAB® como aplicaciones independientes, MapReduce y Spark™, aplicaciones web y complementos de Microsoft® Excel® [38]. Es posible desplegar aplicaciones y complementos de forma gratuita mediante MATLAB® Runtime, que puede ser empaquetado con la aplicación o descargarse durante la instalación.

Para crear un archivo .exe en MATLAB® ejecutamos en la ventana de comandos el código siguiente:

```
>> mcc -m nombreaplicacion.m nombreaplicacion.fig
```

El compilador creará dos archivos fuente (C source file), un archivo con extensión *.ctf* y la aplicación o ejecutable (.exe). Para ejecutar la aplicación en una PC que no tenga MATLAB® instalado es necesario instalar previamente el MATLAB® Runtime [27].

1.4. CARACTERIZACIÓN DEL CAG UTILIZADO EN LAS PLANTAS DE PRE-TRATAMIENTO PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA DE DIÁLISIS EN CUBA.

En el hospital cabecera de la provincia Santiago de Cuba "Saturnino Lora" la determinación del grado de agotamiento de los filtros o columnas de CAG utilizados para el tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis se basa principalmente en las mediciones de conductividad del agua a la salida del filtro de CAG, así como en el uso de indicadores químicos (colorimétricos de poca precisión) que detectan la presencia de cloro libre en el agua.

Las mediciones de conductividad son determinantes para sacar conclusiones respecto al estado del filtro de CAG en su totalidad, pero no son capaces de brindar información detallada sobre el estado de agotamiento de las diferentes capas de CAG a diferentes profundidades del filtro. La conductividad, expresa de manera indirecta la presencia de iones en el agua con capacidad para conducir la corriente eléctrica. Cuando se analizan iones individuales, la conductividad muestra un comportamiento lineal respecto a la concentración del ion analizado, de manera que si la concentración del ion aumenta o disminuye en la disolución, la conductividad cambia de manera directamente proporcional a este.

Por el contrario, cuando se analiza la conductividad de varios iones combinados en disolución, la linealidad de la conductividad respecto a la concentración se pierde, de manera que a altas concentraciones de iones disueltos es posible obtener valores relativamente bajos de conductividad o viceversa.

En adición, la efectividad del filtro de CAG en la adsorción del cloro libre presente en el agua está directamente relacionada con la altura y diámetro de la cama de CAG así como con el tiempo de contacto del agua con la cama, lo que influye directamente en el flujo de agua a utilizar y por tanto la presión del sistema. La reacción química que ocurre entre el CAG y el cloro libre en el sistema, en forma de ácido hipocloroso (HOCL) o el ion hipoclorito (OCL^-), es una reacción química muy rápida que ocurre en los primeros 20 cm de la cama de CAG, provocando que esta primera capa de carbón o tope del filtro se agote mucho más rápido que las capas inferiores [13].

Si el tope del filtro pierde la habilidad de adsorber cloro libre en el sistema, la altura de la cama varía virtualmente, de 1m a 80 cm, aproximadamente, incidiendo de manera

directa en la adsorción de cloro libre en el agua, ya que la altura efectiva de adsorción de cloro libre de la cama de CAG se ve disminuida en un 20 % de su totalidad. Esta variación virtual de la altura de la cama de CAG no puede ser determinada utilizando mediciones de conductividad o indicadores químicos de comprobación de cloro libre disuelto, de manera que la mayoría de las veces el filtro completo de CAG es declarado como agotado y es desechado, pudiéndose reutilizar más del 50 % del CAG granular que se encuentra en las capas más bajas del filtro, sin tener en cuenta que este carbón no se somete a un proceso de regeneración adecuado.

Teniendo en cuenta lo planteado con anterioridad recientemente se ha comenzado a aplicar el método XRA en las plantas de tratamiento de agua de las provincias de Santiago de Cuba y Ciego de Ávila con el objetivo de realizar una caracterización adecuada del grado de agotamiento del filtro aprovechando las ventajas que brinda este método en lo referente a la utilización de los recursos del hospital, principalmente en el uso de equipos de radiografía digital, que posibilitan la implementación del método de manera rápida y sencilla. Aun así, todo el proceso de cálculo y procesamiento digital necesario para emitir conclusiones acerca del grado de agotamiento de las muestras analizadas debe realizarse de forma manual utilizando la ventana de comandos del Matlab o "scripts" específicamente diseñados para esta función; aspecto que incide de manera negativa en el tiempo necesario para realizar un estudio de agotamiento completo, lo cual provoca demoras en la determinación del estado actual del filtro utilizado y en consecuencia la estrategia de regeneración a utilizar así como las posibilidades de reúso del material bajo estudio.

1.4.1. MÉTODO DE ABSORCIÓN DE RADIACIÓN X (XRA).

Las radiografías digitales obtenidas mediante la aplicación del método de absorción de radiación X (XRA) se realizan utilizando una cubeta de rayos X [13, 17]. La cubeta está hecha de material acrílico transparente (baja absorción de radiación X). Un lado de la cubeta fue etiquetado indicando el espesor de la muestra "x" (en mm). Se consideró un escalón de espesor " Δx " de 4 mm. La cubeta de rayos X se preparó para realizar radiografías de rayos X en diferentes condiciones con el fin de optimizar la técnica considerando el grosor óptimo y la energía a aplicar. La figura 1.5 muestra la cubeta de rayos X utilizada.

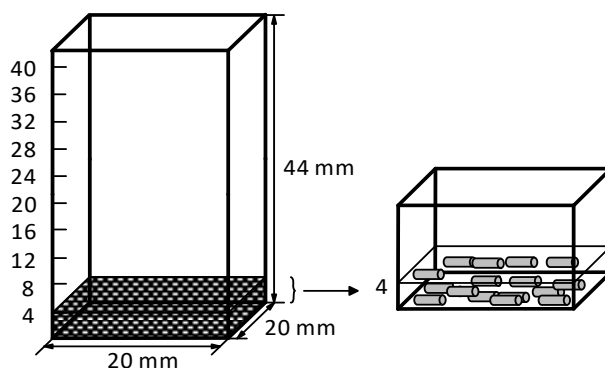


Figura 1.5. Cubeta de rayos X. (Adaptado de [13]).

Todos los experimentos se realizaron utilizando la forma del paquete que se muestra en la figura 1.5, ya que el proceso de atenuación es principalmente inducido por los compuestos adsorbidos en el CAG. La forma estructural del CAG no tiene influencia directa en los resultados de la medición (barras, carbón activado triturado o pulverizado), solo las características químicas de los compuestos adsorbidos determinan la atenuación del fotón.

El espacio libre entre las partículas puede considerarse constante, independientemente del empaquetamiento [13-17], en términos de que la porosidad del lecho es igual a la ración del volumen del espacio libre y el volumen total de la muestra de CAG (alrededor del 40%). Entre experimentos, se debe aplicar la misma forma de cubeta.

La cubeta de rayos X (1) se coloca debajo del aparato de rayos X (2) que se expondrá en el haz de radiación de rayos X. Los fotones incidentes se atenúan en la muestra de GAC. Los fotones atenuados se registran en un material fotosensible (sensor) (3) y la intensidad registrada de los fotones atenuados se transforma en una imagen en escala de grises utilizando la unidad de conversión (4). Cuanto más se atenúan los fotones, más blanca es la imagen digital en escala de grises obtenida; en contraste, una imagen digital más oscura significa fotones menos atenuados. En otras palabras, un material de baja densidad y número atómico (mala absorción / atenuación de fotones) producirá una imagen oscura y otro material con una alta atenuación de fotones (alta densidad y número atómico) una imagen en blanco. La configuración experimental se presenta en la figura 1.6.

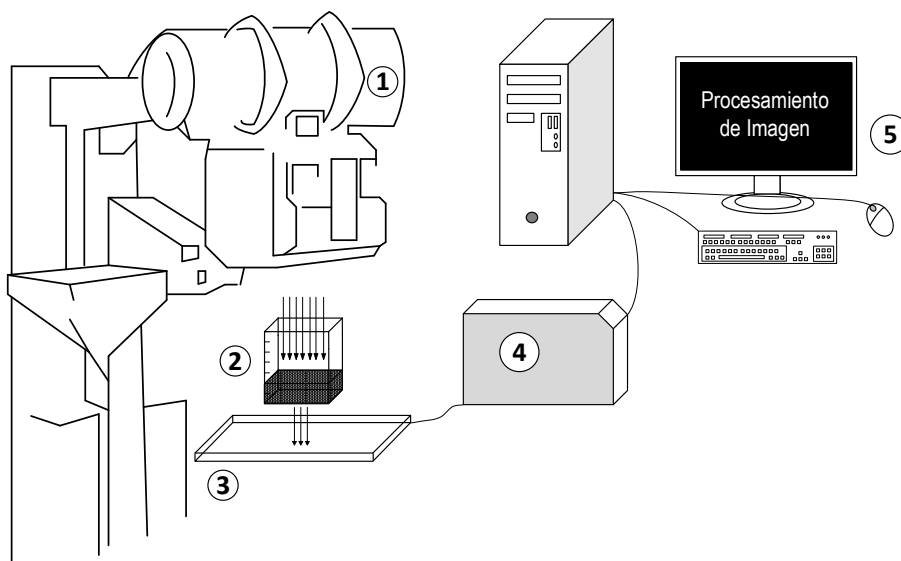


Figura 1.6. Esquema del set-up experimental del método XRA. (Adaptado de [13]).

Finalmente, la imagen en escala de grises se procesa convenientemente por PC (5) utilizando la caja de herramientas MATLAB® para el procesamiento de imágenes digitales.

Las muestras tomadas a diferentes profundidades del filtro de carbón activado, con el objetivo de ser analizadas utilizando el método XRA se colocan en cubetas de acrílico utilizando el andamiaje experimental mostrado en la figura 1.6 [17]. Cada recorte realizado mostrará diferencias en los niveles de gris o concentración espacial en función de la naturaleza de los compuestos adsorbidos y del grado de agotamiento de las muestras adquiridas en el filtro a analizar [13, 17].

Para que sea posible sacar conclusiones acerca del nivel de agotamiento de la muestra analizada respecto a la muestra virgen del mismo material, cada muestra de CAG correspondiente a cada profundidad del filtro bajo estudio debe ser analizada de manera independiente. Con este objetivo las muestras extraídas del filtro (ver figura 1.2) se colocan en cubetas (ver figura 1.5) individuales y a cada una de estas cubetas se le asigna una profundidad. Todas las cubetas se colocan sobre una bandeja con identificadores que está situada por encima del material fotosensible (ver figura 1.6), de manera que sea posible saber a qué profundidad corresponde cada cubeta. Este proceso permite obtener una radiografía digital de todas las profundidades del filtro analizado sin tener que realizar una radiografía para cada profundidad. Una vez

realizada la radiografía, cada espacio de la imagen de radiografía digital correspondiente a cada profundidad debe analizarse de manera independiente; con este objetivo se realizan recortes individuales de cada profundidad, los cuales serán analizados respecto a la muestra virgen. La figura 1.7 muestra una imagen de radiografía digital que contiene todas las muestras correspondientes a cada profundidad del filtro analizado y una muestra virgen.

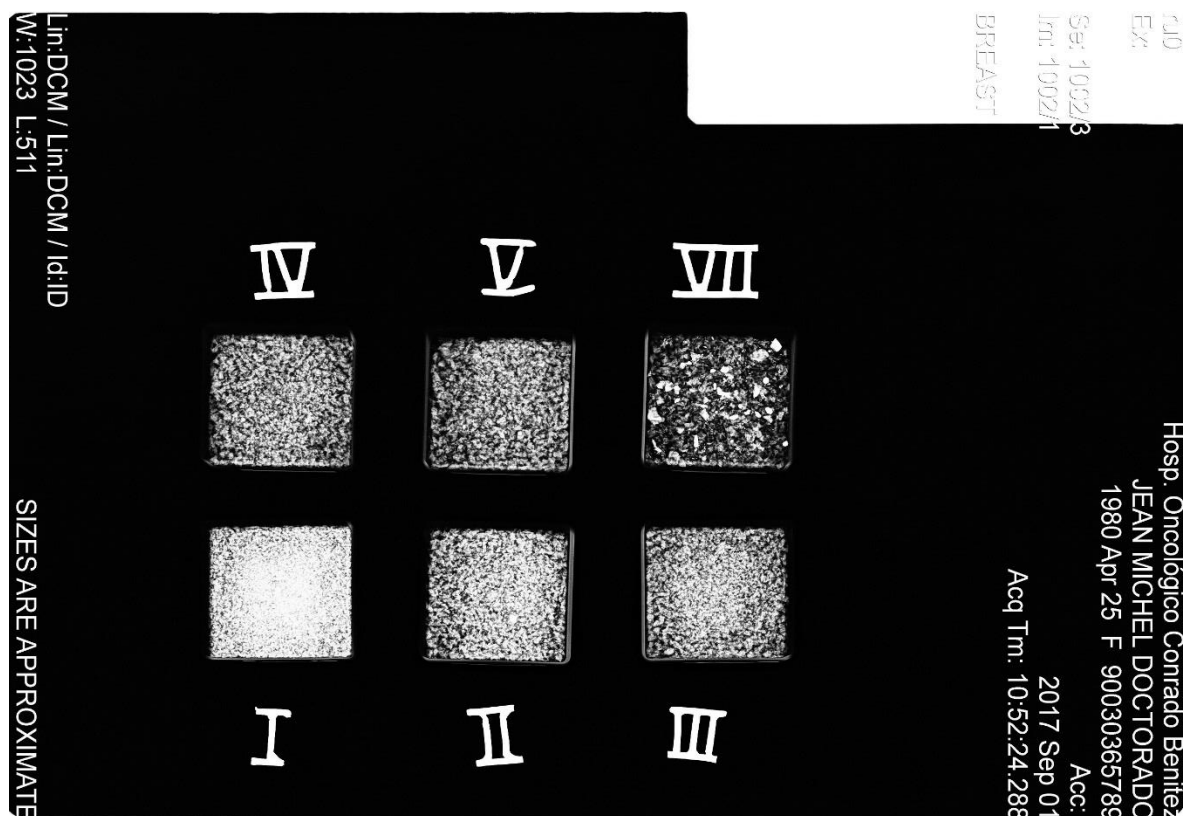


Figura 1.7. Radiografía digital que contiene la proyección 2D de las muestras de CAG tomadas a diferentes profundidades en el filtro de tratamiento de agua y una muestra virgen.

En la figura 1.7 es posible observar seis cuadrados identificados con números romanos que van desde el número uno al número siete. El cuadrado identificado con el número uno corresponde a la muestra del tope del filtro (GAC-Tope (10 cm), ver figura 1.2), el cuadrado identificado con el número dos corresponde a la muestra ubicada entre los 20 y 40 cm del filtro (GAC-30 cm) y así sucesivamente hasta llegar a la muestra del fondo del filtro identificada con el número cinco y la muestra virgen identificada con el número siete. Cada cuadrado será recortado (ver sección 2.2.2) de manera manual

utilizando el "toolbox" de MATLAB® y será entonces procesado con el objetivo de extraer la información necesaria para emitir conclusiones acerca del grado de agotamiento de la muestra analizada respecto a la muestra virgen.

➤ **Procesamiento de las imágenes de radiografía digital obtenidas usando el método XRA.**

Los histogramas (ver sección 1.2.1) de imágenes de rayos X se obtuvieron automáticamente utilizando la caja de herramientas MATLAB®. El espectro de frecuencia-amplitud de las imágenes de rayos X se determinó utilizando la Transformada Rápida de Fourier en dos dimensiones (FFT2) también implementada utilizando la caja de herramientas de MATLAB® (ver sección 1.2.2).

Las imágenes de rayos X del CAG agotado se presentan con puntos blancos típicos [13, 17]. Se utilizó un filtro paso bajo gaussiano para eliminar digitalmente este tipo de interferencias durante los experimentos. Los valores de la matriz Kernel (máscara de filtro) [13, 17] utilizados por el filtro de Gauss se calculan utilizando las ecuaciones (1.7) y (1.8).

$$h_g(n_1, n_2) = e^{\frac{-(n_1^2 + n_2^2)}{2\sigma^2}} \quad (1.7)$$

$$h(n_1, n_2) = \frac{h_g(n_1, n_2)}{\sum_{n_1} \sum_{n_2} h_g} \quad (1.8)$$

Donde:

n_1, n_2 : Valores de la máscara del filtro (adimensional).

σ : Desviación estándar (adimensional).

El filtrado lineal de una imagen digital de "M x N" (filas y columnas) con una máscara de filtro de "m x n" puede implementarse utilizando las ecuaciones (1.5) y (1.6). El código de software utilizado para las operaciones de filtrado también se implementó utilizando MATLAB®. El filtro gaussiano implementado utiliza una matriz cuadrada Kernel de 8 filas y 8 columnas con una desviación estándar $\sigma = 2$. Generalmente, se recomienda que el tamaño de la máscara de filtro sea de tres a cinco veces el valor sigma (σ) [20-22].

➤ **Relación entre la intensidad de escala de grises (GSI) y la intensidad fotónica atenuada (N) en la radiografía digital.**

Dado que el efecto fotoeléctrico es el efecto predominante para la tensión de trabajo utilizada en radiografía de diagnóstico clínico, la ley que rige la atenuación de los fotones se puede expresar mediante la ecuación 1.9 [19].

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (1.9)$$

Donde:

N : Intensidad final o número de fotones atenuados (adimensional).

N_0 : Intensidad inicial o número de fotones incidentes (adimensional).

μ : Coeficiente de absorción lineal (en mm⁻¹).

x : Espesor de la muestra (en mm).

Analizando la ecuación (1.9), podemos deducir que la intensidad final " N " (fotones atenuados) que sale del material analizado, de espesor " x " depende directamente de la intensidad inicial " N_0 " (fotones incidentes), y el coeficiente de absorción lineal " μ " que depende de las características del material, como: número atómico (Z) y su densidad (ρ); y puede considerarse constante.

La intensidad de fotones atenuada (N) tiene un equivalente directo en los valores de intensidad de escala de grises (GSI) en la imagen radiográfica de rayos X [13, 17]. Por lo tanto, es posible establecer una relación directa entre la intensidad del fotón que alcanza el material fotosensible y la imagen formada en escala de grises. Esta correlación se puede expresar matemáticamente usando la ecuación (1.10).

$$GSI = f(N) \quad (1.10)$$

Donde:

GSI : Nivel de Gris (adimensional).

N : Intensidad de los fotones atenuados (adimensional).

La ecuación (1.10) expresa la intensidad de escala de grises (GSI) en función de la intensidad fotónica atenuada (N). De acuerdo con la ecuación (1.9), la intensidad

fotónica inicial (N_0) y la intensidad fotónica atenuada (N) están correlacionadas exponencialmente. Según la ecuación (1.10), es posible expresar GSI como una función exponencial equivalente de la intensidad de escala de grises inicial (GSI_0) usando la ecuación (1.11).

$$GSI = GSI_0 \cdot e^{\mu \cdot x} \quad (1.11)$$

Donde:

GSI: Nivel de gris de los fotones atenuados (en niveles de gris).

GSI_0 : Nivel de gris de los fotones incidentes (en niveles de gris).

La intensidad en escala de grises de los fotones incidentes (GSI_0) se calculó realizando radiografías de rayos X en una cubeta de rayos X vacía (sin muestra de CAG) [17]. El valor de gris (GSI) encontrado a 125 mAs y 22 keV fue de aproximadamente 0,0039 (22keV/125 mAs fue el valor óptimo de energía para realizar los experimentos) [17]. En la cubeta de rayos X vacía, $GSI = GSI_0$, por lo tanto derivado de la ecuación. 1.11, $\mu = 0$.

➤ **Concentración espacial.**

Se ha demostrado en publicaciones recientes [13, 17] que el valor de intensidad de gris en el histograma (GSI) es consistente con una determinada combinación de compuestos químicos, los cuales en dependencia de su peso atómico o número atómico efectivo pueden causar mayor o menor atenuación fotónica variando el valor de GSI en la escala de gris normalizada.

La cantidad aproximada de una determinada combinación de compuestos químicos adsorbidos se describe de manera más confiable utilizando el concepto de concentración espacial (S_c). Se ha demostrado que similares valores de intensidad de gris GSI (indicando que los compuestos adsorbidos poseen la misma naturaleza química) pueden arrojar valores diferentes en la concentración espacial S_c (indicando diferencias en la cantidad de compuestos adsorbidos de la misma naturaleza química). Basados en el concepto de histograma de una imagen digital, la concentración espacial S_c (en píxeles), para un valor de intensidad de gris (GSI) específico, puede ser

relacionado con la escala de gris normalizada cuando el total de píxeles (T_p) maximiza ($T_p(\text{GSI})$) y puede ser expresado utilizando la ecuación 1.12.

$$S_c(\text{GSI}) = T_p(\text{GSI}) \quad (1.12)$$

Donde:

$S_c(\text{GSI})$: Concentración espacial del nivel de intensidad de gris GSI (en píxeles).

$T_p(\text{GSI})$: Total de píxeles correspondientes con el nivel de gris GSI (adimensional).

Utilizando el concepto de concentración espacial, la abundancia relativa de los compuestos adsorbidos en la superficie del CAG puede ser cuantificada y de esta manera caracterizar (cuantitativamente) el nivel de agotamiento de las muestras de CAG utilizadas en filtros para disímiles usos, no solo en la industria médica [13-17]. La concentración espacial (S_c) se calcula basado en la distribución de niveles de intensidad de gris del histograma de la imagen de la muestra analizada. Teniendo en cuenta que la muestra del tope del filtro es la muestra más agotada en el sistema [13-17], el valor de intensidad de gris de la muestra del tope del filtro se toma como valor de referencia para realizar las comparaciones con otras muestras del filtro y la muestra virgen.

Los métodos actuales de caracterización constituyen herramientas poderosas en la caracterización del grado de agotamiento de CAGs para disímiles usos. No obstante, la adquisición del equipamiento necesario para llevar a cabo estas técnicas resulta costoso para nuestro país. La utilización del equipamiento necesario para desarrollar estos métodos necesita de un entrenamiento especial así como requisitos específicos respecto a las condiciones de los locales en los que deben ser utilizados este tipo de equipamiento. Todo esto añadido a nuestras limitaciones actuales, hace realmente difícil la utilización de técnicas de caracterización de primer nivel en las plantas de pre-tratamiento, haciéndose necesario encontrar alternativas confiables para realizar el proceso de caracterización de este recurso.

CONCLUSIONES

Luego de analizar los métodos actuales de caracterización de CAG, es posible afirmar que la aplicación de los métodos para la caracterización del CAG utilizado en las plantas de pre-tratamiento para la producción de agua para diálisis resulta cara y difícil. El método de absorción de radiación X (XRA) constituye una alternativa confiable para la caracterización del grado de agotamiento de este material. Aun así existen demoras en el proceso de cálculo al realizar de forma manual el proceso de caracterización del CAG utilizando el software MATLAB®, que aunque es una plataforma potente en el procesamiento de imágenes, no se explotan sus potencialidades para automatizar el proceso.

Capítulo 2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO USANDO MATLAB®.

INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describe el proceso de diseño e implementación de la interfaz gráfica de usuario propuesta, para la automatización del proceso de caracterización de CAGs de uso médico en plantas de pre-tratamiento para asistir los tratamientos de hemodiálisis. Se describen las funcionalidades que brinda la interfaz y se analizan las prestaciones y beneficios de la aplicación informática desarrollada según normas internacionales creadas al efecto y la experiencia en el uso de la herramienta en diferentes industrias. Por último se analizan las ventajas económicas, sociales y medioambientales que ofrece la aplicación del sistema informático propuesto en el sistema de purificación.

2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA PROPUESTA

En el capítulo anterior se describió el proceso de caracterización de CAG de uso médico así como los métodos actuales utilizados para la caracterización del grado de agotamiento de este material. Se analizaron los conceptos básicos de histograma de una imagen, transformada discreta de Fourier en dos dimensiones aplicada a imágenes, filtrado espacial así como los pasos fundamentales en un sistema de procesamiento digital de imágenes. Se realizó además un análisis del entorno de programación MATLAB®, su aplicación en PDI y las opciones que brinda la herramienta GUIDE. Se describieron las funcionalidades que brinda GUIDE para la implementación y operación de interfaces gráficas de usuario así como la posibilidad de generar ejecutables que pueden ser utilizados en computadoras que no tengan MATLAB® instalado siempre que se instale el MATLAB® Runtime previamente. Se realizó también un análisis del proceso de caracterización de los CAGs utilizados en las plantas de pre-tratamiento para la producción de agua para diálisis en nuestro país y se describe de manera breve los fundamentos del método XRA.

Todo lo mencionado con anterioridad constituye el andamiaje teórico indispensable para el desarrollo de la herramienta de software que se propone en este trabajo.

2.2. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ.

El diseño gráfico de la interfaz es una etapa fundamental en el desarrollo de software. Cuanto más práctica y funcional sea la interfaz diseñada mejores resultados se obtendrán por parte del usuario en la tarea que se esté desarrollando.

Los histogramas, espectros de frecuencia en dos dimensiones, parámetros de filtrado digital, imagen filtrada, concentración espacial (S_C), nivel de intensidad de gris inicial o de referencia para la calibración (GS_{I_0}) y nivel de intensidad de gris de la muestra (GS_I), coeficiente de atenuación lineal (μ) y espesor de muestra (x) deben mostrarse en la interfaz; además de los parámetros necesarios para realizar la calibración. A todos los parámetros mencionados con anterioridad se agregan las herramientas tradicionales asociadas a interfaces gráficas como: pestañas, botones, opciones de zoom, giro 3D, movimiento etc... En la figura 2.1 se muestra el diseño gráfico de la propuesta de interfaz gráfica.

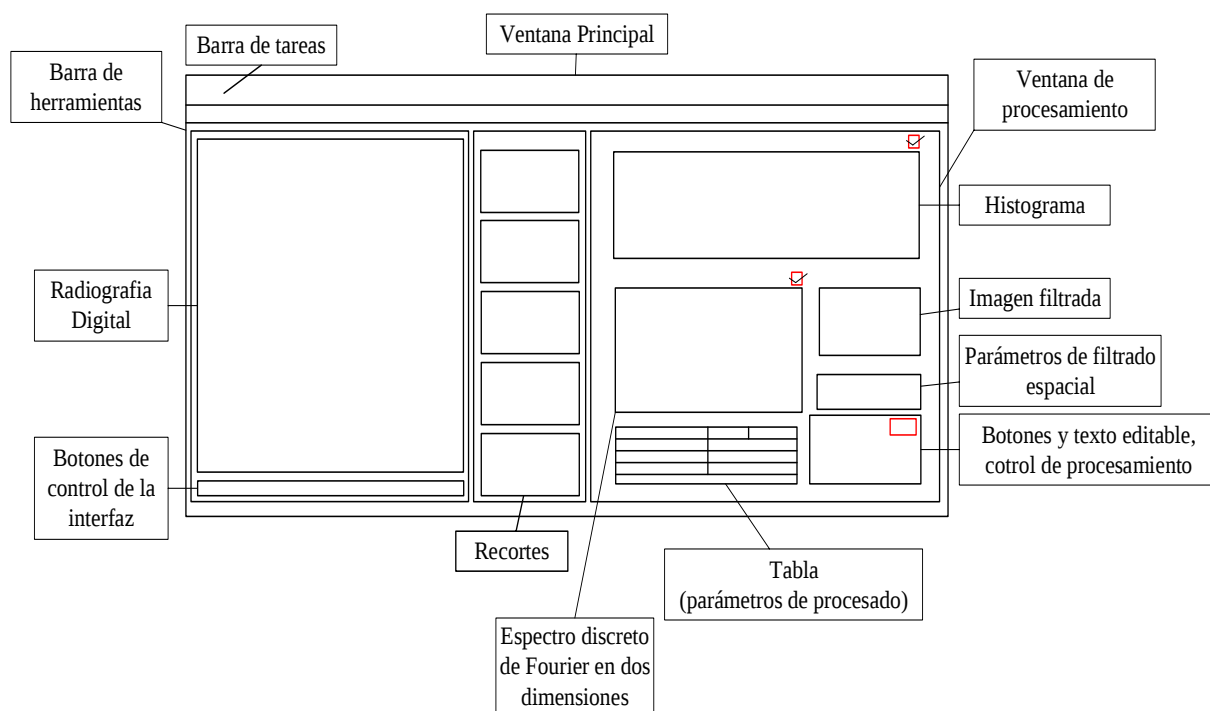


Figura 2.1. Diseño gráfico de la interfaz de usuario a implementar.

La ventana principal muestra las herramientas a utilizar en la interfaz para el procesamiento de las imágenes de radiografía digital. La barra de tareas muestra el nombre de la interfaz gráfica (XRA - 1.0), las opciones estándar de minimizar, ampliar y cerrar además de los menús desplegables graficar y editar.

La barra de herramientas estará dedicada a prestaciones básicas que harán agradable la experiencia al interactuar con el software; entre estas se encontraran herramientas de acercar y alejar (zoom +/-), mover, giro 3D, cursor de datos y ayuda. En la zona derecha de la planilla de diseño de la interfaz se ha dedicado un espacio al almacenamiento temporal de la imagen radiográfica en uso, sobre la cual se realizaran las operaciones de recorte.

En esta zona también se han colocado los botones de control de la interfaz; estos permitirán realizar cortes, leer imágenes nuevas y visualizarlas en la interfaz, realizar el proceso de calibración y cerrar la interfaz. En la parte central del diseño creado se colocaran los recortes pertenecientes a cada muestra de la radiografía original; teniendo en cuenta que por lo general se toman aproximadamente entre 5 y 10 muestras por filtro la interfaz gráfica implementada debe ser capaz de guardar y visualizar como máximo 10 imágenes de recortes provenientes de la imagen original. En la ventana principal se mostraran cinco recortes (1-5) y otra pestana mostrara los recortes restantes (6-10).

Cada recorte de la imagen original tiene asociado un panel de procesamiento en la parte derecha de la interfaz, el proceso de cambio entre los recortes (1-5) y (6-10) para el procesamiento también se realizara mediante el uso de pestañas. Del lado derecho de la interfaz se ubica la ventana de procesamiento. La ventana de procesamiento está compuesta mayormente por espacios para visualización de la información extraída de los recortes de la imagen original. En esta ventana se visualizaran el histograma del recorte que se esté analizando, el espectro discreto de Fourier en dos dimensiones, parámetros de calibración: tamaño del recorte de calibración en píxeles (filas y columnas), intensidad de gris de la cubeta vacía (calibración), coeficiente de absorción lineal (calculado en base al método XRA), intensidad de gris del recorte analizado y concentración espacial.

La información anterior se visualiza mayormente en una tabla. Además de dedicar espacio a mostrar histogramas y espectros de frecuencia, se dedicó un pequeño segmento a mostrar el recorte filtrado (en caso que sea necesario), así mismo se agregan funcionalidades para el control de los parámetros de filtrado como tamaño de filtro y frecuencia de corte además de especificar el espesor de muestra (recuadro rojo ubicado en la parte superior derecha del espacio designado al control de procesamiento en la figura 2.1) utilizado (necesario para el cálculo del coeficiente de atenuación lineal usando la técnica de rayos x).

Los "axes" utilizados para la visualización de los espectros discretos de Fourier y el histograma de la imagen están acompañados de cuadros de edición "edit" en cada panel dedicado a las ventanas de procesamiento; marcar cualquiera de estos cuadros de edición automáticamente despliega una ventana de edición extra (siempre que exista un histograma o un espectro en dicho "axe") que permite modificar el histograma o espectro analizado desde un punto de vista visual, para ser utilizado en presentaciones o informes (recuadros rojos ubicados en la parte superior derecha del espacio destinado a la representación del histograma y el espectro de Fourier en la figura 2.1).

Además de las funcionalidades descritas con anterioridad, se agregan opciones para graficar diferentes parámetros obtenidos de los recortes como: Concentración espacial y nivel de gris respecto a la profundidad; así como el comportamiento del coeficiente de absorción lineal respecto a la profundidad. También será posible visualizar el comportamiento de las variables anteriores (nivel de gris y coeficiente de absorción lineal) de recortes filtrados respecto a la profundidad. Las opciones de graficar (plots) y las opciones de edición (edit) están ubicadas en la barra de tareas de la interfaz.

En el menú editar, se ofrece al usuario las opciones de salvar las imágenes correspondientes a los recortes realizados, así como los recortes filtrados; también brinda la posibilidad de suspender la calibración (en caso de haberse realizado esta) para propósitos generales (no se recomienda), además de opciones de exportar los datos procesados a una hoja de texto de tipo Excel.

Los datos disponibles para exportar son: valores de concentración espacial, valores de nivel de intensidad de gris, valores de intensidad de gris después de filtrar y los

valores de coeficiente de absorción lineal, siendo posible exportar los datos anteriores de manera independiente o conjunta. Se crearon cuatro botones principales de control de la interfaz: los botones cargar imagen ("Load image"), recortar ("crop"), calibrar ("calibrate") y cerrar ("close").

El botón cargar imagen será el encargado de leer la imagen XRA a procesar. De la misma forma los recortes de las muestras a analizar se realizarán utilizando el botón de recortar; el botón de calibración será utilizado para leer los datos iniciales de la imagen original necesarios para el cálculo correcto de los parámetros utilizados por el método XRA para determinar el grado de agotamiento del filtro. Una vez realizada la calibración, los datos obtenidos de esta se visualizarán en la tabla de parámetros de procesado. El botón cerrar brinda la posibilidad de cerrar la interfaz de manera segura realizando un reseteo o limpiado de las variables utilizadas en el proceso (recomendado), esta operación no se garantiza utilizando el botón de cerrar ubicado en la barra de tareas de la interfaz. La figura 2.2 muestra la ventana principal de la interfaz gráfica desarrollada (XRA 1.0) usando MATLAB® 2015.

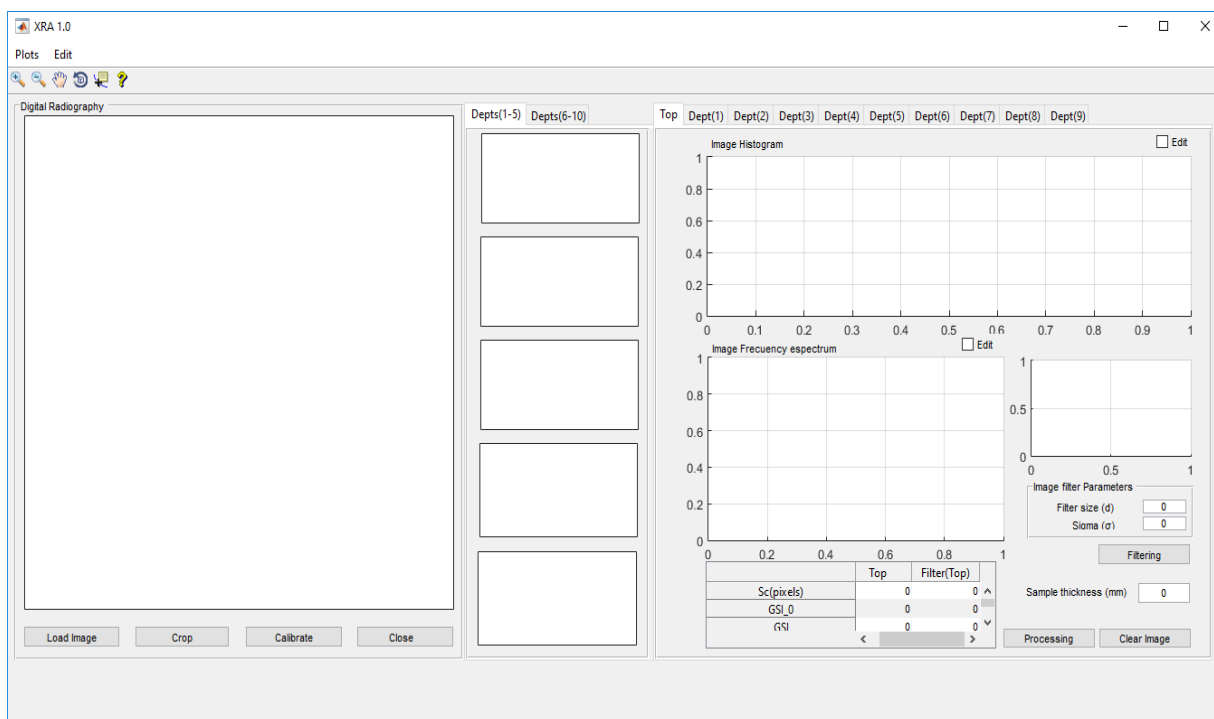


Figura 2.2. Ventana principal de la interfaz gráfica desarrollada.

Cada ventana de procesamiento (figura 2.2) contará con dos botones principales: procesar ("processing"), filtrar ("filtering") y limpiar recorte ("clear image"), ambos botones realizarán las operaciones de cálculo asociadas al recorte correspondiente a ese panel en cuestión; en otras palabras, el primer recorte realizado se visualizará en el primer "axe" (Top) de arriba hacia abajo en la pestaña de recortes identificada como profundidad "Depth" (1-5); los botones anteriormente descritos sólo están asociados a ese "axe" en la interfaz.

Lo anterior implica que pulsar cualquier otro botón en la interfaz no provocará ningún cambio en el cálculo de los parámetros asociados a ese recorte en particular. Este procedimiento se aplica para todos los botones de procesamiento utilizados en la interfaz. Se recomienda ubicar en el "axe" dedicado la primera profundidad (Depth 1) el recorte asociado al tope ("Top" en la ventana de procesamiento, ver figura 2.2) del filtro a analizar.

Esto se debe a que los ejes de los espectros discretos de Fourier mostrados se ajustan tomando como referencia la muestra más agotada del filtro (el tope); esto no es de carácter obligatorio, pero supone una comodidad para el usuario a la hora de visualizar; en caso de realizarse esta operación de manera diferente los ejes deberán cambiarse de manera manual utilizando las herramientas incluidas en la interfaz o el menú de edición que ofrece el "toolbox" de interfaces gráficas de MATLAB®.

Es importante destacar que el cuadro de texto dedicado a la introducción del espesor de la muestra (sample thickness (mm)) solo se visualiza en el primer panel de la interfaz gráfica, ya que este valor tiene que ser el mismo para todas las muestras analizadas, si este valor cambia entre muestras, el análisis del grado de agotamiento del filtro analizado usando XRA pierde su significado.

➤ **Diagrama de casos de uso del sistema.**

Los diagramas de casos de uso pretenden ser herramientas simples para describir el comportamiento del software o de los sistemas. Un caso de uso contiene una descripción textual de todas las maneras que los actores previstos podrían trabajar con el software o el sistema. En la figura 2.3 se muestra el diagrama de casos de uso de la propuesta de interfaz gráfica.

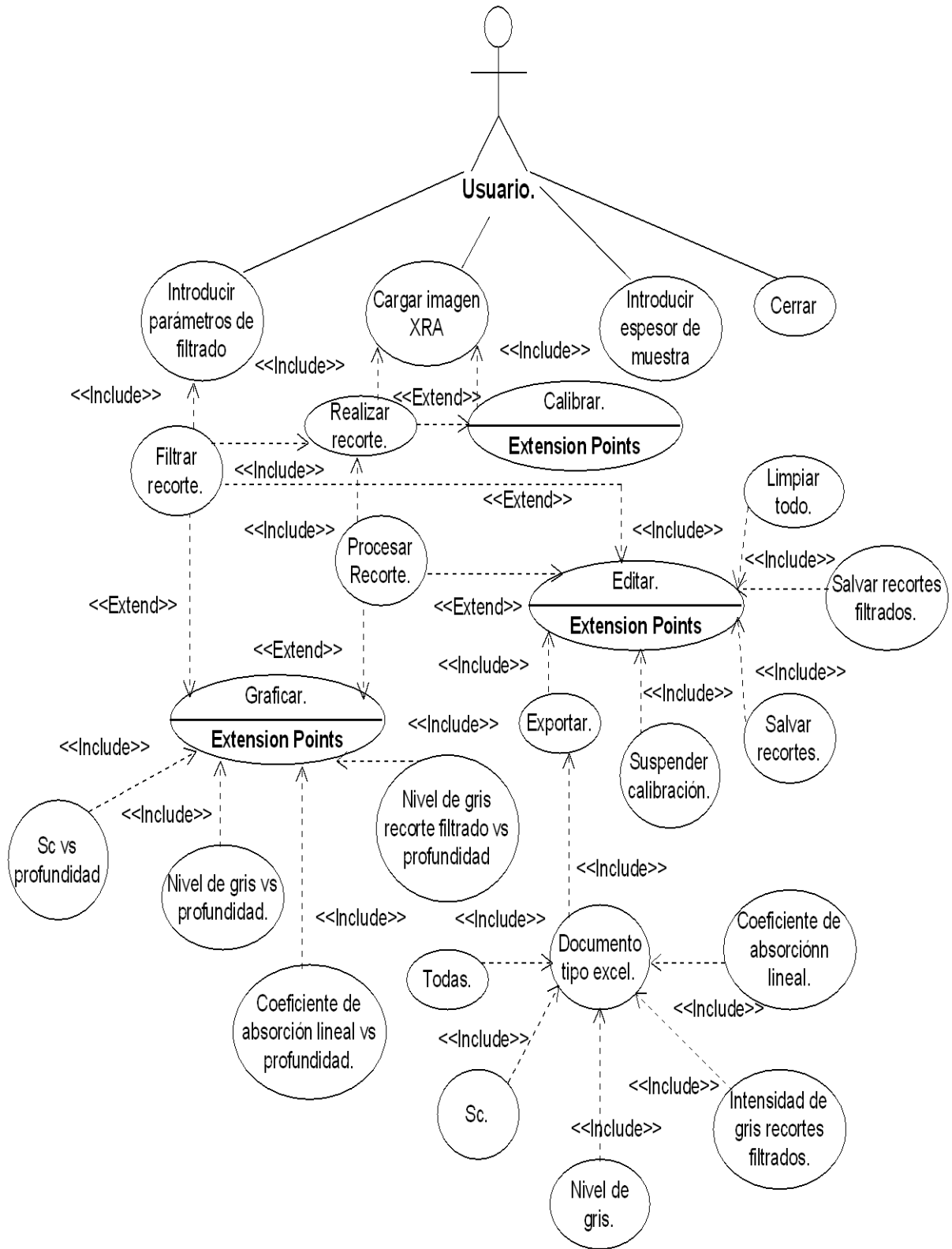


Figura 2.3. Diagrama de casos de uso del sistema.

Los casos de uso no describen ninguna funcionalidad interna (oculta al exterior) del sistema, ni explican cómo se implementará. Simplemente muestran los pasos que el actor sigue para realizar una tarea. La técnica de caso de uso tiene éxito en sistemas interactivos, ya que expresa la intención que tiene el actor (su usuario) al hacer uso del sistema. El diagrama de casos de uso mostrado en la figura 2.3 muestra la interacción del usuario con la interfaz a través de relaciones de tipo <<include>> o <<extend>>, la primera se utiliza para relacionar acciones cuando una acción es pre-requisito de otra y la segunda cuando una acción es una opción después de haber realizado una acción previa.

➤ **Creación de pestañas.**

Con el objetivo de hacer la experiencia más práctica y confortable para el usuario se utilizaron pestañas en las secciones del entorno dedicadas a la visualización de los recortes y las ventanas de procesamiento. La sección de visualización de recortes tiene dos pestañas encargadas de conmutar entre la visualización de los recortes (1-5) y la visualización de los recortes (6-10).

La sección de la interfaz dedicada a las ventanas de procesamiento tiene diez pestañas asociadas a diez paneles diferentes, encargadas de visualizar los datos de procesamiento de cada recorte de manera individual. El entorno de programación gráfico de MATLAB® 2015a no brinda la posibilidad de crear pestañas ("tabs") de manera automática, de manera que cada grupo de pestañas se realizó utilizando código a través de la funciones "uitab" y "uitabgroup". La función "uitabgroup" ofrece la posibilidad de crear contenedores de "tabs" o pestañas; permitiendo agrupar varias pestañas juntas, identificar la pestaña seleccionada y detectar cuando el usuario selecciona una pestaña diferente en una figura previa.

Se crearon dos grupos de pestañas principales, el primer grupo visualiza los recortes realizados a la imagen original separados en grupos del uno al cinco (1-5) y del seis al diez (6-10). La figura 2.4 muestra la lógica de diseño utilizada para la creación de las pestañas. La lógica de diseño mostrada en la figura 2.4 fue utilizada para la creación de todos los grupos de pestañas utilizados en la interfaz gráfica diseñada, la creación de las pestañas y los grupos de pestañas a utilizar se realizaron al inicio del código creado, inmediatamente después de la inicialización de las variables utilizadas.

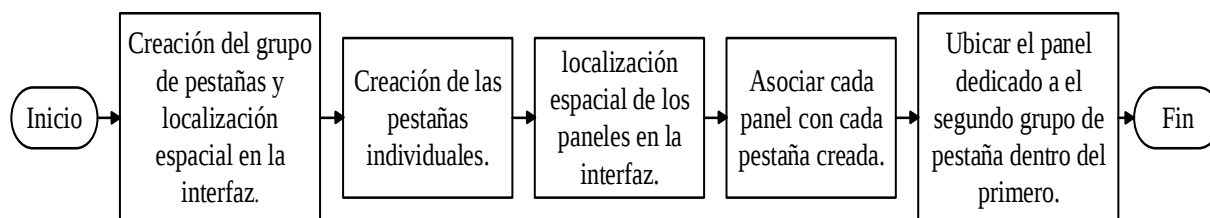


Figura 2.4. Diagrama de flujo que muestra el procedimiento utilizado para la creación de pestañas en la interfaz gráfica que se propone.

El segmento de código dedicado a la creación del primer grupo de pestañas (visualización de los recortes) se muestra en el anexo 1 del trabajo.

2.2.1. LECTURA DE LA IMAGEN ORIGINAL.

El proceso de lectura de la imagen original resultante de la aplicación del método XRA sobre las muestras del filtro a ser analizado se realizó utilizando la función "*uigetfile*". La función "*uigetfile*" brinda la posibilidad de leer o cargar una imagen en una carpeta aleatoria de la PC teniendo en cuenta el tipo de extensión de esta.

La invocación de la función "*uigetfile*" visualiza un cuadro de diálogo que muestra los archivos en la carpeta de última selección (esto debe realizarse por software, de otra forma el programa siempre carga la carpeta de archivos de diseño de la interfaz) permitiendo seleccionar o teclear el nombre del archivo deseado; si el nombre del archivo es válido (y existe), la función retorna el nombre del archivo como una cadena de caracteres al hacer clic en la opción abrir "open", en caso contrario (cancelar "cancel"), la función retorna "0".

La declaración de variables de tipo global permite utilizar estas variables en todas las funciones del código y no sólo dentro de las funciones en que hayan sido declaradas. La definición de variables de tipo persistente "persistent" es utilizada con el objetivo de almacenar la última dirección de carpeta accedida, a la hora de leer una imagen nueva. Este tipo de declaración (persistente) provoca que los valores de estas variables sean retenidas en memoria entre llamadas a la función; en este trabajo, el algoritmo mostrado en la figura 2.5 se invoca en cada pulsación del botón cargar imagen "load image"). La figura 2.5 ilustra el proceso de lectura de la imagen original.

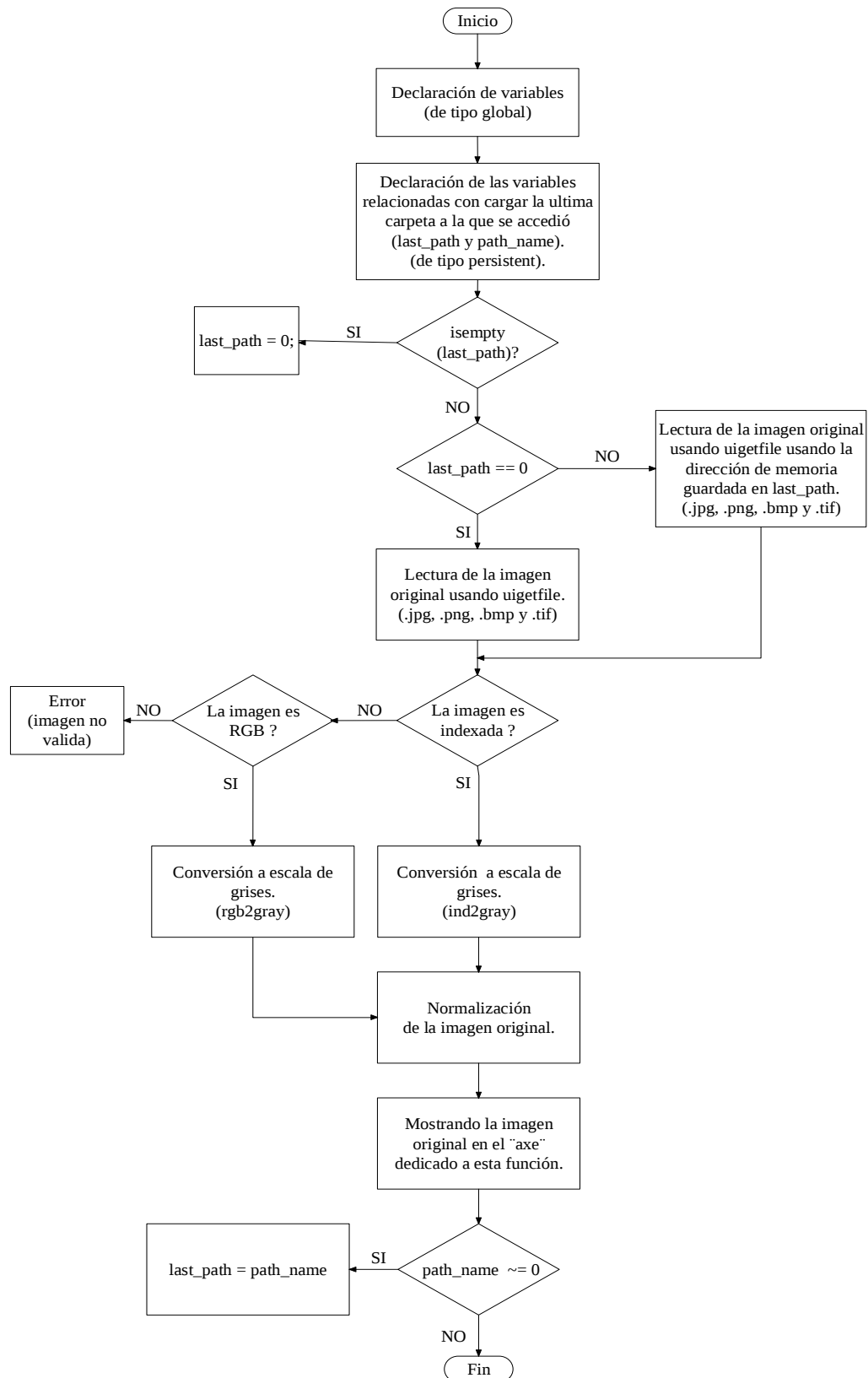


Figura 2.5. Algoritmo de lectura de la imagen original.

Las variables de tipo persistentes son similares a las variables globales ya que MATLAB® crea almacenamiento permanente para ambas; sin embargo las variables persistentes solo se reconocen dentro de las funciones en que fueron declaradas; lo cual previene que variables persistentes puedan ser modificadas por otras funciones en el código.

Una vez realizado el proceso de lectura y pre-procesamiento la imagen esta lista para ser analizada. La figura 2.6 muestra el proceso de lectura de la imagen original.

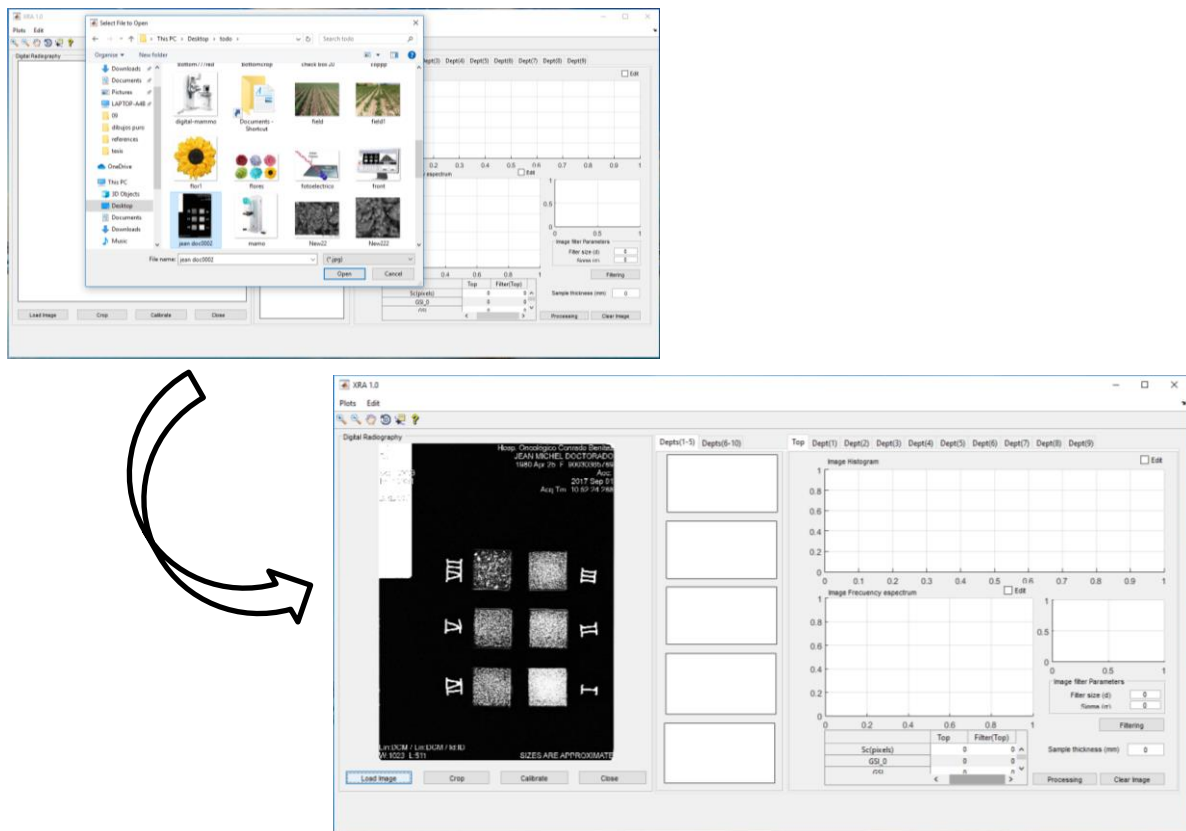


Figura 2.6. Proceso de lectura de la imagen original a procesar.

En el panel dedicado al proceso de leer la imagen original ("Digital radiography") se visualiza un "axe" dedicado a esta función además de los botones cargar imagen ("Load image"), recortar ("crop"), calibración ("calibrate") y cerrar ("close"). Cuando se acciona el botón cargar imagen un cuadro de diálogo se visualiza con el objetivo de localizar y cargar la imagen a procesar (ver figura 2.6).

➤ **Calibración.**

El proceso de calibración utilizado es fundamental para la correcta interpretación de la información obtenida de los recortes; para esto es imperativo que los recortes utilizados sean todos del mismo tamaño. De no cumplirse la condición anterior el concepto de concentración espacial (S_c) desarrollado para el método XRA pierde su significado y por tanto no es posible utilizarlo para emitir conclusiones acerca del grado de agotamiento a diferentes capas del filtro.

El proceso de calibración está diseñado de forma tal que sea posible recuperar los recortes que se habían realizado con anterioridad, en caso que se desee suspender el proceso de calibración durante la ejecución. En el algoritmo mostrado en la figura 2.7 es posible notar que los datos recopilados de la calibración se visualizaran en la tabla de parámetros de procesado; estos valores también son recuperados en caso de cancelar una calibración en curso, visualizando nuevamente los valores de calibración previos, de la misma forma cuando se realiza una nueva calibración estos valores son modificados almacenando y visualizando los parámetros de calibración más recientes; solo es posible recuperar y visualizar nuevamente los últimos datos de calibración almacenados.

Al momento de calibrar, todos los recortes realizados previamente (sin haber procedido con la calibración) serán eliminados ya que no cumplen con los requisitos necesarios para ser utilizados en el análisis. La calibración solo se realizará una vez que la imagen original sea cargada; en caso contrario se emitirá un mensaje de error. La información extraída del proceso de calibración (nivel de gris de referencia (GSI_0) y tamaño del recorte (largo y ancho del recorte en píxeles por filas y columnas)) se visualizará en la tabla de parámetros de procesado ubicada en la ventana de procesamiento de la interfaz.

En el menú de edición "Edit" en la barra de tareas de la interfaz se puede visualizar la opción suspender calibración ("Suspend Calibration"); esta opción permite al usuario suspender la calibración realizada en cualquier momento durante la ejecución del software. Esto permite realizar recortes de tamaño variable para uso general aumentando las posibilidades de trabajo así como las libertades del usuario; aun así, mensajes de advertencia serán visualizados regularmente con el objetivo de recordar

al usuario que está trabajando sin calibración y que los datos obtenidos no son completamente confiables. El proceso de calibración y el algoritmo mostrado en la figura 2.7 se invocará cada vez que el botón de calibrar ("calibrate") sea pulsado.

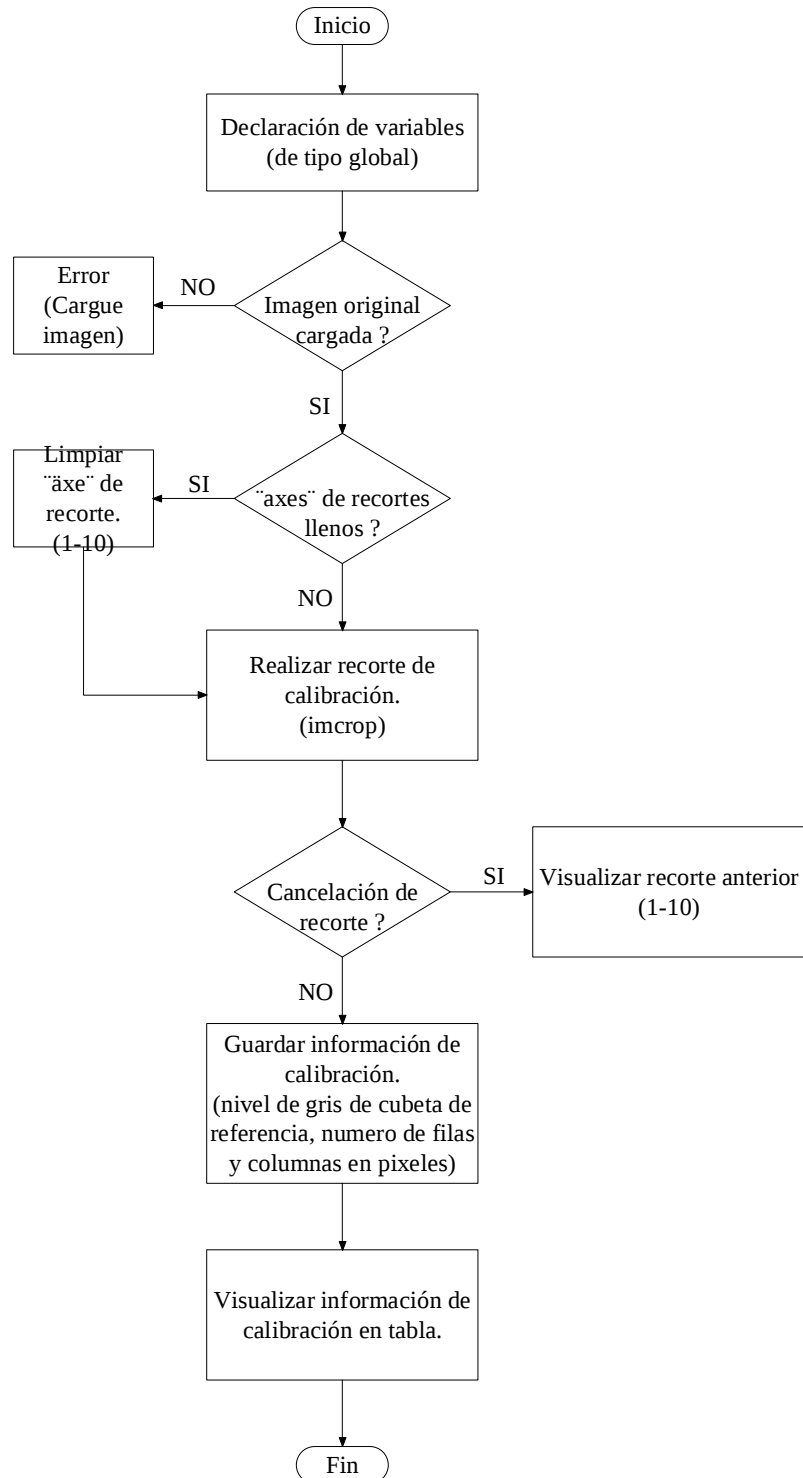


Figura 2.7. Algoritmo utilizado para realizar el proceso de calibración.

El proceso de calibración se basa en realizar un recorte de una cubeta vacía (sin el material a analizar) y registrar el valor de intensidad de gris y el tamaño (cantidad de píxeles de las filas y columnas del recorte) de la misma. La figura 2.8 ilustra el proceso de calibración usando la interfaz propuesta así como los mensajes de advertencia mostrados.

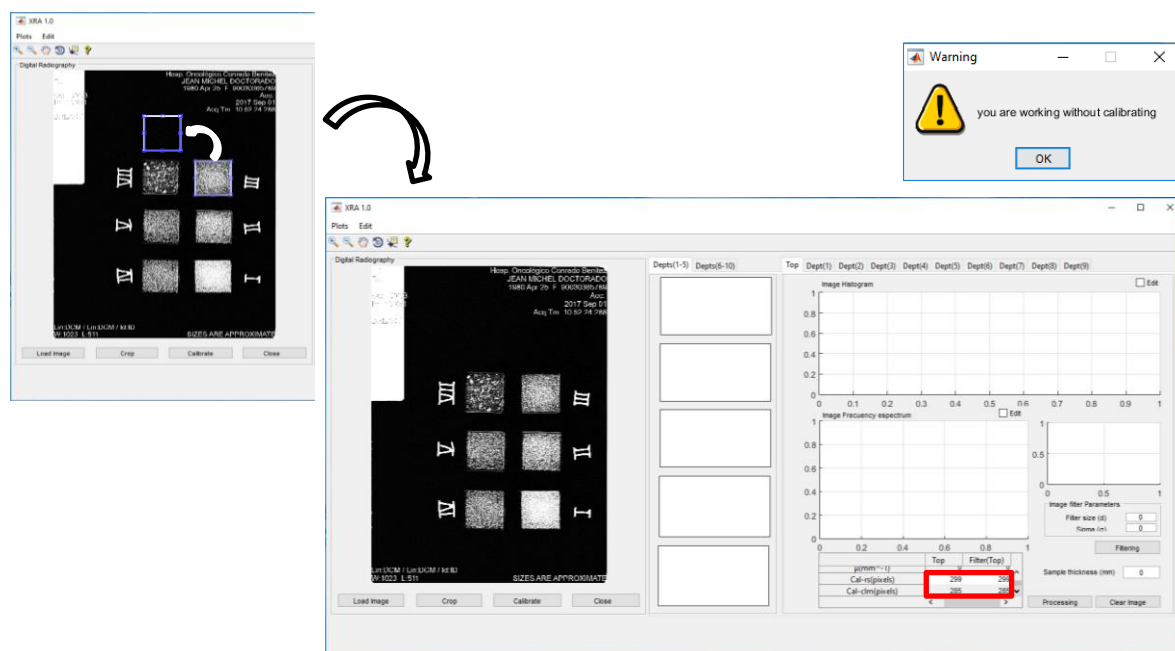


Figura 2.8. Proceso de calibración.

En la figura 2.8 no es posible ver a simple vista una cubeta vacía en la imagen; esto se debe a que las cubetas están hechas de materiales de bajo número atómico, transparentes a la radiación X (generalmente plásticos o acrílicos) provocando que en ocasiones la cubeta vacía no se pueda ver en la imagen de radiografía digital obtenida. En estos casos la calibración debe realizarse teniendo en cuenta el tamaño de las cubetas que si se pueden observar en la imagen (todas las cubetas incluyendo la de la calibración deben ser del mismo tamaño) y el nivel de gris del fondo de la imagen, como se muestra en la figura 2.8. En caso que el usuario desee proceder con el análisis de algún recorte sin realizar el proceso de calibración; éste podrá realizarlo, pero el software visualizará regularmente mensajes de advertencia indicando que se está trabajando sin calibrar (ver figura 2.8 parte superior derecha).

2.2.2. REALIZACIÓN DE RECORTES ("CROPS").

La herramienta para recortar permite realizar recortes individuales de cada cubeta en la imagen original (imagen de rayos X resultante de la aplicación del método XRA). El algoritmo mostrado en la figura 2.9 se invoca cada vez que el botón de recortar " crop" es pulsado.

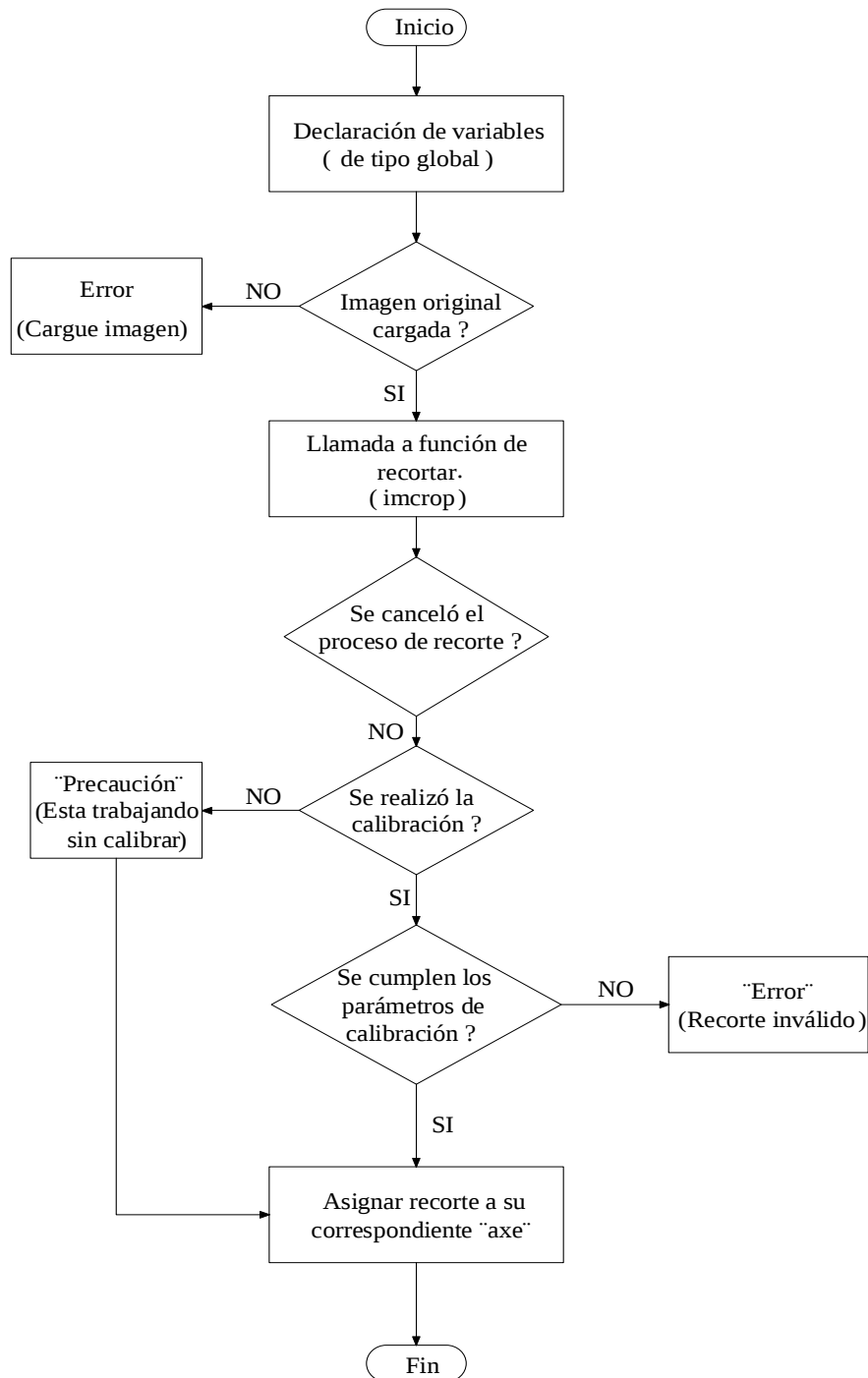


Figura 2.9. Algoritmo utilizado para realizar los recortes en la imagen original.

La función "imcrop" crea una herramienta interactiva de recorte para imágenes con la imagen a recortar visualizada en la figura actual. La herramienta de recorte muestra un rectángulo de tamaño ajustable que puede moverse a voluntad por la imagen usando el cursor. Cuando la herramienta de recorte esta activa el puntero del cursor cambia su forma original a un signo de cruz (+). Una vez realizada la calibración (en caso que el usuario lo considere conveniente) es posible proceder con los recortes de las diferentes profundidades analizadas. Cuando se realiza el recorte, automáticamente se visualiza en el panel de recortes como se muestra a continuación en la figura 2.10.

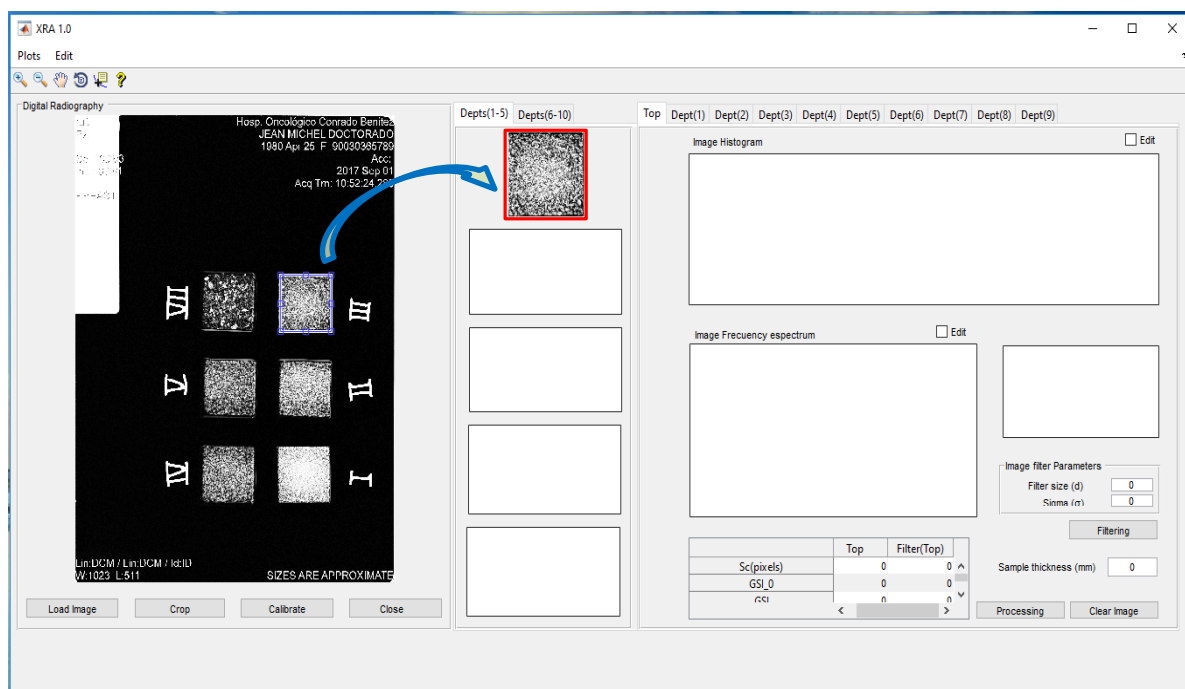


Figura 2.10. Visualización de los recortes.

La propuesta de interfaz gráfica desarrollada ofrece la posibilidad de almacenar diez recortes en el panel de recortes. Cuando el número de recortes a llenar se completa (diez recortes) la interfaz no agrega o sobrescribe ninguno de los recortes realizados con anterioridad, para seguir agregando recortes o analizar algún recorte nuevo es necesario limpiar o borrar los recortes realizados.

➤ **Procesamiento digital de los recortes.**

El proceso de cálculo del histograma y el espectro de frecuencia discreto de Fourier en dos dimensiones en los recortes realizados se realiza a través del botón de procesado "processing". Cada vez que se pulse este botón el programa invocará la función encargada de visualizar el histograma y el espectro de Fourier discreto del recorte en cuestión, además de visualizar en la tabla de procesado la información extraída del procesamiento: concentración espacial en píxeles (S_c), nivel de gris (GSI), coeficiente de absorción lineal (μ) calculado aplicando XRA; además de los parámetros de calibración. La figura 2.11 muestra el algoritmo utilizado para el procesamiento, obtención y visualización de los parámetros mencionados con anterioridad.

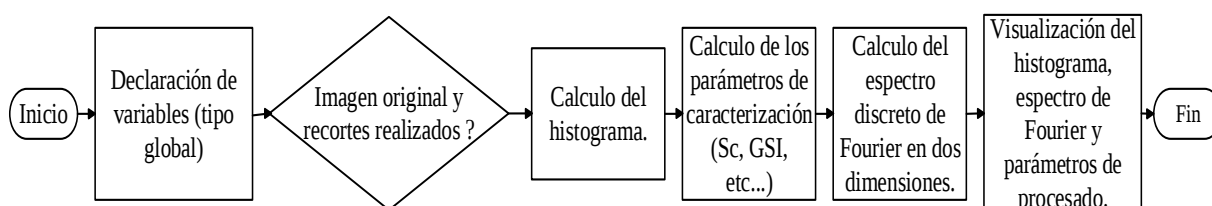


Figura 2.11. Algoritmo utilizado para realizar el procesamiento digital de los recortes.

En el algoritmo mostrado en la figura 2.11 es posible notar que el botón dedicado a realizar el procesamiento digital de los recortes sólo realiza dichos cálculos si existe la imagen original y si se ha realizado algún recorte. Cada botón de procesamiento de recortes sólo realiza el proceso anterior en el recorte asociado al panel correspondiente; el botón de procesado del segundo panel de procesamiento no tendrá ningún efecto sobre el recorte asignado a ser procesado en el primer panel de la interfaz; de esta forma se evita que pulsaciones indeseadas en botones de procesamiento de otros paneles puedan modificar los datos obtenidos de otros recortes.

Lo anterior es válido para la información visualizada en la tabla de parámetros de procesado también. Cada recorte realizado cuenta con un panel de procesamiento, identificado usando diferentes nombres para cada pestaña en función de la

profundidad a analizar. La figura 2.12 muestra el procesamiento básico de una muestra del tope (parte superior del filtro de CAG) del filtro.

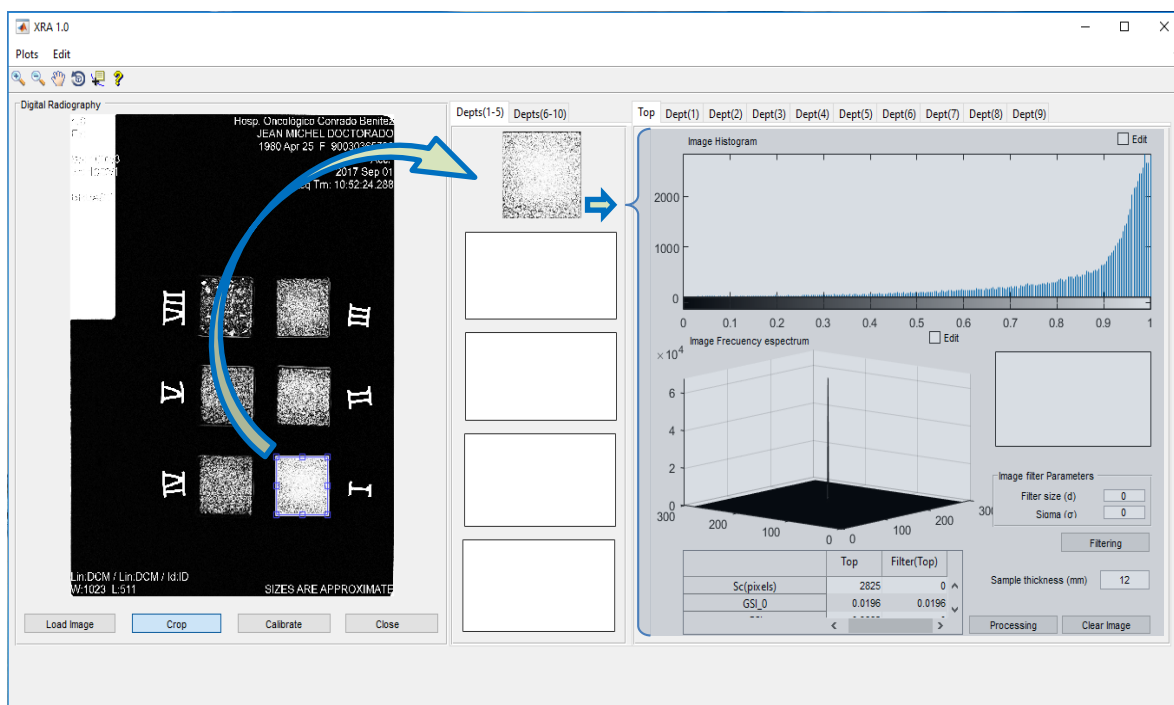


Figura 2.12. Procesamiento básico de la muestra del tope del filtro.

Cuando se presiona este botón automáticamente se visualiza el histograma y el espectro discreto de Fourier en dos dimensiones del recorte correspondiente a esa pestaña o profundidad; así mismo en la tabla de parámetros de procesado se visualizan los valores de intensidad de gris, concentración espacial y coeficiente de absorción lineal (se debe introducir el espesor de la muestra) del recorte bajo análisis, además de los parámetros de calibración en caso de haberse realizado.

➤ Filtrado espacial de los recortes.

El filtro utilizado es un filtro pasa bajo de tipo gaussiano. Cuando se realiza una operación de filtrado sobre un recorte automáticamente se generan el histograma y espectro de frecuencia de la imagen filtrada en gráficos independientes sin modificar los gráficos originales mostrados en la interfaz; los parámetros calculados en base a la imagen filtrada se visualizan en la parte derecha de la tabla de parámetros de

procesado. La figura 2.13 muestra el algoritmo utilizado para el proceso de filtrado de los recortes.

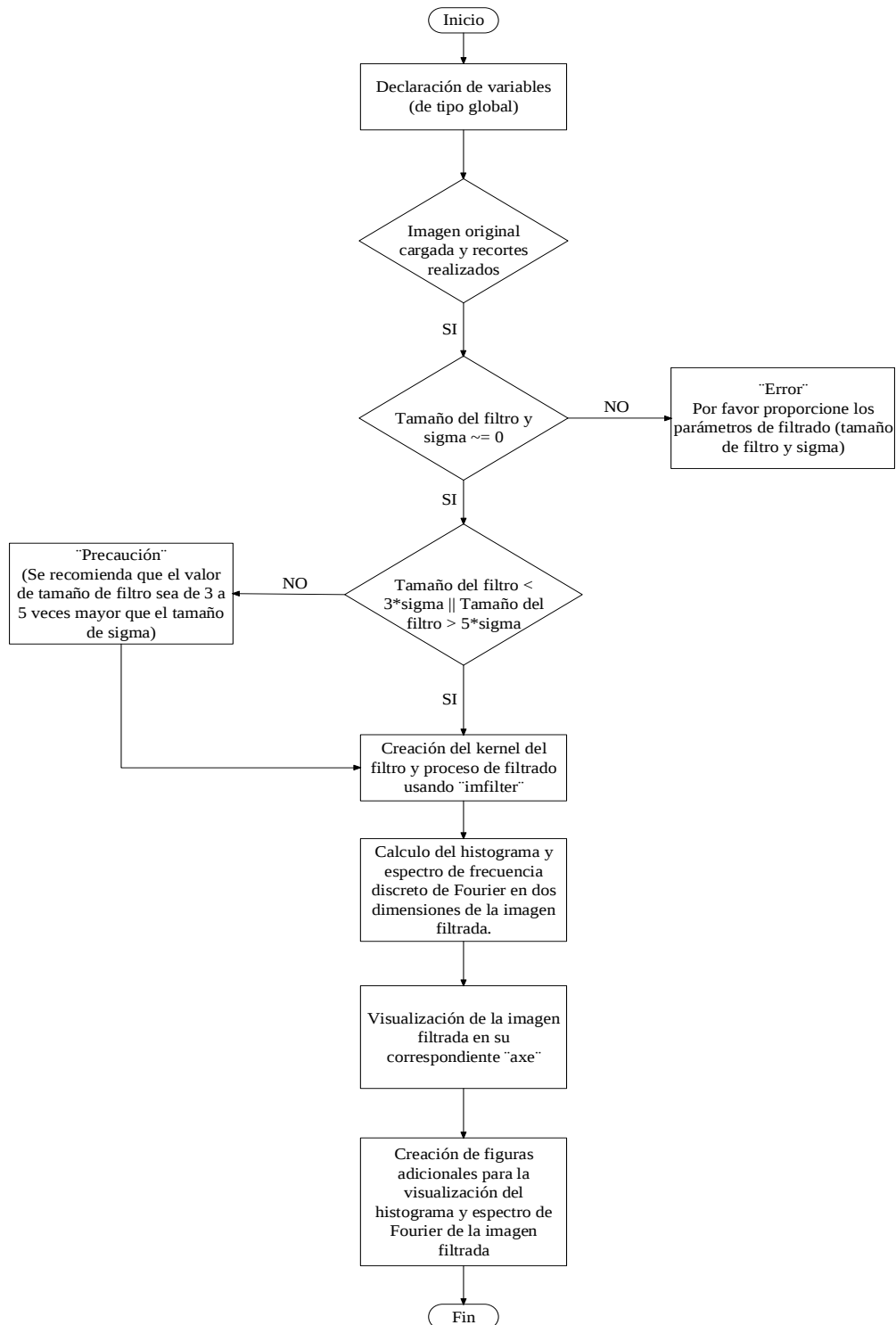


Figura 2.13. Algoritmo utilizado para realizar el proceso de filtrado de los recortes

La imagen filtrada también se visualiza en la ventana de procesamiento. La opción de filtrado espacial implementada en la interfaz gráfica también brinda la posibilidad de calcular y visualizar el histograma y el espectro de frecuencia discreto de Fourier de las imágenes o recortes filtrados. Cuando se especifican los valores de tamaño de filtro y sigma y estos cumplen los requisitos especificados en el algoritmo mostrado en la figura 2.13 automáticamente se realiza el filtrado y se generan dos figuras nuevas para visualizar el histograma y espectro de frecuencia de la imagen filtrada.

Cuando se presiona el botón de filtrado, automáticamente se visualiza el recorte filtrado en el "axe" correspondiente (ver figura 2.14) y simultáneamente se visualizan dos nuevas figuras con el histograma y espectro de frecuencia del recorte filtrado. La figura 2.14 ilustra el proceso de filtrado sobre un recorte utilizando la interfaz gráfica desarrollada.

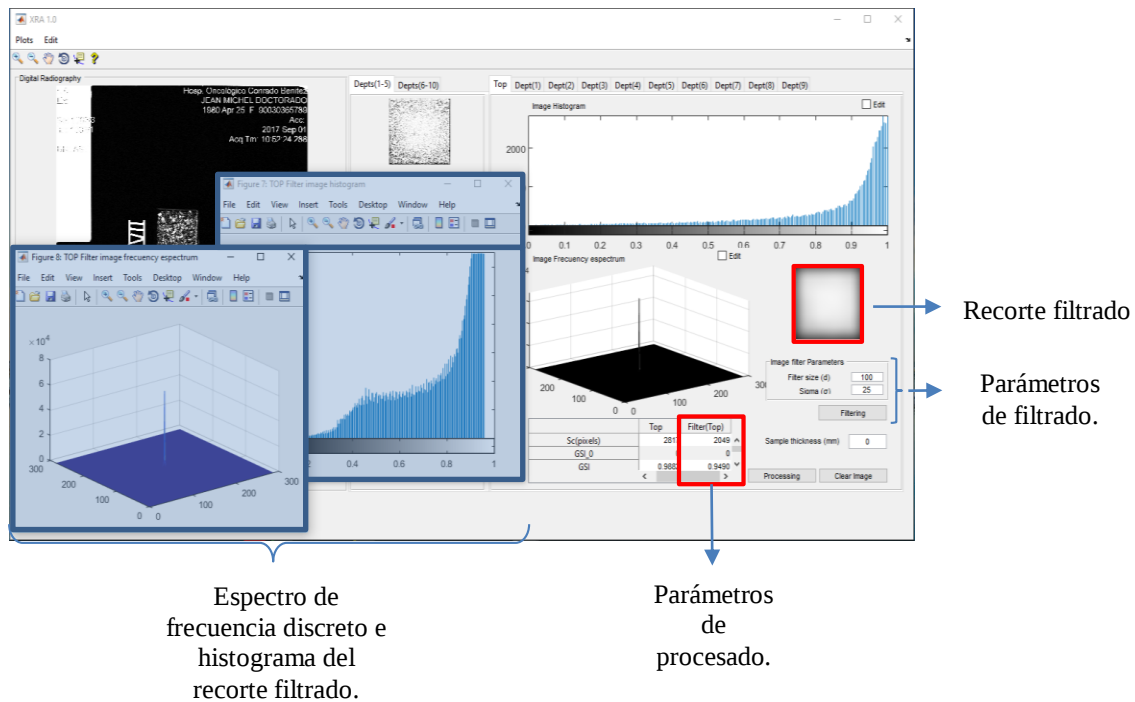


Figura 2.14. Opción de filtrado de la interfaz gráfica.

Los parámetros de procesado que se muestran en la tabla de procesado también se actualizan para mostrar los cambios en los parámetros calculados una vez filtrado el recorte (parte derecha de la tabla de parámetros de procesado). El histograma del

recorte filtrado así como el espectro discreto de Fourier en 2D brindan las mismas posibilidades de edición de gráficos descritas con anterioridad.

El botón de filtrado solo realizara las operaciones de filtrado mostradas en la figura 2.14 cuando se haya realizado un recorte previo y se hayan especificado los parámetros de filtrado; en caso contrario se visualizará un mensaje de precaución informando que los parámetros de filtrado deben introducirse.

2.2.3. MENÚ DE GRÁFICOS ("PLOTS") Y EDICIÓN ("EDIT").

La interfaz gráfica desarrollada brinda la posibilidad de graficar los diferentes parámetros que se obtienen del procesamiento digital de la imagen de radiografía digital resultante de la aplicación del método XRA. Al hacer clic en el menú gráficos "plots" en la barra de tareas de la interfaz se visualiza un menú desplegable con opciones para graficar los siguientes parámetros:

- Concentración espacial (S_c) respecto a la profundidad del filtro (S_c/depths).
- Nivel de Gris (GSI) respecto a la profundidad del filtro (GSI/depths).
- Nivel de Gris resultante del proceso de filtrado ($\text{GSI}(\text{filtered})$) respecto a la profundidad del filtro ($\text{GSI}(\text{filtered})/\text{depths}$).
- Coeficiente de absorción lineal (μ) respecto a la profundidad del filtro (μ/depths).

Al seleccionar una de las opciones anteriores se visualiza una figura nueva que contiene el grafico seleccionado. La nueva figura cuenta con las herramientas y opciones de edición propias de MATLAB® 2015a. Una vez realizado un estudio completo, es decir, una vez que se hallan realizados los recortes correspondientes a las profundidades del filtro que se deseen analizar y se hallan calculado los parámetros necesarios para emitir conclusiones sobre el grado de agotamiento de las muestras analizadas es posible graficar dichos datos.

La concentración espacial (S_c) es el parámetro que permite realizar comparaciones en el nivel de agotamiento entre diferentes profundidades en el filtro de CAG, es por tanto un parámetro fundamental en la caracterización del filtro en su totalidad y resulta de vital importancia en la determinación de la cantidad de CAG que debe ser removido del filtro, a que profundidad y que tan intenso debe ser el proceso de regeneración.

Por el contrario los valores de intensidad de gris (GSI) brindan información acerca de la naturaleza de los compuestos adsorbidos por la muestra, de manera que es fundamental para realizar comparaciones entre CAGs agotados y vírgenes.

Dos muestras de CAG con diferentes valores de intensidad de gris no pueden ser comparados utilizando el concepto de concentración espacial, ya que diferentes valores de GSI indican diferente combinación de compuestos químicos adsorbidos por la muestra [17]. La figura 2.15 muestra un perfil de agotamiento del filtro analizado usando la concentración espacial (Sc) según lo planteado por el método XRA [13, 17].

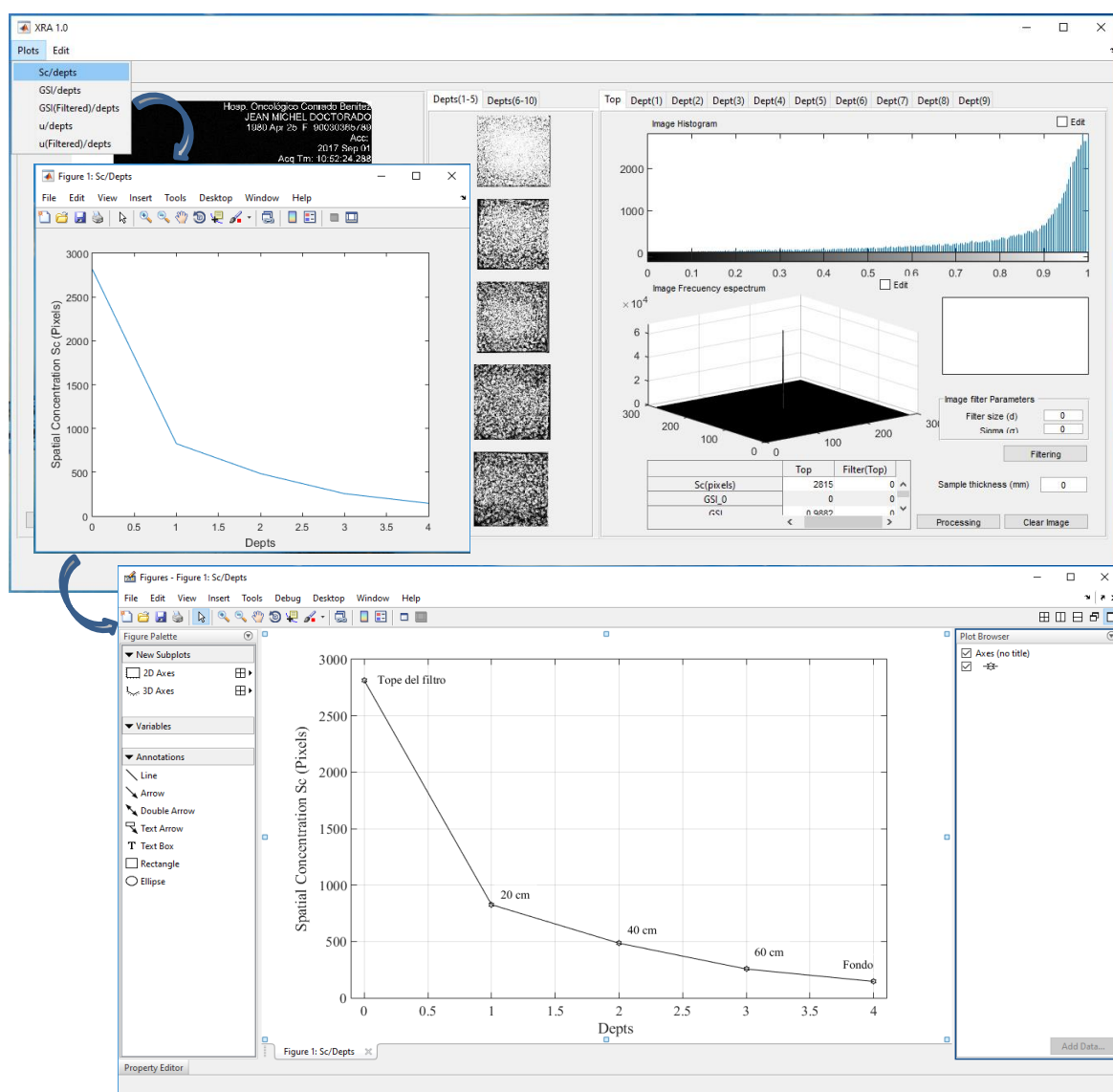


Figura 2.15. Gráfico de concentración espacial respecto a profundidad del filtro analizado.

El valor de GSI es entonces de vital importancia en la determinación del tipo de compuesto adsorbido por la muestra brindando información vital a la hora de seleccionar el proceso de regeneración a aplicar.

De la misma forma en caso de ser necesario aplicar el proceso de filtrado a los recortes realizados, las conclusiones o comparaciones entre muestras vírgenes y agotadas deben realizarse utilizando los valores de GSI resultado del proceso de filtrado. Los valores de coeficiente de absorción lineal se calculan teniendo en cuenta el valor de intensidad de gris final (GSI) e inicial (GSI_0) de la muestra analizada, de lo que se desprende que para obtener los valores de coeficiente de absorción lineal es obligatorio realizar la calibración (para obtener GSI_0).

Desde un punto de vista físico, el coeficiente de absorción lineal representa la fracción de fotones que interactúa por unidad de espesor del material atenuante. Teniendo en cuenta que no conocemos la cantidad exacta de fotones que llegan o atraviesan el material atenuador, no es posible definir un número exacto de partículas (fotones) interactuando por unidad de material. No obstante, si es posible tener una idea porcentual de esta interacción a través del uso de los valores GSI, teniendo en cuenta que el espesor de la muestra es constante para todos los experimentos (expresado en milímetros), y que existe una relación directa entre la intensidad fotónica y el valor de GSI [17].

Es posible decir entonces, que los valores de coeficiente de absorción lineal encontrados, representan un porcentaje de interacción de fotones del haz original por cada milímetro de espesor de material atenuador. Por ejemplo: si $\mu = 0.3263 \text{ mm}^{-1}$ entonces, aproximadamente el 33% de los fotones presentes en el haz inicial serán atenuados en cada milímetro de la muestra analizada. Todos los parámetros mostrados en el menú de gráficos pueden ser graficados y editados usando el mismo procedimiento que se muestra en la figura 2.15.

El menú de edición implementado en la interfaz brinda al usuario varias opciones que facilitan el trabajo con los datos obtenidos del procesamiento digital de las imágenes radiográficas como: opción de exportar a un documento Excel (.xlsx) ("Export"), salvar recortes ("Save clippings"), salvar recortes filtrados ("Save filter clippings"), opción de suspender la calibración ("Suspend Calibration") y limpiar todo ("Clear all").

➤ **Opción de exportar a un documento Excel (.xlsx) ("Export").**

Una vez seleccionado el parámetro que se desea exportar se visualiza una ventana de selección que permite seleccionar o crear la carpeta donde se desea guardar la información obtenida. En esta ventana se debe especificar el nombre del nuevo documento Excel en el que se almacenara la información que se desea exportar; una vez realizado este proceso el documento Excel estará disponible para la verificación y uso en la carpeta seleccionada o creada. La figura 2.16 muestra las opciones de exportar a documentos de tipo Excel que ofrece la propuesta de interfaz gráfica desarrollada así como el proceso de exportación en sí.

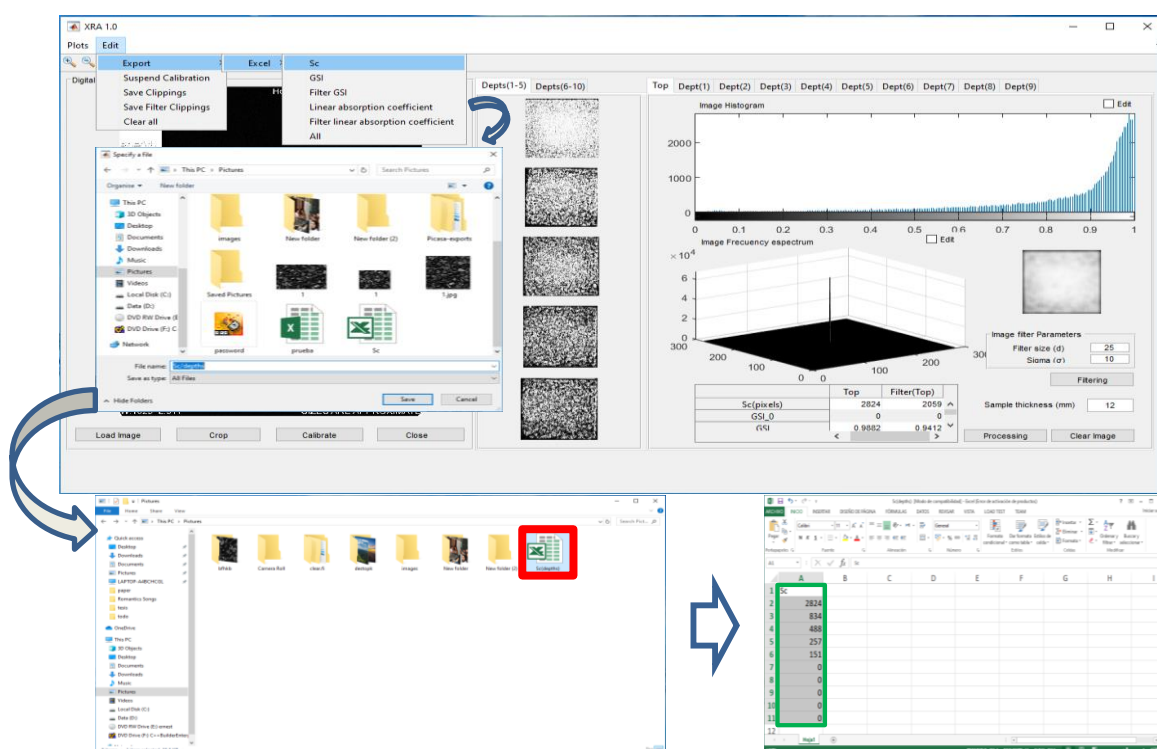


Figura 2.16. Gráfico de que ilustra las opciones de exportación a documentos de tipo Excel y el proceso de exportación de los valores de concentración espacial.

Usando las opciones de exportación a documentos Excel es posible utilizar los datos obtenidos del trabajo con la interfaz en otros documentos o programas que posibilitarían manejar los datos de manera diferente en función de las necesidades del usuario. Es posible exportar todos los datos calculados al mismo tiempo a un mismo documento Excel usando la opción "all".

- **Salvar recortes ("Save clippings") y salvar recortes filtrados ("Save filter clippings").**

Es posible salvar todos los recortes realizados (incluyendo los recortes filtrados) al mismo tiempo en una carpeta destino creada previamente por el usuario o que puede ser creada en el momento que se desee realizar la operación de salvado. La figura 2.17 muestra el proceso de salvado de los recortes originales y recortes filtrados utilizando la propuesta de interfaz gráfica de usuario desarrollada.

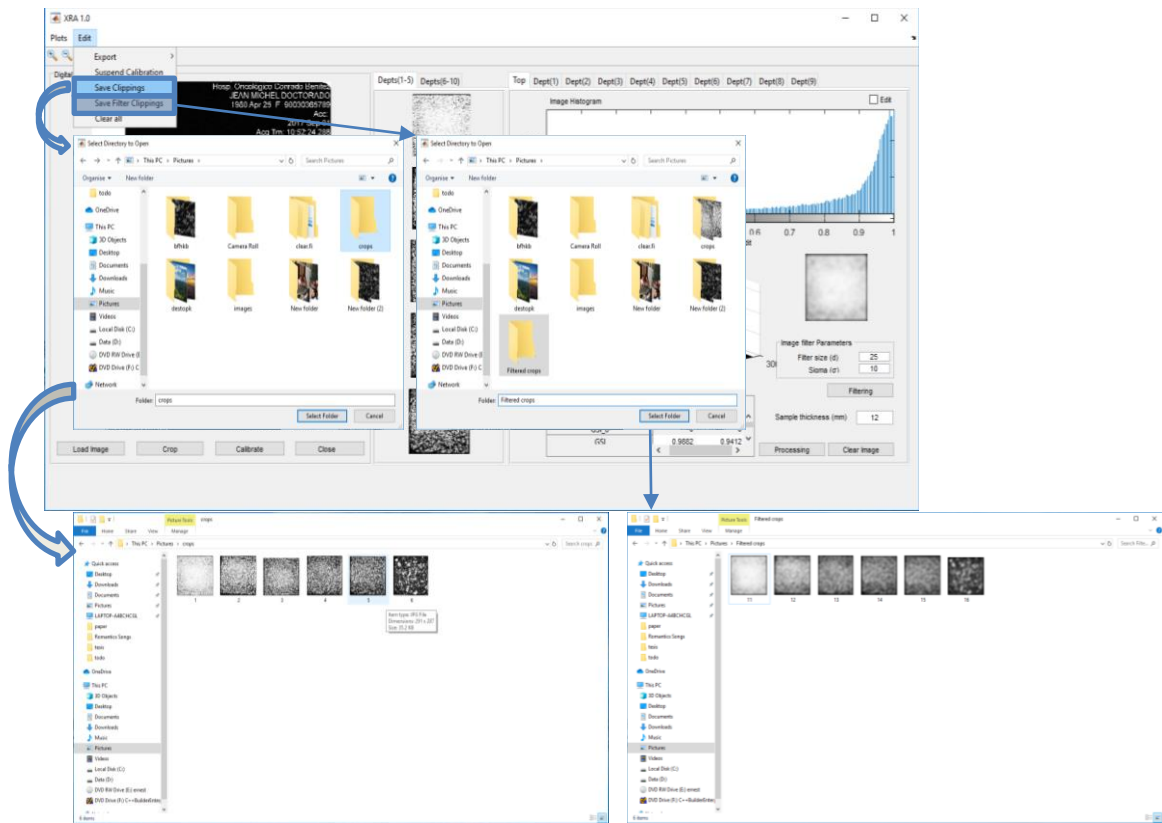


Figura 2.17. Gráfico que ilustra el proceso de salvado de recortes y recortes filtrados en la interfaz.

Los recortes salvados serán numerados del uno "1" en adelante en función del orden en que se hallan realizado, estos se almacenaran en formato .jpg.

Cuando se selecciona la opción de salvar recortes se visualiza una ventana que permite seleccionar o crear la carpeta en la que se almacenaran los recortes realizados. Una vez completada esta operación los recortes salvados podrán ser

utilizados o visualizados como imágenes independientes de tipo .jpg en la carpeta en que fueron salvados para ser utilizados en función de las necesidades del usuario.

➤ **Suspender calibración ("Suspend Calibration").**

Con el objetivo de facilitar la interacción entre el usuario y la interfaz gráfica desarrollada se implementa una opción orientada a suspender la calibración realizada en cualquier momento durante la ejecución del programa. Cuando se utiliza esta opción se visualiza un cuadro de diálogo de encuesta en el cual se pregunta si se desea suspender la calibración; en caso positivo, el software permitirá realizar recortes aleatorios sin tener en cuenta el tamaño de estos.

En caso de no haberse realizado el proceso de calibración el software visualizará un mensaje informativo diciendo que la calibración aún no se ha realizado. En caso de suspender la calibración durante la ejecución de un estudio donde se hayan realizado recortes previos, será posible realizar recortes nuevos sin tener en cuenta los valores de calibración realizados con anterioridad.

En contraste, en caso de realizar una nueva calibración todos los recortes realizados sin tener en cuenta la nueva calibración realizada serán eliminados automáticamente. En caso de que el usuario determine que una nueva calibración no es necesaria y decide cancelar la calibración en curso, los recortes eliminados serán visualizados nuevamente sin modificación.

➤ **Limpiar todo ("clear all").**

La opción de limpiar todo ("clear all") ofrece la posibilidad de eliminar todos los datos, imágenes, gráficos etc... que se han utilizado hasta el momento durante la ejecución del software. Después de realizar el proceso de limpieza es posible iniciar un estudio nuevo, incluyendo una nueva calibración.

2.2.4. BARRA DE HERRAMIENTAS.

La barra de herramientas que se propone en la interfaz brinda la posibilidad de utilizar las herramientas clásicas o de uso básico en el tratamiento de imágenes digitales, además de la ayuda del software. Estas herramientas vienen implementadas por defecto en el menú de creación de interfaces gráficas de usuario GUIDE de MATLAB,

de manera que no es necesario implementar o desarrollar código extra para utilizarlas. MATLAB ofrece la posibilidad de crear herramientas personalizadas utilizando GUIDE; en el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario que se propone en este trabajo esta funcionalidad sólo fue utilizada para la creación del icono de ayuda y su correspondiente invocación.

➤ **Ampliar y reducir ("Zoom in/ Zoom Out").**

Las herramientas de ampliar y reducir resultan muy útiles en el proceso de realización de los recortes, ya que posibilita acercar la imagen original a la zona que se desea recortar y realizar un corte más preciso del área de interés.

➤ **Vista de gráficos de manera interactiva usando la herramienta Pan.**

La herramienta "Pan" habilita un movimiento de la figura en edición basado en el movimiento del ratón ("mouse") de la PC en ambos ejes espaciales en dos dimensiones x, y. Esta funcionalidad resulta muy útil en el trabajo con la interfaz, no sólo a la hora de realizar algún recorte sino en el trabajo con los histogramas y espectros de frecuencia en conjunto con las opciones de movimiento 3D ("rotate 3D") y cursor de datos ("data cursor").

➤ **Rotación en tres dimensiones ("rotate 3D").**

La opción de rotación en tres dimensiones ("rotate 3D") habilita una rotación en los tres ejes de movimiento x, y, z, de todos los gráficos "axes" en la figura actual basada en el movimiento del ratón de la PC en uso. Esta funcionalidad es especialmente útil en el análisis de gráficos tridimensionales como el espectro discreto de Fourier en dos dimensiones. La opción de rotación 3D constituye una herramienta visual muy útil e interesante para el usuario; hasta el momento el método XRA sólo brinda atención especial a la componente de directa del espectro, aun así quedan abiertas las posibilidades de investigación en cuanto a utilizar otras componentes de frecuencia en el espectro para describir características específicas de la muestra analizada, que no han sido todavía explotadas utilizando este método. La figura 2.18 muestra las posibilidades de movimiento que brinda esta herramienta cuando se aplica sobre gráficos en tres dimensiones.

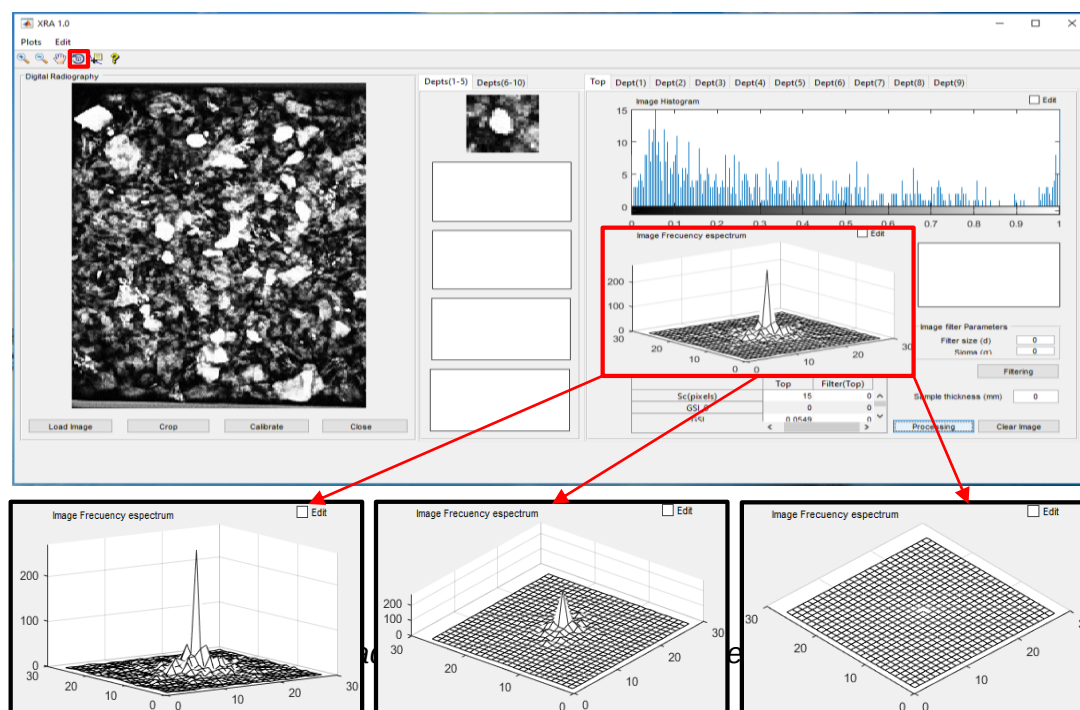


Figura 2.18. Posibilidades de rotación 3D de la interfaz gráfica de usuario.

➤ Cursor de datos ("data cursor").

El cursor de datos es un pequeño bloque o cuadro de texto con el cual el usuario puede de manera interactiva usando el ratón de la PC seleccionar puntos específicos en un gráfico. Cuando se da clic en un objeto gráfico como una línea, un diagrama o curva aparece un pequeño cuadro de texto o ventana al lado del gráfico analizado que visualiza los datos señalados por el cursor ya sea posición espacial (coordenadas) o valores numéricos de píxeles en imágenes; nivel de gris en imágenes en niveles de gris o valores RGB en imágenes a color etc...

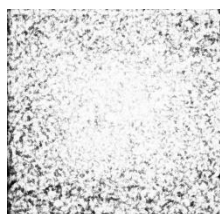
2.3. VALORACIÓN O CORROBORACIÓN DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS

Con el objetivo de corroborar o validar la eficiencia de la herramienta de software creada en la realización del volumen de cálculo asociado a la aplicación del método XRA para la detección de diferencias en el nivel de agotamiento de diferentes carbones activados granulares utilizados en la industria médica; se procesaron imágenes digitales procedentes no solo de esta industria, sino también de la industria ronera,

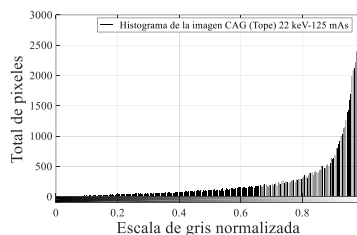
específicamente el CAG utilizado en los filtros que se utilizan en la fábrica de ron para "filtrar" el aguardiente procedente de los toneles de añejamiento.

Así mismo se evaluaron CAG utilizados en plantas de tratamiento de agua para hemodiálisis de la provincia de Ciego de Ávila (CA) y la provincia de Santiago de Cuba (SC). Investigaciones recientes demuestran que el nivel de agotamiento del CAG utilizado en los filtros de ron es diferente a medida que se profundiza en la cama de carbón [13-17], siendo la capa superior del filtro (tope) la capa más agotada. Las diferentes muestras de CAG recogidas de las diferentes Industrias fueron analizadas utilizando el método XRA [13, 17], y las imágenes digitales resultantes fueron procesadas utilizando la herramienta de software desarrollada.

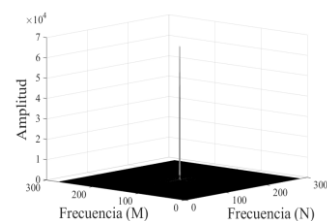
En la figura 2.19 es posible apreciar diferencias significativas entre las muestras del tope de los filtros analizados y las muestras de CAG virgen; el software fue capaz de detectar en todos los casos las diferencias en nivel de gris (indicador directo de las diferencias en nivel de agotamiento [13, 17]) entre las muestras ubicadas en el tope del filtro y las muestras sin utilizar (virgen).



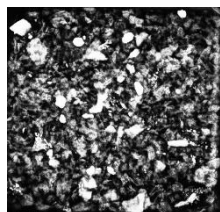
CaG agotado (CA)



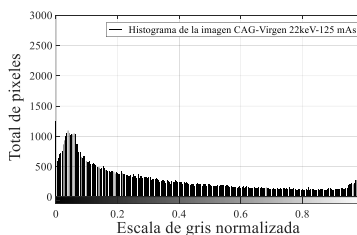
Histograma



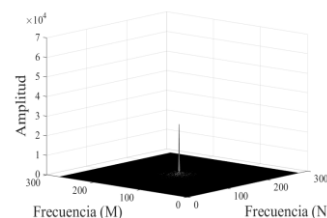
Espectro de frecuencia



CaG Virgen (CA)



Histograma



Espectro de frecuencia

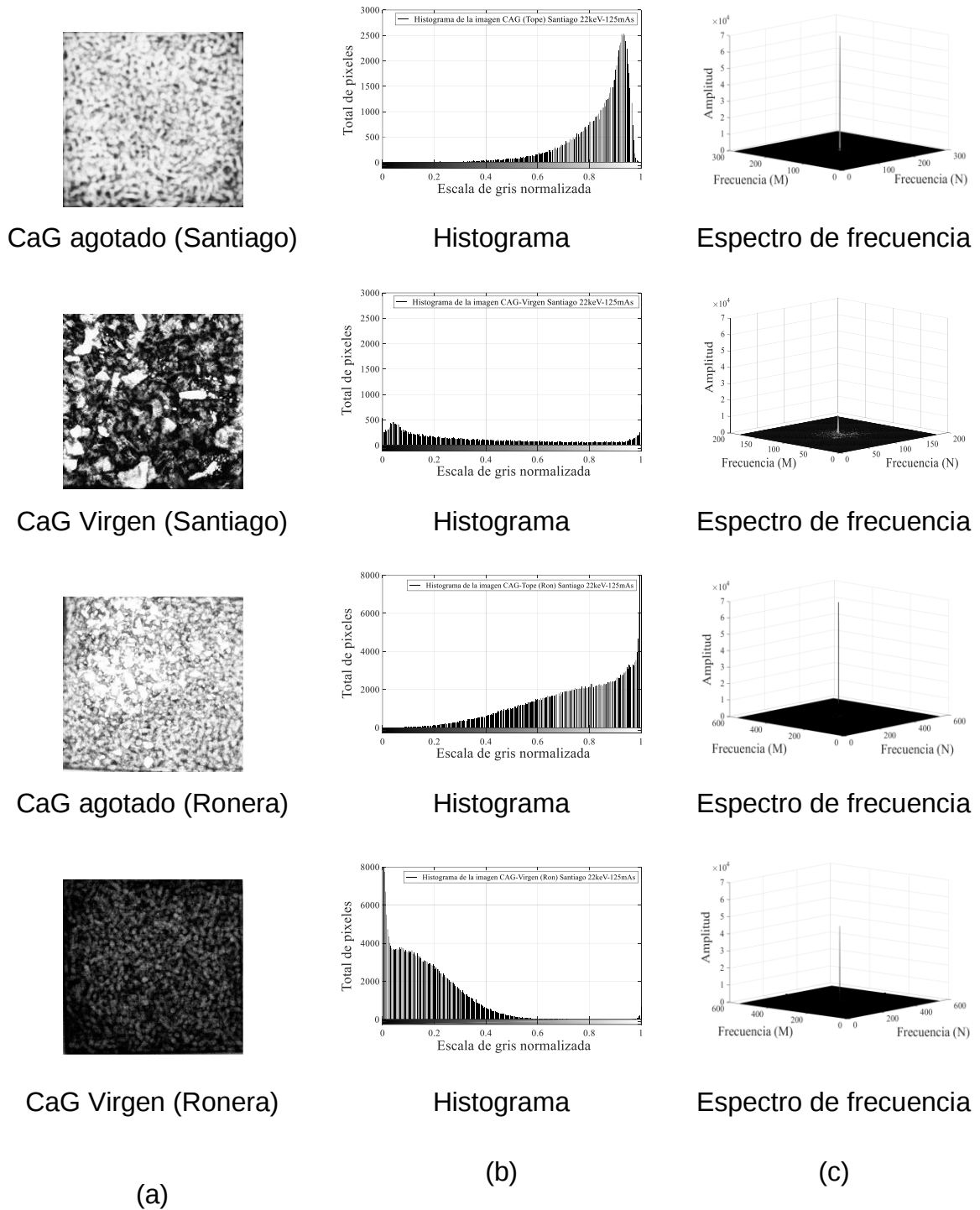


Figura 2.19. Imágenes de radiografía digital (a), histograma de la imagen (b) y espectros de frecuencia discretos de Fourier (c) de las diferentes muestras analizada.

Así mismo el software fue capaz de detectar diferencias significativas en la concentración espacial [13, 17] entre muestras del tope y muestras vírgenes de los

filtros analizados. En todos los casos el software fue capaz de detectar los cambios en nivel de gris correspondientes con carbones agotados y carbones menos agotados o sin usar con un acierto del 100 % para todas las muestras analizadas, cuando se utilizan los conceptos de concentración espacial a través del uso del histograma de la imagen además de la información obtenida de los espectros discretos de Fourier en comparación con el material virgen.

Las diferencias en concentración espacial (S_C) encontradas con la herramienta de software para muestras del tope y sin usar (virgen) de los filtros de CAG utilizados en el análisis; usando un nivel de gris de referencia de 0.98 en una escala de gris normalizada, se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Valores de concentración espacial de las diferentes muestras de CAG calculados usando la propuesta de herramienta de software implementada.

Capa de CAG	Tope (CA)	Virgen (CA)	Tope (SC)	Virgen (SC)	Tope (Ron)	Virgen (Ron)
$\bar{S}_C (0.98)$	12000	1000	2533	11	4675	77
$\sigma(S_C)$	100	20	50	1	40	5

$\bar{S}_C$: Promedio de los valores de concentración especial para cinco experimentos independientes y $\sigma(S_C)$: desviación estándar.

En la tabla 2.1 es posible apreciar que la herramienta de software desarrollada es capaz de detectar diferencias significativas en los valores de concentración espacial entre carbones activados utilizados en los sistemas en cuestión y carbones activados vírgenes. En todos los casos analizados es posible emitir conclusiones acerca del grado de agotamiento de las muestras analizadas de manera cualitativa.

Las diferencias en nivel de agotamiento que se describen a partir del uso de los conceptos de concentración espacial y nivel de gris y que se cuantifican en la práctica mediante la utilización de la herramienta de software propuesta han sido corroboradas utilizando técnicas analíticas de primer nivel. Análisis especializados como análisis termogravimétrico (TGA), análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), análisis de resonancia magnética nuclear (NMR), análisis elemental (EA), análisis de

cromatografía gaseosa acoplada a espectrometría de masas (GC/MS) así como análisis de espectrometría infrarroja de Fourier (FTIR) y análisis de difracción de rayos X (XRD) [13, 17] dan fe de los resultados obtenidos utilizando la herramienta de software propuesta en conjunto con el método XRA.

Previo al uso de la interfaz gráfica que se propone en este trabajo todas las operaciones de cálculo y procesamiento digital de las imágenes relacionadas con el método XRA se realizaban de forma manual utilizando la ventana de comandos del software MATLAB®.

Poco después se desarrolló un guion o "script" donde se almacenó la mayoría del volumen de código que se utilizaba con mayor frecuencia a la hora de realizar el procesamiento, la utilización de este "script" mejoró considerablemente la eficiencia del proceso en términos de rapidez a la hora de realizar un estudio completo; aun así la mayoría de las operaciones básicas como leer imágenes, realizar la calibración, realizar recortes y guardarlos, procesar nuevamente estos recortes, filtrarlos etc... se tornaban bastantes ineficientes y el tiempo utilizado para realizar un estudio completo era desproporcionadamente grande.

La implementación de la interfaz gráfica que se propone en este trabajo viene a resolver los problemas planteados con anterioridad; mejorando de manera sustancial el tiempo necesario para realizar un estudio completo de un máximo de ocho muestras o más en dependencia del filtro analizado. La tabla 2.2 ilustra las diferencias en tiempo de duración de un estudio completo utilizando las tres variantes antes mencionadas.

Tabla 2.2: Diferencias temporales en la realización de un estudio completo utilizando la ventana de comandos, un "script" y la interfaz gráfica desarrollada.

Método utilizado	Ventana de comandos	"script"	Interfaz gráfica
Promedio de duración de estudio completo (minutos)	75	45	6
Desviación estándar	12	6	1

Una de las etapas fundamentales y que más tiempo consume en el análisis de las muestras seleccionadas es el proceso de calibración; realizar la calibración fuera de la interfaz gráfica resulta altamente contraproducente ya que es necesario realizar múltiples recortes en función de la información extraída de un recorte patrón y almacenar todos estos datos para ser utilizados en el desarrollo de nuevos recortes. Como es posible apreciar en la tabla 2.2 la mejora en tiempo de duración para completar un estudio en el que sea posible mostrar un perfil de agotamiento de las muestras o filtro analizado mediante el uso de la interfaz gráfica propuesta es significativa.

Utilizando la ventana de comandos se cuantificó un tiempo máximo promedio después de cinco estudios, de aproximadamente 75 minutos, por lo general en dependencia de la experiencia del usuario el tiempo de duración de un estudio completo usando la ventana de comandos puede variar entre 30 y 75 minutos. Una vez desarrollado un script lo bastante fuerte para realizar el procesamiento, se observaron mejoras en los tiempos de duración del estudio, mostrando tiempos máximos promedio después de cinco estudios de entre 30 y 45 minutos, esto representa una mejora de un 40 a un 60 % en el tiempo de duración del estudio respecto al tiempo máximo reportado usando la ventana de comandos.

La introducción de la interfaz gráfica que se propone en este trabajo logra disminuir los tiempos de duración de un estudio completo a un máximo de 6 minutos, pudiéndose alcanzar tiempos de entre 3 y 4 minutos en dependencia de la complejidad del estudio a realizar y de la habilidad del usuario, las mejoras en el tiempo de duración promedio del estudio completo después de cinco estudios utilizando la propuesta de interfaz gráfica varían entre un 92 a un 96% respecto al tiempo máximo reportado utilizando la ventana de comandos y aproximadamente de un 36 a un 56% respecto a la utilización del script.

La norma ISO/IEC 9126 se implementa con el objetivo de evaluar de manera extensiva y especifica la calidad de los productos de software aplicando diferentes criterios asociados con la adquisición, requerimientos, desarrollo, uso, evaluación, soporte, mantenimiento, aseguramiento de la calidad y auditoria de software [50, 51]. En esta se especifican características relevantes de calidad y está dividida en cuatro partes:

1. ISO/IEC 9126-1: Modelo de Calidad.
2. ISO/IEC 9126-2: Métricas Externas.
3. ISO/IEC 9126-3: Métricas Internas.
4. ISO/IEC 9126-4: Métricas de Calidad de Uso.

El modelo de calidad establecido en la primera parte del estándar ISO/IEC 9126-1, clasifica la calidad del software en conjunto estructurado de características de calidad interna y externa como se muestra a continuación en la tabla 2.3 [50, 51].

Tabla 2.3. Modelo de calidad ISO/IEC 9126-1

Nombre	Características	Sub- Características
Funcionalidad	Capacidad del producto de software para proveer las funciones que satisfacen las necesidades explícitas e implícitas cuando el software se utiliza bajo condiciones específicas.	➤ Adecuación. ➤ Exactitud. ➤ <i>Interoperabilidad</i> ➤ <i>Seguridad</i>. ➤ Cumplimiento funcional.
Fiabilidad	Capacidad para mantener un nivel específico de funcionamiento cuando se está utilizando bajo condiciones específicas.	➤ <i>Madurez</i>. ➤ Tolerancia a fallos. ➤ Capacidad de recuperación. ➤ Cumplimiento de fiabilidad.
Usabilidad	Capacidad de ser entendido, aprendido, usado y atractivo al usuario.	➤ Entendimiento. ➤ Aprendizaje. ➤ Operatividad. ➤ Atracción. ➤ Cumplimiento de usabilidad.
Eficiencia		

	Capacidad para proveer un desempeño adecuado de acuerdo a la cantidad de recursos utilizados.	➤ <i>Comportamiento temporal.</i> ➤ <i>Utilización de recursos.</i> ➤ <i>Cumplimiento de eficiencia.</i>
Mantenibilidad	Capacidad del producto de software para ser modificado.	➤ <i>Capacidad para ser analizado.</i> ➤ <i>Cambiabilidad.</i> ➤ <i>Estabilidad.</i> ➤ <i>Capacidad de prueba.</i> ➤ <i>Cumplimiento de facilidad de mantenimiento.</i>
Portabilidad	Capacidad del software para ser trasladado de un entorno a otro.	➤ <i>Adaptabilidad.</i> ➤ <i>Facilidad de instalación.</i> ➤ <i>Coexistencia.</i> ➤ <i>Remplazabilidad.</i> ➤ <i>Cumplimiento de portabilidad.</i>

La ISO/IEC 9126-2 y 9126-3 proporcionan las métricas externas para medir los atributos de las seis características de calidad midiendo el comportamiento de los sistemas basados en computadora que incluyen software [50, 51] y el software por sí mismo respectivamente [50, 51].

Las métricas establecidas en la cuarta parte (ISO 9126-4), miden los efectos de utilizar el software en un contexto de uso específico. Proporciona las métricas de calidad en uso para medir los atributos definidos en ISO/IEC 9126-1 como se muestra en la tabla 2.4 [50, 51].

Tabla 2.4. Métricas de Calidad de Uso ISO/IEC 9126-4

Nombre	Características
---------------	------------------------

Eficacia	Capacidad para permitir a los usuarios alcanzar los objetivos especificados con exactitud y completitud.
Productividad	Capacidad para permitir a los usuarios gastar una cantidad adecuada de recursos con respecto a la efectividad alcanzada.
Seguridad	Capacidad para alcanzar niveles aceptables de riesgo de hacer daño a las personas, al negocio o al medio ambiente.
Satisfacción	Capacidad para satisfacer a los usuarios en un contexto de uso específico.

Al aplicar la norma ISO/IEC 9126-1 a la propuesta de herramienta de software desarrollada se obtienen los resultados que se muestran a continuación en la tabla 2.5. De acuerdo a lo mostrado en la tabla 2.5 es posible apreciar que la herramienta de software propuesta cumple con 21 sub-características de 27 posibles de las cuales 6 no son necesarias para el correcto funcionamiento de la interfaz; esto constituye un cumplimiento de aproximadamente un 80% en lo que respecta al cumplimiento del modelo de calidad ISO 9126-1.

Tabla 2.5. Cumplimiento del modelo de calidad ISO 9126-1 para la herramienta de software propuesta.

Características	Cumple	Sub-Características		
		No Cumple	No requerida	Total
<i>Funcionalidad</i>	3	0	2	5
<i>Fiabilidad</i>	3	1	0	4
<i>Usabilidad</i>	5	0	0	5
<i>Eficiencia</i>	2	0	1	3
<i>Mantenibilidad</i>	3	0	2	5
<i>Portabilidad</i>	5	0	0	5
Total sub-Características	21	1	5	27

Con el objetivo de complementar el análisis de la herramienta de software propuesta y tener un segundo criterio de evaluación del comportamiento de esta se analizan las métricas de calidad de uso ISO/IEC 9126-4. A cada métrica seleccionada se le debe asignar un puntaje máximo de referencia; el personal que participa en la evaluación debe establecer niveles de calificación cualitativa con base a puntajes, por ejemplo [50, 51]:

- De 0 a 1 inaceptable.
- De 2 a 3 mínimo aceptable.
- Más de 3 aceptable o satisfactorio.

El método tradicional de basa en definir por cada métrica, un puntaje mínimo de aprobación, y al final de la evaluación, dependiendo de si el puntaje es mayor o menor a lo propuesto, considerar si el software cumple o no con los objetivos propuestos [50, 51]. En la tabla 2.6 se muestran los resultados de esta evaluación.

Tabla 2.6. Cumplimiento de las Métricas de Calidad de Uso ISO/IEC 9126-4 para la herramienta de software propuesta.

Características	Valoración		
	Puntaje mínimo requerido	Puntaje máximo.	Asignado
<i>Eficacia</i>	2	3	3
<i>Productividad</i>	2	3	3
<i>Seguridad</i>	2	3	3
<i>Satisfacción</i>	2	3	2

Para el análisis del cumplimiento de las Métricas de calidad de Uso se propuso una puntuación mínima requerida de 2 puntos, como mínimo aceptable y una puntuación máxima de 3 puntos como puntuación máxima o satisfactoria. Analizando los resultados expuestos en la tabla 2.6 de acuerdo a las puntuaciones definidas anteriormente así como las opiniones de varios usuarios familiarizados en el uso del software (el software ha sido utilizado o evaluado hasta la fecha por alrededor de 10 personas contando al creador del mismo) es posible apreciar que el software satisface las Métricas de Calidad de Uso.

De acuerdo a lo descrito con anterioridad las ventajas en el uso de la propuesta de software son claras; la obtención de perfiles de agotamiento de los filtros de CAG para la producción de agua para diálisis utilizados en la industria médica de manera automática, rápida y fiable a través del uso de la técnica XRA soportada en la interfaz gráfica que se propone en este trabajo resulta de una importancia relevante en el aprovechamiento correcto de este recurso; difícil de adquirir a nivel internacional, y que desafortunadamente no se produce actualmente en el país. Resulta claro que las ventajas de contar con la interfaz gráfica propuesta son evidentes con respecto a no contar con esta herramienta en lo absoluto, aún más teniendo en cuenta que no existe una herramienta de software en el mercado diseñada específicamente para esta función.

2.3.1. ANÁLISIS VALORATIVO DE LOS ASPECTOS ECONÓMICOS, SOCIALES Y MEDIOAMBIENTALES.

Un carbón activado de calidad es difícil de producir, consume gran cantidad de energía térmica así como grandes cantidades de biomasa, aspecto que influye directamente en el precio de este recurso; a todo esto se suma la huella ecológica asociada al proceso de producción del mismo, ya dígame por el consumo de recursos forestales o la emisión de gases de efecto invernadero.

El carbón activado granular usado en los servicios de hemodiálisis en Cuba debe ser importado en su totalidad ya que actualmente no se produce a nivel nacional un carbón activado con la calidad requerida para ser utilizado en estos sistemas. Mejoras en el proceso de manejo de este carbón influirán directamente en la reducción de importaciones (como arrojan los primeros resultados de la investigación). Cada adsorbedor de lecho fijo (como se explicó anteriormente) comúnmente conocido como “filtro” de carbón activado, usado en cada planta de tratamiento de agua para hemodiálisis del país, demanda aproximadamente 120 kg de carbón activado, cada bolsa de carbón activado (11 kg) en el mercado internacional tiene un precio aproximado de 300 € euros, teniendo en cuenta las restricciones económicas impuestas al país acompañadas a los gastos de importación, se pueden claramente identificar las ventajas económicas que traería consigo el uso óptimo de este material en las plantas de tratamiento de agua de uso médico.

Actualmente no existen políticas claras en lo referente al manejo del CA utilizado en los filtros de tratamiento de agua para la producción de agua para hemodiálisis. El proceso de caracterización, regeneración y reúso de este material es prácticamente inexistente (cuando se realiza se procede de manera inadecuada, ver sección 1.4), solamente se realiza la explotación de este producto y su desecho al medioambiente una vez declarado como agotado.

Cada filtro de CA en la planta de tratamiento debe ser reemplazado aproximadamente cada seis meses, este tiempo varía significativamente en dependencia del suministro de agua del que se alimente el hospital; por lo que su uso puede verse reducido en provincias con depósitos fluviales altamente cargados con elementos como calcio, magnesio y sodio. Teniendo en cuenta que las plantas de tratamiento de agua que se

utilizan en el país actualmente utilizan dos filtros de CA en paralelo, de 120 kg cada uno, cada hospital con servicio de hemodiálisis debe reponer 480 kg de CA cada año para mantener el correcto funcionamiento del servicio; esto se traduce en que cada año cada hospital, de cada provincia del país con servicio de hemodiálisis, debe reponer aproximadamente media tonelada de CA (aproximadamente 10000 €) para mantener el funcionamiento de los servicios de hemodiálisis en el hospital.

Esto tiene un impacto significativo en el aspecto económico y medioambiental del país; la mayoría de las provincias del país cuentan con más de cinco servicios de hemodiálisis, lo que a grandes rasgos se traduce en la necesidad de reponer y procesar aproximadamente 2.5 toneladas de CA cada año en cada provincia del país.

La implementación de un sistema informático para la caracterización del CAG usado en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis, pretende disminuir de manera considerable los efectos económicos y medioambientales adversos que provoca el uso incorrecto de este recurso. El uso de la nueva técnica de caracterización (XRA) a través de la automatización del proceso de caracterización utilizando la herramienta de software propuesta y los métodos de regeneración adecuados, incidirán de manera decisiva (caracterización, regeneración y reúso) en un correcto manejo de este costoso material.

En base a una correcta caracterización, se espera extender el tiempo de vida útil del costoso carbón activado usado en las plantas de purificación de agua para servicios de salud pública, permitiendo además encontrar el método de regeneración adecuado para el reúso del mismo. Implementado una sólida estrategia de manejo según sus tres pasos fundamentales: Caracterización (aplicando además el nuevo método XRA en Cuba), explotación y regeneración se podrá mejorar sustancialmente la estrategia de manejo vigente, donde el carbón activado es ineficientemente explotado sin ser sometido a una correcta caracterización y no se establecen protocolos claros para su regeneración ni se exploran las posibilidades de reúso del mismo luego de la regeneración.

Se espera que poniendo en práctica la regeneración propuesta se podrá ahorrar el 50% de la inversión total de las importaciones de carbón virgen para uso en plantas de purificación. Esto representa unos 30 000 € anuales que pueden entonces ser

invertidos en otros servicios de salud. La regeneración y optimización del aprovechamiento del CA en la industria médica resulta estratégico para lograr la invulnerabilidad e independencia ante las restricciones económicas actuales recrudecidas por el gobierno de los EUA y contribuir así la reducción de las demandas de importaciones en un sector priorizado por el gobierno cubano, la salud pública. Desde el punto de vista social, queda claro que serán beneficiados cientos de hospitales y pacientes que necesiten los servicios vitales de tratamientos de hemodiálisis, logrando así mayor estabilidad e invulnerabilidad en los servicios médicos.

Además del correcto manejo de este CAG, a partir de una correcta caracterización del mismo, será posible analizar las posibilidades de reúso de este material en otras industrias (en caso que ya no pueda ser utilizado en la industria médica y su regeneración no sea factible) como la industria minera, específicamente en la extracción de metales pesados en la industria del níquel en Holguín o en la purificación de otros sistemas de tratamiento; en donde éste CAG, que ya no es efectivo para la adsorción del cloro libre, puede ser explotado con resultados aceptables.

El costo de producción de la propuesta de interfaz gráfica se aborda teniendo en cuenta aspectos fundamentales como el tiempo dedicado a la concepción, diseño e implementación del software así como costos adicionales relacionados principalmente con la adquisición de una licencia válida de MATLAB® que permita operar la herramienta de software desarrollada de manera legal. En el desarrollo de la herramienta de software se trabajó por 6 horas diarias durante un periodo de 6 meses sin tener en cuenta los fines de semana (sábados y domingos), teniendo en cuenta lo anterior es posible decir que:

- Periodo trabajado: 6 meses.
- Horas al día: 6 horas.
- Días laborales por mes: 22 días.
- Días dedicados al trabajo en el software: $6 \times 22 = 132$ días.
- Horas de trabajo total dedicadas al desarrollo de la interfaz: $6 \times 22 \times 6 = 792$ horas.

El salario nominal mensual de un trabajador del centro provincial de electromedicina en la actualidad es de aproximadamente 1000 pesos al mes, suponiendo 22 días laborales mensual, se pagan 45 pesos por día de trabajo, tomando una jornada laboral de 8 horas podemos decir que el pago aproximado por hora de trabajo es de 6 pesos, de acuerdo con esto y teniendo en cuenta que la cantidad de horas dedicadas al software fueron 792, el costo aproximado del software seria de $792 \times 6 = 4752$ pesos aproximadamente 190 pesos convertibles.

El costo de una licencia de software válida para MATLAB® es de aproximadamente 15 euros, tomando como tasa de cambio entre euros y pesos cubanos convertibles un factor de aproximadamente 1.08, tenemos que el equivalente aproximado de una licencia valida en pesos convertibles es de 16.2 pesos convertibles, esto sumado a los costos de realización del software arrojan un costo total de aproximadamente 5155 pesos o 206.2 pesos convertibles.

CONCLUSIONES

En este capítulo se han expuesto los resultados obtenidos en el diseño e implementación de la interfaz gráfica de usuario propuesta. Se describen las principales funcionalidades de esta propuesta de software y las ventajas que ofrece el uso de esta aplicación respecto a la utilización de la ventana de comandos de MATLAB® o la implementación de "scripts". Se muestra además el resultado de la aplicación de la interfaz gráfica propuesta en el análisis de diferentes muestras de CAG, utilizados en diferentes industrias del país, con resultados satisfactorios. Se evaluó el desempeño de la herramienta de software desarrollada utilizando las métricas establecidas en la norma ISO/IEC 9126 (1-4), teniendo en cuenta el criterio de expertos familiarizados con el uso de la herramienta. Finalmente se muestra una valoración económica, social y medioambiental realizada en base a los resultados de la aplicación del software en la automatización del proceso de caracterización de CAGs para uso médico.

CONCLUSIONES

Se logró con la ejecución de este trabajo implementar de manera satisfactoria una interfaz gráfica de usuario utilizando MATLAB® capaz de realizar de manera rápida, y confiable todo el volumen de cálculo asociado a la aplicación del método XRA para la caracterización del grado de agotamiento de CAGs para uso médico. La herramienta de software propuesta presenta una interfaz agradable y funcional para el usuario, brindando disímiles opciones que hacen del procesamiento y obtención de perfiles de agotamiento una experiencia interesante. Demostró mejoras significativas en la disminución del tiempo de duración de un estudio completo; representando entre un 92 a un 96 % respecto al tiempo máximo reportado utilizando la ventana de comandos y de un 36 a un 56 % respecto a la utilización del script; así mismo el software cumple con aproximadamente un 80% de las sub-características utilizadas por la norma ISO/IEC 9126-1 para la evaluación de la calidad de productos de software. El uso de la interfaz de usuario propuesta en la industria médica posibilitará la correcta caracterización del CAG utilizado en las plantas de pre-tratamiento por el personal a cargo de esta instalación.

Se realizó el estudio de las técnicas actuales de caracterización del CAG utilizado en las plantas de tratamiento de agua para la producción de agua para diálisis, seleccionando cómo método más adecuado para la caracterización en el ámbito médico el XRA, ya que utiliza los equipos de Rayos X que se encuentran en los Hospitales, no requiriendo de ningún equipamiento adicional.

Como características fundamentales de la imagen procesada se seleccionan el nivel de gris y la concentración espacial, ya que permiten definir el tipo de regeneración a aplicar y con qué intensidad debe aplicarse el proceso de regeneración. Los resultados alcanzados por el software en estos análisis fueron corroborados utilizando técnicas analíticas de primer nivel.

El uso de la herramienta de software propuesta permitirá seleccionar la estrategia de regeneración más adecuada, aspecto que posibilitará un ahorro de aproximadamente el 50 % de la inversión total destinada a la compra de carbón virgen, estimado en alrededor de 30 000 € euros anuales.

El software propuesto ha sido utilizado en la caracterización del CAG utilizado en las plantas de tratamiento de agua en los Hospitales Clínico Quirúrgico Juan Bruno Zayas y Provincial Saturnino Lora de Santiago de Cuba y en el Hospital General de Ciego de Ávila, así como en la Destilería Ronera Santiago de Cuba, CUBA RON S.A. con resultados satisfactorios, demostrando que es posible utilizar la herramienta en otras industrias con resultados confiables; así mismo los resultados de la aplicación de la herramienta propuesta en la caracterización de los CAGs para uso médico demuestra que es posible reutilizar el material que ya no es efectivo en la remoción de cloro libre en la adsorción de metales pesados de gran valor económico; como el níquel que se extrae en la industria minera ubicada en la provincia Holguín.

RECOMENDACIONES

1. Continuar el proceso de actualización del software en específico actualizaciones orientadas al procesamiento de imágenes de radiografía digital realizadas a filtros de tratamiento de agua utilizados en plantas Hunday para uso en laboratorio.
2. De la misma forma se planea introducir nuevas funcionalidades orientadas al procesamiento de imágenes digitales en tres dimensiones procedentes de nuevos experimentos realizados usando micro tomografía computarizada que permitirían analizar las muestras en su totalidad y no solo la proyección 2D de estas.
3. Implementar nuevos métodos de procesamiento soportados en la aplicación de la técnica XRA para la detección de elementos individuales en muestras solidas de carbón activado granular como el comienzo de una nueva técnica de espectrometría de rayos X. [1]
4. Implementar nuevas herramientas orientadas a la aplicación de algoritmos de aprendizaje profundo para la caracterización del grado de agotamiento de muestras de CAG analizadas usando el método XRA (artículo científico en proceso de revisión).
5. Extender el uso de la herramienta a otras industrias con el objetivo de optimizar el manejo del CAG utilizado en la industria médica a través de la posible reutilización del material agotado en la industria minera-metalúrgica etc...

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bansal, R.C. and M. Goyal, *Activated carbon adsorption*. 2005: CRC press.
- [2] Hsieh, C.-T. and H. Teng, *Influence of mesopore volume and adsorbate size on adsorption*
- [3] Ying, W., *Processing's of the 44th Purdue Industrial Waste Conference*, 1989, Lewis Publishers, Chelsea, MI.
- [4] Layman-Amato, R., J. Curtis, and G.M. Payne, *Water treatment for hemodialysis: An update*. *Nephrol Nurs J*, 2013. 40(5): p. 383-404.
- [5] KESHAVIAH, P., 17. *Water treatment for hemodialysis*. *Quality Assurance in Dialysis*, 2007. 39: p. 173.
- [6] Tipple, M.A., et al., *Illness in hemodialysis patients after exposure to chloramine contaminated dialysate*. *ASAIO transactions*, 1991. 37(4): p. 588-591.
- [7] White, C.W. and J.G. Martin, *Chlorine gas inhalation: human clinical evidence of toxicity and experience in animal models*. *Proceedings of the American Thoracic Society*, 2010. 7(4): p. 257-263.
- [8] Bougeard, C.M., et al., *Comparison of the disinfection by-product formation potential of treated waters exposed to chlorine and monochloramine*. *Water research*, 2010. 44(3): p. 729-740.
- [9] Hsu, C.-H., et al., *Estimation of potential lifetime cancer risks for trihalomethanes from consuming chlorinated drinking water in Taiwan*. *Environmental Research*, 2001. 85(2): p. 77-82.
- [10] Koivusalo, M., et al., *Drinking water chlorination and cancer—a historical cohort study in Finland*. *Cancer Causes & Control*, 1997. 8(2): p. 192-200.
- [11] Srinivasan, A., et al., *A 17-month evaluation of a chlorine dioxide water treatment system to control Legionella species in a hospital water supply*. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 2003. 24(8): p. 575-579.
- [12] Watts, M.J. and K.G. Linden, *Chlorine photolysis and subsequent OH radical production during UV treatment of chlorinated water*. *Water Research*, 2007. 41(13): p. 2871-2878.
- [13] Torres, J.P., et al., *X-ray absorption as an alternative method to determine the exhausting degree of activated carbon layers in water treatment system for medical services*. *Talanta*, 2019. 205: p. 120058.
- [14] Sariol, H.C., et al., *A novel acoustic approach for the characterization of granular activated carbons used in the rum production*. *Ultrasonics*, 2016. 70: p. 53-63.
- [15] Crespo Sariol, H., et al., *Comparative Study between Acoustic Emission Analysis and Immersion Bubble-Metric Technique, TGA and TD-GC/MS in View of the Characterization of Granular Activated Carbons Used in Rum Production*. *Beverages*, 2017. 3(1): p. 12.
- [16] Crespo Sariol, H., et al., *A Colorimetric Method for the Determination of the Exhaustion Level of Granular Activated Carbons Used in Rum Production*. *Beverages*, 2016. 2(3): p. 24.
- [17] Torres, J.P., et al., *A novel X-ray radiography approach for the characterization of granular activated carbons used in the rum production*. *Journal of Analytical Science and Technology*, 2018. 9(1): p. 1.
- [18] Valentinuzzi, M.C., *Análisis por fluorescencia de rayos X: implementación de guías de haces en reflexión total*. Universidad Nacional De Cordoba, 2008.
- [19] Bushberg, J., et al., *PHYS 440/540-OPTI 440/540 MEDICAL PHYSICS-MEDICAL OPTICS*. *Cell*. 520: p. 977-3973.
- [20] Semmlow, J.L., *Biosignal and medical image processing*. 2008: CRC press.

-
- [21] Gonzalez, R. and R. Woods, *Digital image processing*. 2nd edn prentice hall. New Jersey, 2002. 793.
- [22] González, R.C., R.E. Woods, and S.L. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*. 2004: Pearson.
- [23] Blanchet, G. and M. Charbit, *Digital signal and image processing using MATLAB*. Vol. 4. 2006: Wiley Online Library.
- [24] Higham, D.J. and N.J. Higham, *MATLAB guide*. Vol. 150. 2016: Siam.
- [25] Fedák, V., F. Ďurovský, and R. Ůveges, *Analysis of robotic system motion in SimMechanics and MATLAB GUI environment*, in *MATLAB Applications for the Practical Engineer*. 2014, IntechOpen.
- [26] Gupta, R., J. Bera, and M. Mitra, *Development of an embedded system and MATLAB-based GUI for online acquisition and analysis of ECG signal*. Measurement, 2010. **43**(9): p. 1119-1126.
- [27] Hunt, B.R., R.L. Lipsman, and J.M. Rosenberg, *A guide to MATLAB: for beginners and experienced users*. 2014: Cambridge university press.
- [28] Atluri, S., et al., *TMSEEG: a MATLAB-based graphical user interface for processing electrophysiological signals during transcranial magnetic stimulation*. Frontiers in neural circuits, 2016. **10**: p. 78.
- [29] Ayaz, M., I. Colak, and R. Bayindir. *Matlab/gui based wind turbine generator types on smart grid systems*. In *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 2016. IEEE.
- [30] Babu, V.S., M. Majumder, and A. Ramprasad, *Investigation and Development of Non-Symmetric Gear System using Matlab Graphical User Interface (GUI)® and Autodesk Inventor*. International Journal of Industrial Engineering, 2017. **1**(5): p. 151-160.
- [31] Bays, N., J. Clifton, and K. Hatipoglu. *MATLAB-Graphical User Interface to study partial shading of PV array characteristics*. In *IEEE SOUTHEASTCON 2014*. 2014. IEEE.
- [32] Çetin, G.D., O. Cetin, and M.R. Bozkurt, *The detection of normal and epileptic EEG signals using ANN methods with Matlab-based GUI*. International Journal of Computer Applications, 2015. **114**(12): p. 45-50.
- [33] Fotouhi, A., et al. *A MATLAB graphical user interface for battery design and simulation; from cell test data to real-world automotive simulation*. In *2016 13th International Conference on Synthesis, Modelling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*. 2016. IEEE.
- [34] Mengarelli, A., et al. *A MATLAB-based graphical user interface for the identification of muscular activations from surface electromyography signals*. In *2016 38th Annual International*
- [35] Postma, J.E. and D. Leahy, *CCDLAB: A Graphical User Interface FITS Image Data Reducer, Viewer, and Canadian UVIT Data Pipeline*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2017. **129** (981): p. 115002.
- [36] Piretzidis, D. and M. Sideris. *MAP-LAB: A MATLAB graphical user interface for generating maps for geodetic and oceanographic applications*. In *Poster presented at the international symposium on gravity, geoid and height systems*. 2016.
- [37] Rahim, N.A. and Z. Ahmad, *Graphical user interface application in Matlab environment for water and air quality process monitoring*. Chemical Engineering Transactions, 2017. **56**: p. 97-102.
- [38] Abers, G.A. and B.R. Hacker, *A MATLAB toolbox and Excel workbook for calculating the densities, seismic wave speeds, and major element composition of minerals and rocks at pressure and temperature*. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2016. **17**(2): p. 616-624.

-
- [39] Brown, T., P. Kyritsi, and E. De Carvalho, *Practical guide to MIMO radio channel: With MATLAB examples*. 2012: John Wiley & Sons.
- [40] *Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. 2016. IEEE.
- [41] Elwaseif, M., et al., *A matlab-based frequency-domain electromagnetic inversion code (FEMIC) with graphical user interface*. Computers & geosciences, 2017. **99**: p. 61-71.
- [42] John, A.A., et al., *Evaluation of cardiac signals using discrete wavelet transform with MATLAB graphical user interface*. Indian heart journal, 2015. **67**(6): p. 549-551.
- [43] Nordin, A.H.M., et al. *Transformer interactive learning tool based on MATLAB Simulink and GUI*. In *2017 IEEE 9th International Conference on Engineering Education (ICEED)*. 2017. IEEE.
- [44] Ping, H., et al. *An educational tool design for the course of signal processing based on Matlab GUI*. In *2014 IEEE International Conference on Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE)*. 2014. IEEE.
- [45] Priya, P.K. and G.U. Reddy, *MATLAB Based GUI for Arrhythmia Detection Using Wavelet Transform*. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (An ISO 3297: 2007 Certified Organization) Vol, 2015. **4**.
- [46] Reddy, B.C. and R.V. Rao, *Implementation of automatic piano player using Matlab graphical user interface*. International Journal for Advance Research and Development, 2017. **2**(4).
- [47] Schwanghart, W. and D. Scherler, *TopoToolbox 2—MATLAB-based software for topographic analysis and modelling in Earth surface sciences*. Earth Surface Dynamics, 2014. **2**(1): p. 1-7.
- [48] Tran, A.P., B. Dafflon, and S. Hubbard, *iMatTOUGH: An open-source Matlab-based graphical user interface for pre-and post-processing of TOUGH2 and iTOUGH2 models*. Computers & geosciences, 2016. **89**: p. 132-143.
- [49] Victoria, M., et al., *liteITD a MATLAB Graphical User Interface (GUI) program for topology design of continuum structures*. Advances in Engineering Software, 2016. **100**: p. 126-147.
- [50] Al-Kilidar, H., K. Cox, and B. Kitchenham. *The use and usefulness of the ISO/IEC 9126 quality standard*. In *2005 International Symposium on Empirical Software Engineering*, 2005. 2005. IEEE.
- [51] Azuma, M. *Applying ISO/IEC 9126-1 quality model to quality requirements engineering on critical software*. In *Proceedings of the 3rd IEEE Int. Workshop on Requirements for High Assurance Systems (RHAS)*. 2004.

ANEXOS

ANEXO 1: SEGMENTO DE CÓDIGO PARA LA CREACIÓN DE PESTAÑAS.

% VARIABLE DECLARATION!!!!!!

% choose default command line output for XRA

handles.output = hObject;

% Update handles structure

guidata(hObject, handles);

%Making the firsts group of tabs for the Depths

handles.TabGroup = uitabgroup('Position',[0.375,0.1,0.16,0.89]); drawnow;

%Making the tabs

handles.tab1 = uitab('Parent',handles.TabGroup,'title','Depts(1-5)');

handles.tab2 = uitab('Parent',handles.TabGroup,'title','Depts(6-10)');

%Set the panels position in the GUIDE

set(handles.panel2,'Position',[0,0,0.95,1]);

%Associating the panels with the tabs

set(handles.panel2,'Parent',handles.tab1);

set(handles.panel11,'Parent',handles.tab2);

%Each panel inside the other

set(handles.panel11,'position',get(handles.panel2,'position'));

guidata(hObject, handles);

ANEXO 2: AVALES DE LAS ENTIDADES RELACIONADAS CON EL PROYECTO.