



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE UN
SISTEMA DIGITAL PARA EL CONTEO Y
ANÁLISIS DE TRAZAS NUCLEARES EN
SÓLIDOS Y SUS APLICACIONES EN
FÍSICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Física

PRESENTA:

Jael Azucena Soriano Arteaga

TUTOR

Guillermo C. Espinosa García





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado

1. Datos del alumno

Apellido paterno	Soriano
Apellido Materno	Arteaga
Nombre(s)	Jael Azucena
Teléfono	56 84 79 53
Institución	Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias
Carrera	Física
Número de Cuenta	305168160

2. Datos del tutor

Grado	Dr.
Nombre(s)	Guillermo Cirano
Apellido Paterno	Espinosa
Apellido Materno	García

3. Datos del sinodal 1

Grado	Dr.
Nombre(s)	Enrique
Apellido Paterno	Cabrera
Apellido Materno	Bravo

4. Datos del sinodal 2	
Grado	Dr.
Nombre(s)	Carlos
Apellido Paterno	Vázquez
Apellido Materno	López
5. Datos suplente 1	
Grado	Fís.
Nombre(s)	Juan Ramón
Apellido Paterno	Sánchez
Apellido Materno	Jácome
6. Datos suplente 2	
Grado	Dr.
Nombre(s)	Fermín
Apellido Paterno	Castillo
Apellido Materno	Mejía
6. Datos del trabajo escrito	

Título	Estudio y caracterización de un sistema digital para el conteo y análisis de Trazas nucleares en sólidos y sus aplicaciones en física
Número de páginas	81p
Año	2016

Dedicado a
la mejor familia del mundo porque me brindaron todo su apoyo para seguir
estudiando y lograr el objetivo trazado para un futuro mejor y espero ser orgullo
para ellos.

Agradecer lo que la vida me ha dado con mi pequeño hijo y el impulso que él me
brindo para ser un ejemplo y un orgullo ante él.

Agradecimientos

A todas las personas que directa o indirectamente me ayudaron a desarrollar y concluir este trabajo de tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, porque me ha formado un futuro que seguir.

A la Facultad de Ciencias por las enseñanzas tanto académicas como de vida, que aprendí en sus aulas.

A mis queridos formadores, en especial a mi asesor y profesor Guillermo Espinosa García, por todos sus consejos y correcciones, pero sobre todo por su paciencia.

Al Dr. Enrique Cabrera Bravo y al apoyo técnico de José Ignacio Golzarri por haberme impulsado a seguir adelante aún con las dificultades en el camino.

A mis sinodales por haberme facilitado su tiempo y dedicación en la corrección de mi tesis, además de sus palabras.

Este estudio fue realizado usando el laboratorio y las facilidades del "Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría" del Instituto de Física de la UNAM (IFUNAM) y con el apoyo de los proyectos UNAM-DGAPA-PAPIIT y IN103013 y IN103316 titulados: "Estudio de contaminantes radiológicos ambientales en agua, suelo, alimentos y aire (partes III y IV)".

¡GRACIAS A TODOS!

Introducción

El método de detección de partículas nucleares por trazas en sólidos tiene muchas aplicaciones en muy diversos campos de la ciencia y la tecnología.

La ventaja de éste método es su simpleza ya que no requiere de instrumentación sofisticada y sobre todo es de bajo costo, pero este método presenta un punto débil que es el procedimiento de conteo y análisis de las huellas de la radiación dejadas en los materiales al interactuar con ellos, las cuales se les conoce como trazas reveladas.

En este proyecto de tesis se presenta un método de conteo y análisis por medio del procesamiento de digitalización de imágenes, y un programa de cómputo, para la automatización de este proceso, dando una solución rápida y eficiente al conteo y análisis de las huellas nucleares en la metodología de este sistema.

El método propuesto consiste en dos pasos básicos:

1. La digitalización de la imagen de algún campo del material detector obtenida mediante un microscopio óptico, después del proceso químico de grabado.
2. El conteo de la densidad de trazas por unidad de área y/o el análisis de la traza formada mediante la medición y caracterización del diámetro, excentricidad y ordenamiento de cada una.

Con estos pasos se puede hacer la caracterización del diámetro, excentricidad y distribución de las trazas formadas por las partículas ionizantes automáticamente, haciendo el método considerablemente más rápido, simple y eficiente en comparación al método manual.

En la actualidad más del 80 % de los laboratorios, instituciones y universidades alrededor del mundo que utilizan la metodología de trazas nucleares no tiene las facilidades de un sistema de conteo y análisis automatizado, por lo que se espera que este trabajo sea de gran valía para estos grupos. La tesis está estructurada de la siguiente manera:

- En el capítulo 1 se verán los aspectos fundamentales de la física que son necesarios para la comprensión del proceso de interacción entre las partículas cargadas y el material que es ionizado por la misma. Además, es importante saber el proceso de grabado para que la traza sea observable.
- Para el capítulo 2 se toman los aspectos necesarios para la digitalización de la imagen, y así poder captar bien el campo a visualizar para tener la menor cantidad de incertidumbre posible. Si la imagen esta bien lograda, la cantidad de trazas observables es más fácil de estudiar.
- El capítulo 3 contiene la metodología que se siguió para este trabajo; desde la exposición del material a la fuente de radiación, el grabado químico o

desgaste del material para la visualización de la traza y el conteo y análisis de la traza para obtener la actividad o flujo de la fuente de radiación que afectó al material, es decir, las partículas que incidieron en éste.

- En el capítulo 4 se tiene la explicación de la instrumentación utilizada para este proyecto, así como el funcionamiento de cada sección.
- En el capítulo 5 se dan los resultados obtenidos en este trabajo y el procedimiento para obtenerlos, además de caracterizar el sistema en conjunto.
- En el capítulo 6 se da una visualización de los campos de investigación en que se puede utilizar el sistema de conteo y análisis propuesto y algunas recomendaciones de uso para éstos.

Índice general

Introducción	VII
Capítulo 1 – Aspectos fundamentales de física	
1.1 Interacción de partículas cargadas con el medio	1
1.1.1 Interacción de partículas alpha con la materia	2
1.2 Interacción de partículas no cargadas con el medio	3
1.3 Interacción de fotones con la materia	3
1.4 Métodos de detección de radiación	6
1.4.1 Principios de la radiación ionizante	6
1.4.2 Detectores gaseosos de ionización	7
1.4.3 Termoluminiscencia (TL)	9
1.5 Detector por trazas nucleares en sólidos (TNS)	9
1.6 Formación de la traza nuclear	10
1.7 Formación geométrica de la traza grabada	11
1.8 Geometría de la traza para V_t variable	12
1.9 Conteo y análisis de las trazas formadas	14
1.9.1 Defectos del material a considerar en el análisis	14
1.10 Tipo de trazas nucleares	15
Capítulo 2 – Digitalización de imágenes	
2.1 Conversión de señal luminosa a señal digital	17
2.2 Manejo de la señal digital	18
2.2.1 Resolución	18
2.2.2 Dimensiones de píxel	18
2.2.3 Profundidad de bits	19
2.2.4 Rango dinámico	19
2.2.5 Tipos de formato(JPG o RAW)	19
2.2.6 Procesamiento de la imagen	19
2.3 Óptica Digital	20
2.4 Operación de la cámara Digital	21
2.4.1 Apertura del diafragma	21
2.4.2 Distancia focal	21
2.4.3 Perspectiva	21
2.4.4 Tiempo de exposición	21
2.4.5 Sensor y sensibilidad	21
2.4.6 Sensibilidad del sensor	21
2.4.7 Enfoque óptico	22

Capítulo 3 – Metodología

3.1 Detección de las trazas en sólidos	23
3.1.1 Exposición a la radiación ionizante	23
3.2 Métodos de conteo y su evolución	24
3.3 Sistema DIAS (Digital Image Analysis)	27
3.4 Sistema CADIS (Counting and Analysis Digital Image System)	28

Capítulo 4 – Instrumentación

4.1 Hardware	29
4.2 Especificaciones de los microscopios	30
4.2.1 Microscopio óptico escolar	30
4.2.2 Especificaciones Microscopio quasar	30
4.2.3 Especificaciones microscopio ZEISS	31
4.3 Software	32

Capítulo 5 – Operación del sistema y Resultados

5.1 Método de uso del programa de conteo	35
5.2 Calibración del sistema (Linealidad)	42
5.2.1 Comprobación de la linealidad	42
5.3 Factor de correlación	43
5.4 Excentricidad	44
5.5 Campos de lectura y tiempos de análisis	46
5.5.1 Comparativa con otro método	46

Capítulo 6 – Aplicaciones

6.1 En Física Nuclear	47
6.2 En Geocronología	47
6.3 En Cosmología	47
6.4 En Sismología	48
6.5 Radón Intramuros	48
6.6 Biología y medicina	48
6.7 Litografía de iones pesados	49
6.8 Altímetro de pájaros usando trazas nucleares	49

Apéndices

Apéndice A – Manual de uso del software para la cámara digital del microscopio quasar

Apéndice B – Campos ejemplo de los detectores CR39 utilizados

Glosario

Siglas

Lista de figuras

Lista de tablas

Capítulo 1

Aspectos fundamentales de física

1.1. Interacción de partículas cargadas con el medio

Cuando una partícula cargada se mueve a través de un medio, ésta interactúa primordialmente con los electrones atómicos del medio, ya que las colisiones mecánicas son poco probables. El proceso principalmente se da como una interacción coulombiana. Si la partícula tiene suficiente energía cinética, puede depositar energía al medio por ionización de sus átomos. Si la partícula es masiva, su interacción no afecta demasiado su trayectoria

Una variable conveniente para describir esta ionización es el poder de frenado $S(T)$, definida como la cantidad de energía cinética perdida por el objeto prueba por unidad de distancia a través de un medio. Esta puede ser descrita por la fórmula 1.1

$$S(T) = -\frac{dT}{dx} = n_{ion}\bar{I} \quad (1.1)$$

Con T la energía cinética de la partícula, n_{ion} es el número de pares ionizados formados por unidad de distancia e \bar{I} denota el promedio de energía necesaria para ionizar un átomo del medio.

Como el poder de frenado solo depende de las interacciones electromagnéticas, puede ser calculado con la expresión dada por Hans Bethe y Félix Bloch:

$$S(T) = \frac{4\pi Q^2 e^2 n Z}{m\beta^2 c^2} \left[\ln \frac{2mc^2 \gamma^2 \beta^2}{\bar{I}} - \beta^2 \right] \quad (1.2)$$

Con $\beta = \frac{v}{c}$ la velocidad relativa de la partícula, m la masa reducida del electrón, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ el factor de Lorentz, Z el número atómico del medio, Q la carga y n el número de átomos por unidad de volumen

Podemos calcular también el rango de penetración sobre un medio como R , la cual se define como la distancia que viaja la partícula antes de perder su energía cinética en el medio. Entonces, R se calcula como:

$$R = \int_{x=0}^{x=R} dx = \int_T^0 \frac{dx}{dT} dT = \int_0^T \frac{dT}{S(T)} \quad (1.3)$$

$S(T)$ tiene unidades de $\frac{erg}{cm}$ o $\frac{MeV}{gr/cm^2}$ mientras que el rango se expresa comúnmente en gm/cm^2 , por lo que se puede observar su relación con la densidad del medio.

1.1.1. Interacción de partículas alfa con la materia

Las partículas alfa constituyen el grupo de partículas cargadas pesadas, al estar constituida por dos protones y dos neutrones, poseen una masa aproximada de 6,000 veces la masa del electrón y al ser proporcional a la energía cinética, tienen una velocidad mucho menor. Esta propiedad y el hecho de poseer una doble carga positiva le confieren a las partículas alfa una elevada probabilidad de interacción. Su interacción con la materia produce principalmente ionización y excitación en los átomos del absorbente, no existiendo prácticamente radiación de frenado. Estas partículas, emitidas por los núcleos atómicos con energías comprendidas entre los 3 y los 9 MeV son partículas no relativistas (sus velocidades están comprendidas entre 1.1 y 2.2×10^8 m/s). Una hoja de papel o algunos centímetros de aire bastan para absorber totalmente partículas alfa producidas en reacciones nucleares. La ionización específica de las partículas alfa es muy alta y puede variar entre 5,000 y 80,000 pares iónicos por centímetro de recorrido. En el aire, a medida que su velocidad disminuye, aumenta su ionización específica hasta alcanzar su máximo valor al final de su recorrido, según puede apreciarse en la figura 1.1.

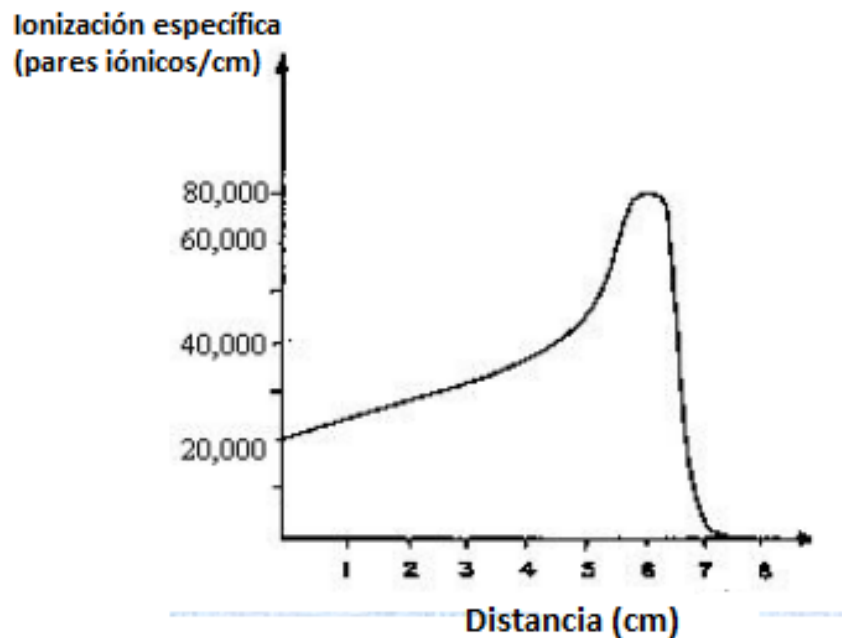


Figura 1.1: Ionización por centímetro de partículas alfa [1]

1.2. Interacción de partículas no cargadas con el medio

Los neutrones, como su nombre lo indica, son partículas no cargadas, por lo que la interacción en el medio no es directamente una fuerza de Coulomb.

Cuando interactúan inelásticamente, ellos pueden dejar el núcleo en un estado excitado haciendo decaer al átomo a niveles más bajos y liberando fotones o partículas de éste gracias a la fuerza nuclear fuerte. Estas liberaciones normalmente consisten en radiación gamma, y pueden ser detectadas como una radiación secundaria.

Cuando un núcleo estable absorbe un neutrón, puede transformarse en un radio-nucleido y, en su desintegración emitir partículas alfa o fotones. Incluso en el caso en que la absorción conduzca a otro nucleido estable, se producen habitualmente los fotones de desintegración, propios de la reacción (n,γ) .

Los procesos de dispersión, en cambio, pueden conducir también a la producción de partículas de alto poder ionizante; tal ocurre cuando los neutrones rápidos interactúan con materiales ricos en hidrógeno, como el agua. En estas condiciones, al chocar los neutrones con los átomos de hidrógeno, éstos resultan expulsados al romperse el enlace químico y emergen en forma de patrones con una fracción importante de la energía del neutrón. Estos protones de retroceso (reacciones (n,p)), son partículas capaces de producir una alta densidad de ionización a lo largo de su trayectoria.

Si la interacción fue elástica genera transferencia de energía cinética la cual genera señales de ionización que permiten detectar que en ese punto se generó una presencia del neutrón. En este tipo de interacción es más complicado transferir una parte importante de energía a núcleos de mayor masa, por lo que solo se observan energías débiles.

Los neutrones son partículas de una gran eficacia para la producción de reacciones nucleares, pues como carecen de carga eléctrica, no están sujetos a efectos de repulsión electrostática, y penetran en el núcleo sin la dificultad que la barrera de potencial opone a otras partículas cargadas, tales como partículas alfa, protones y deuterones. No sólo los neutrones de energía media o elevada son capaces de producir reacciones nucleares, los neutrones térmicos han demostrado ser de una gran eficacia.

1.3. Interacción de fotones con la materia

Los fotones son considerados como partículas sin masa y sin carga. Al interactuar en la materia dan lugar a colisiones aisladas, sin que se produzcan otras interacciones entre dos colisiones. Es por esta razón que los fotones no tienen un alcance definido al atravesar la materia, pero podemos saber la atenuación lineal, es decir, la probabilidad de que pase en la materia como

$$dN = -\mu \cdot N \cdot dx \quad (1.4)$$

Donde dN es la diferencial de proporción de partículas incidentes que es directamente proporcional al espesor dx del material, donde esta proporción se le conoce como el coeficiente de atenuación lineal (μ), el cual depende de la energía de los fotones, así como de la densidad y número atómico del material. Esta ecuación es

válida para radiación incidente monoenergética, colimada, delgada y homogénea. Este mecanismo de atenuación da lugar a varios procesos independientes que se describen a continuación.

Efecto fotoeléctrico

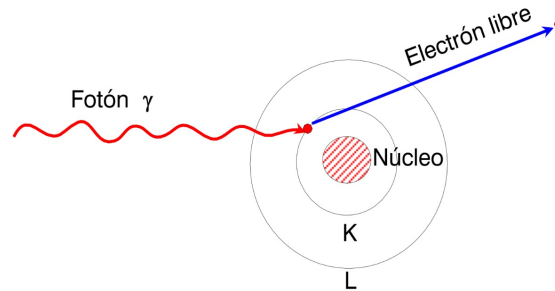


Figura 1.2: Representación gráfica del efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico se produce entre un fotón y un átomo, representado por uno de sus electrones suficientemente ligado. La consecuencia de una interacción fotoeléctrica es la emisión de electrones debido a la absorción total de la energía del fotón por el electrón ligado.

La energía de emisión de estos electrones es de:

$$E_f = E_\gamma - E_b \quad (1.5)$$

donde $E_\gamma = h\nu$ es la energía del fotón incidente y E_b la ligadura del electrón del átomo.

Efecto Compton

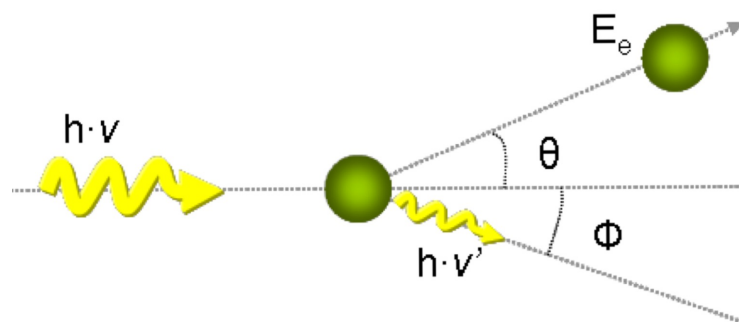


Figura 1.3: Representación gráfica del efecto Compton

Este efecto tiene lugar en la interacción de un fotón y un electrón débilmente ligado al átomo ($E_b \ll E_\gamma$) que se puede considerar como libre, tomándose entonces como colisión cuasielástica. al chocar el fotón primario, de energía $h\nu$, el electrón resulta reflectado un ángulo θ , y con energía E_e , mientras que el fotón

primario sufre una dispersión según un ángulo ϕ y su energía disminuye a $h\nu'$. El principio de conservación de la energía entonces se puede escribir como:

$$h\nu = h\nu' + E_e \quad (1.6)$$

La aplicación de los principios de conservación de la energía y el momento en condiciones relativistas nos permiten calcular el valor de la energía del fotón disperso como:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\phi)} \quad (1.7)$$

donde $\alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2}$, donde m_0 es igual a la masa en reposo del electrón.

También se puede calcular la energía cinética del electrón colisionado como:

$$T = h\nu - h\nu' = \frac{\alpha(1 - \cos\phi)}{1 + \alpha(1 - \cos\phi)} \quad (1.8)$$

Creación de pares

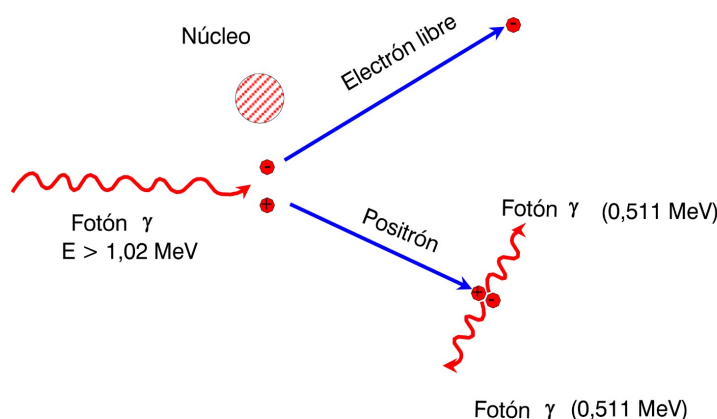


Figura 1.4: Proceso de formación de pares

El efecto de creación de pares tiene lugar con fotones de alta energía y representa un proceso de materialización de energía en el sentido de la mecánica relativista. El fenómeno que tiene lugar es la desaparición del fotón en el campo del núcleo dando lugar a la creación de un par positrón-electrón. El principio de conservación de la energía se expresa como:

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_+ + E_- \quad (1.9)$$

donde E_+ y E_- representan respectivamente las energías cinéticas del positrón y del electrón.

La creación de pares es imposible para fotones de energía inferior a 1.02 MeV , por lo que este valor supone el umbral energético del proceso.

Los positrones resultantes de la creación de pares, se aniquilan al combinarse con electrones en el medio de interacción.

1.4. Métodos de detección de radiación

1.4.1. Principios de la radiación ionizante

Como vimos en la sección anterior, al atravesar un medio material, la radiación interacciona cediéndole energía y provocando una serie de efectos a través de los cuales es posible su medida. Así utilizamos una de las propiedades físicas de la radiación que "produce" un efecto proporcional y se puede cuantificar. Estos efectos son: la ionización de gases, la disociación en la materia, la excitación de luminiscencia en ciertos sólidos o ciertas alteraciones biológicas.

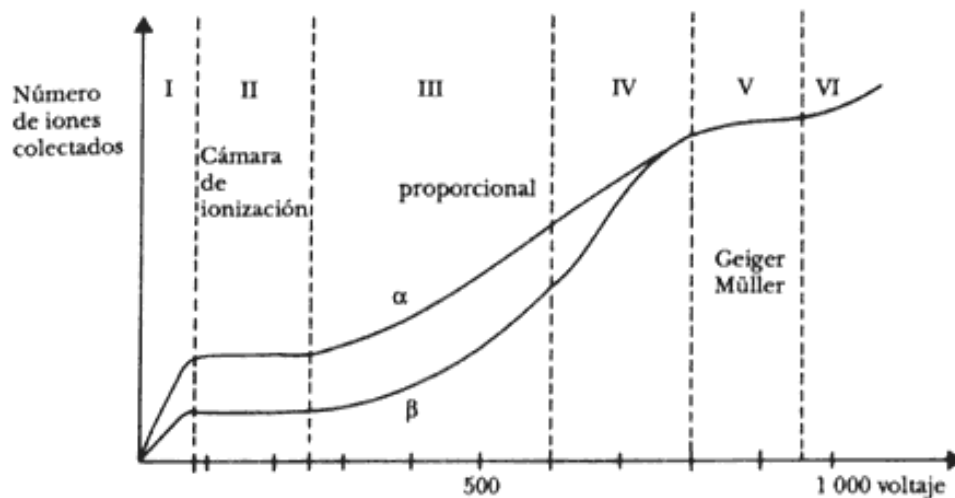


Figura 1.5: Curva característica de los detectores por ionización en gas

El comportamiento de los detectores de radiación varía según la tensión de polarización que se establezca entre los electrodos. Al ir aumentando desde cero la tensión de polarización que se establezca entre los electrodos del detector y medir la amplitud del impulso de corriente, se obtiene una curva como la que observamos en la figura 1.5.

En esta gráfica se pueden observar 6 regiones distintas de ionización: La primera es la región de recombinación, donde los iones y los electrones formados en la ionización del gas por radiación tienden a recombinarse y desaparecer, mientras que el campo eléctrico tiende al arrastre de los electrodos. La segunda es la región de saturación (ionización) que se da al aumentar el potencial eléctrico ya que en esta zona los electrones sometidos al campo eléctrico son atraídos con mayor velocidad produciendo la colección de todos los iones producidos por la radiación teniendo así una región plana (plató) en ella. En la tercera región llamada proporcional alcanzamos el voltaje crítico y se produce la multiplicación de iones. La señal detectada es proporcional al voltaje aplicado en el material. En la cuarta región conocida como proporcionalidad limitada, el tamaño del impulso sigue aumentando con la tensión de polarización pero el crecimiento deja de ser lineal variando por la intensidad y tipo de radiación que incide. Para la quinta región denominada la Geiger-Müller, el campo eléctrico es tan intenso que un solo par ión-electrón provoca una avalancha de ionizaciones secundarias, por lo que pocos iones generados por la radiación arrojan medidas muy elevadas. Por último la región de descarga

continua (IV) supone que el detector alcanza la zona en la que el dispositivo puede dañarse irreversiblemente si se mantiene en operación un tiempo determinado.

1.4.2. Detectores gaseosos de ionización

Los detectores gaseosos de ionización están esencialmente constituidos por un recinto lleno de un gas a presión constante definida, en el cual se disponen electrodos a los que se le aplica una tensión de polarización.

En condiciones normales, dado que los gases son aislantes, no circula corriente eléctrica entre ambos electrodos. Si la radiación ionizante alcanza el espacio entre los electrodos, el campo eléctrico existente dará lugar a que los portadores eléctricos generados en la interacción con la radiación, se muevan hacia los electrodos de signo contrario.

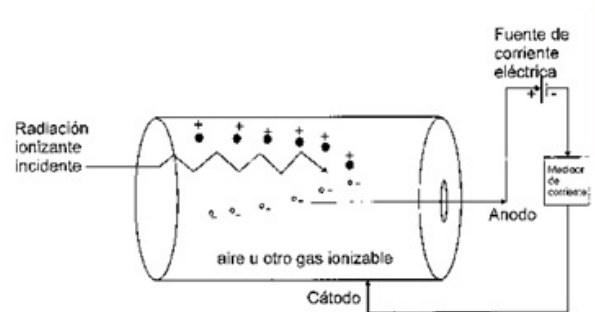


Figura 1.6: Fundamentos de la detección de la radiación ionizante

Cámaras de ionización

Consiste en una sonda cerrada llena de gas que puede ser aire, y provisto de dos electrodos entre los que se aplica la tensión eléctrica. Cuando la radiación ionizante interacciona con el gas, provoca la ionización de parte de sus átomos y por consiguiente se liberan iones positivos y electrones, haciéndolo parcialmente conductor la cual es medible.



Figura 1.7: Detector de cámara de ionización marca Victoreen modelo 450

Contadores proporcionales



Figura 1.8: Contador proporcional marca lamse

Para tensiones un poco mayores, la respuesta presenta una fuerte pendiente debido a la multiplicación secundaria de las cargas eléctricas liberadas. En la cámara obtienen mayor velocidad provocando estos choques secundarios.

Entre las características de los contadores proporcionales cabe resaltar que dan impulsos mayores que la cámara de ionización, suelen tener simetría cilíndrica y la respuesta es igual de rápida.

Contadores Geiger-Müller

Si se eleva suficiente la tensión eléctrica aplicada a un contador proporcional entramos a la zona Geiger-Müller. Las características principales de estos detectores son la simetría cilíndrica, es de dimensión reducida, la producción de electrones secundarios tiene lugar a lo largo del electrodo central y alcanzan factores de multiplicación muy elevados. El gran problema de estos detectores es que se saturan extremadamente rápido perdiendo confiabilidad. La cuantificación de la radiación se realiza mediante la colección de los iones pesados, por la radiación en los detectores.



Figura 1.9: Prototipo de monitor de radiación con detector Geiger-Müller

Los detectores de radiación ionizante en gas son detectores activos, es decir que la medida es en tiempo real y pueden ser analógicos o digitales.

1.4.3. Termoluminiscencia (TL)

Se llama termoluminiscencia a la emisión de luz que exhiben ciertas sustancias al ser calentadas, si previamente han sido expuestas a la acción de radiaciones ionizantes. En los materiales utilizados para este método de detección principalmente están el fluoruro de litio, y el fluoruro de calcio, y el oxido de silicio. Estos cristales prensados suelen ir alojados en un portadosímetro para uso personal.

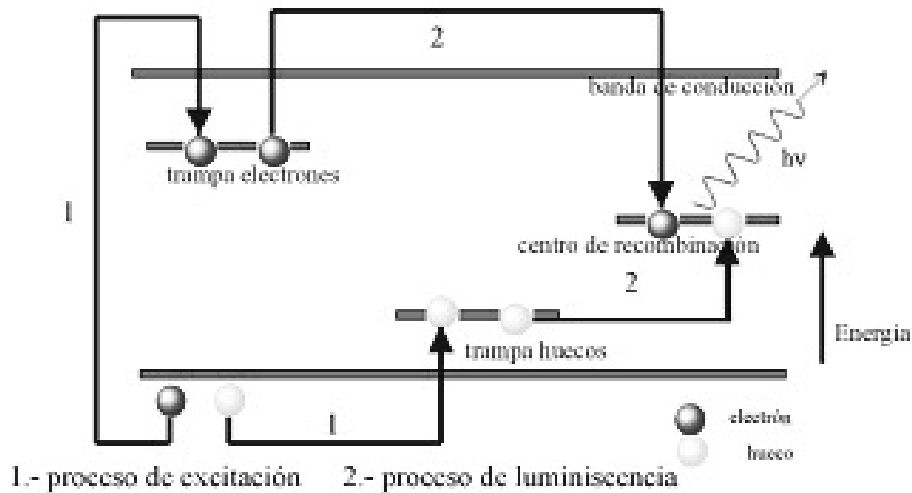
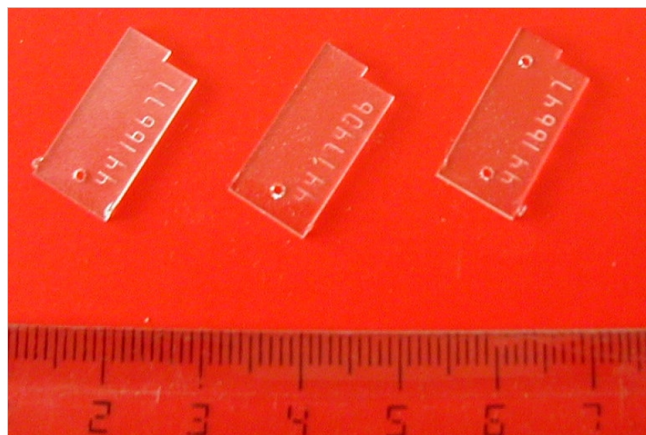


Figura 1.10: Esquema del principio básico de la termoluminiscencia

Este es otro método de detección donde la lectura se basa en la cuantificación de los fotones luminosos, producto de la desexcitación de los materiales radiados, mediante el uso de un fotomultiplicador.

1.5. Detector por trazas nucleares en sólidos (TNS)



Detectores CR-39 (Policarbonato)

Figura 1.11: Policarbonato CR-39 como detector de trazas nucleares

Son dispositivos pasivos que permiten la detección de partículas cargadas (partículas alfas, iones, fragmentos de fisión, etc.). Estos detectores que son plásticos como

los policarbonatos (CR-39) y celulosas nítridas (LR-115) entre otros, dan información sobre la cantidad de partículas (actividad) que llegan a una superficie en un determinado tiempo. Este método también permite la determinación de la energía de las partículas incidentes mediante la evaluación de los diámetros de las trazas formadas, además de su distribución angular. [10]

En este método la cuantificación tanto de la actividad, como de la energía de las partículas cargadas se basa en el conteo y/o análisis de las huellas dejadas por la radiación sobre el material. Esto se puede hacer manual o automáticamente, siendo así el punto central de este trabajo de tesis, el cual resuelve la tediosidad y limitación que se tenía con estos detectores.

1.6. Formación de la traza nuclear

”El paso de partículas nucleares y de iones pesados a través de la mayoría de los semiconductores sólidos, crea patrones finos de daño intenso, en la escala atómica”. Siendo éste el origen de lo que llamaremos traza nuclear en sólidos”. Young (1958) anuncia la formación de trazas nucleares. Posteriormente Price y Walker (1962) observaron mediante un microscopio electrónico de transmisión que el diámetro de la región con daño intenso era de 50Å.

Las trazas producidas por las partículas son huellas estables formadas básicamente por ”centros de tensión” que responden al ataque químico, estando estos centros de tensión formados por defectos electrónicos (Fleisher et al. 1965).

Si un átomo de número atómico Z se mueve a través de un sólido se convertirá rápidamente en ión, al ser desalojados de algunos o todos sus electrones originales. Así este nuevo ión adquirirá una carga neta positiva (Z^*). Heckman (et al. 1960) en forma empírica establece la siguiente expresión:

$$Z^* = Z \left[1 - e^{\left(\frac{-130\beta}{Z^{\frac{2}{3}}} \right)} \right] \quad (1.10)$$

Donde β es la velocidad ν del ión respecto a la velocidad de la luz, Z^* es la carga del ión adquirida, y Z el número atómico del átomo original. Para altas velocidades con $Z^* \simeq Z$ la interacción dominante es la fuerza ”eléctrica” entre el ión y los electrones del átomo sólido. En polímeros, esta sobreexcitación puede iniciar un rompimiento de cadenas moleculares largas y producir radicales libres (Bovey, 1958). En cualquier otro sólido, el proceso de ionización producirá ”centros de tensión”.

A los electrones desplazados se les llama ”rayos delta”, pudiéndose a su vez producir estos rayos delta, excitación y ionización si tienen la suficiente energía.

En la figura 1.12, se muestra la distribución espacial de la energía depositada por los rayos delta alrededor de una traza producida por la partícula en un sólido (estructura cristalina en nuestro caso). A bajas velocidades, las colisiones atómicas se consideran dominantes respecto a la pérdida de energía misma, teniendo como resultado vacancias.

Obtenemos así dos tipos de daño: El resultante de la ionización primaria y excitación debido a la partícula cargada y el daño por el efecto secundario de los rayos delta.

La ionización primaria es la principal responsable del efecto de la traza para cristales y vidrio, pero en polímeros, el efecto de los rayos delta no puede ser despreciado.

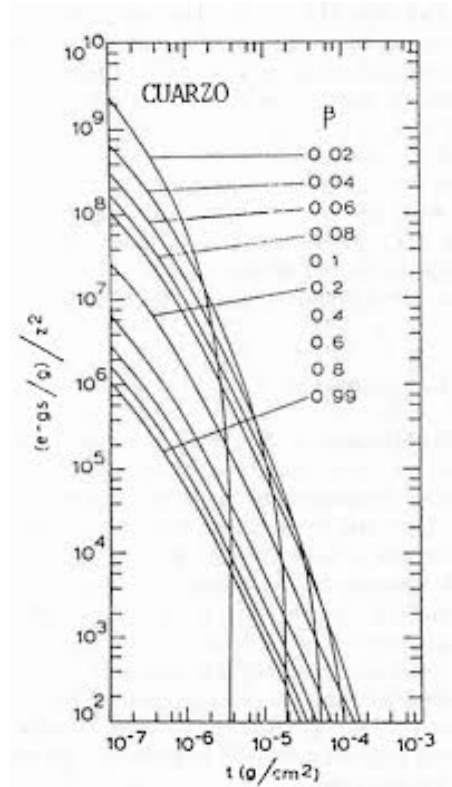


Figura 1.12: Distribución espacial de la energía depositada por los rayos delta alrededor de traza producida por la partícula en un sólido

1.7. Formación geométrica de la traza grabada

La formación de la traza mediante el grabado químico consiste en la disolución química del material a lo largo de la trayectoria de la huella de la partícula V_t y una disolución a ataque general de la superficie removida del material V_g .

En la figura 1.13 se muestran estos parámetros para V_t y V_g constantes. El ataque es preferencial en la trayectoria de la partícula; (D) es el diámetro de la traza medido en la superficie, (L) es la longitud de la traza grabada, (R) es el alcance de la partícula en el material. Así, (L) estará dada por:

$$L = (V_t - V_g)t \quad (1.11)$$

Con t el tiempo de grabado químico.

También se forma un ángulo entre el eje de la trayectoria y la pared del cono, así

$$\sin \theta = \frac{D/2}{[(D/2)^2 + L^2]} \quad (1.12)$$

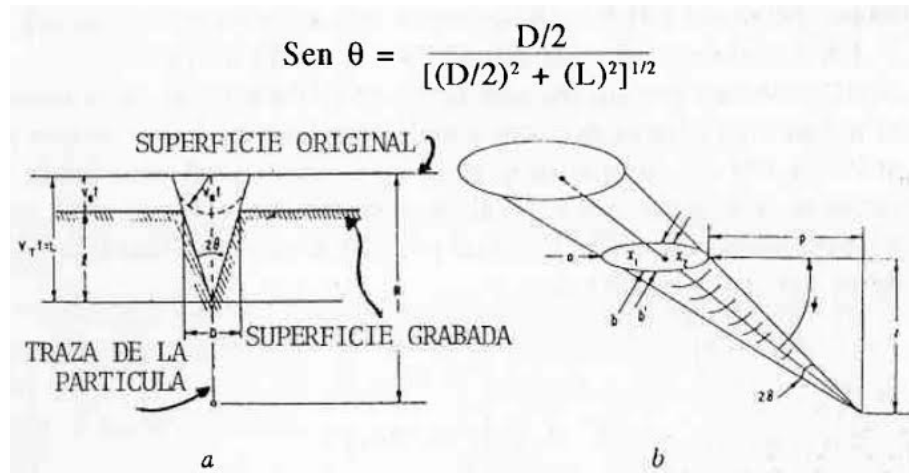


Figura 1.13: Geometría de la traza con V_t y V_g constantes

Entonces, los parámetros de la formación quedan como:

$$\begin{aligned} V_{gt} &= \left(\frac{D}{2}\right)\left(\frac{D}{2}L\right) \\ V_{gt} &= \left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{L^2}{2}\right)\right)^{1/2} \\ V_{gt} &= \left(\frac{D}{2}\right)(\tan \theta + \sec \theta) \\ V_{tt} &= \left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 + (L^2)\right)^{1/2} \left(\frac{D}{2}L + \left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{L^2}{2}\right)\right)\right) \\ V_{tt} &= D \csc \theta (\tan \theta + \sec \theta)^2 \end{aligned} \quad (1.13)$$

Estas ecuaciones solo son válidas para V_g y V_t constantes.

1.8. Geometría de la traza para V_t variable

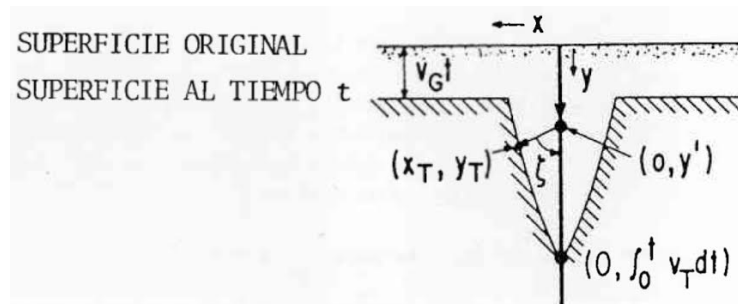


Figura 1.14: Geometría de la traza variando V_t

Si y es un parámetro a lo largo de la formación de la traza y el diámetro D se relaciona con un parámetro x , además de ser dependientes del tiempo de grabado

t, entonces L y D quedan en función de x_t , y_t . El valor de L puede ser calculado por:

$$L = \int_0^L \frac{dy}{V_t(y)} \quad (1.14)$$

A este modelo se le llamó "modelo de la lancha de motor". La figura 1.14 muestra los parámetros de este modelo. Huygens definió la mayoría de los puntos del perfil de la traza con el modelo siguiente:

$$L = \int_0^{y'} \frac{dy}{V_t(y)} + \frac{[(V_t - y')^2 + X_t^2]^{1/2}}{V_g} \quad (1.15)$$

El primer término da el tiempo para que se forme la traza mediante el revelado químico de (0,0) a (0,y) y el segundo término da la deformación de (0,y) hasta (x_t , y_t), entonces:

$$Y_t = y' + \frac{V_g^2}{V_t(y')} \left[t - \int_0^{y'} \frac{dy}{V_t(y)} \right] \quad (1.16)$$

La figura 1.15 es un cálculo de la secuencia de la deformación de trazas en obsi-

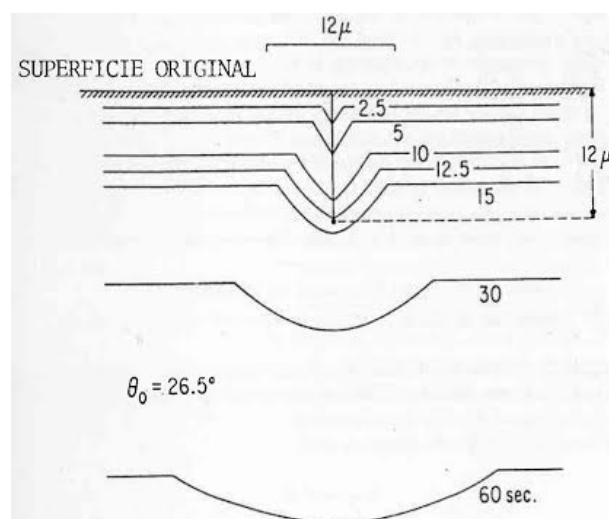


Figura 1.15: Cálculo de la secuencia de la formación de trazas en obsidiana, para fragmentos de fisión. (Fleischer et al. 1969)

diana. Otro parámetro a considerar para el grabado de una traza es el ángulo de incidencia de la traza. En 1972, Fleisher y Hart encontraron experimentalmente dos casos típicos para el valor de la eficiencia en función al ángulo de incidencia. Así se considera la eficiencia (η):

$$\eta = \frac{\text{número de trazas reveladas en la superficie}}{\text{número de trazas que impactaron en la superficie}} \quad (1.17)$$

Caso 1: Sólo consideramos las que presentan un ángulo θ de incidencia constante, entonces $\eta = \cos 2\theta$.

Caso 2: Trazas orientadas de una fuente radioactiva externa y delgada nos da $\eta = 1 - \sin \theta$.

Para polímeros como el CR-39 se logra tener eficiencias hasta de un 90% para partículas incidentes a 90° y condiciones de grabado específicas.

1.9. Conteo y análisis de las trazas formadas

El ángulo de incidencia de la radiación en el material detector es muy importante, pues para ciertos ángulos el detector es ciego a la radiación (Khen et al. 1984/Espinosa et al. 1984) e incluso no es capaz de distinguir la radiación si la exposición de incidencia es aleatoria.

En general, es recomendable obtener la perpendicularidad entre la partícula incidente y el material detector. Esto se puede obtener con el uso de colimadores y máscaras entre el detector y la fuente.

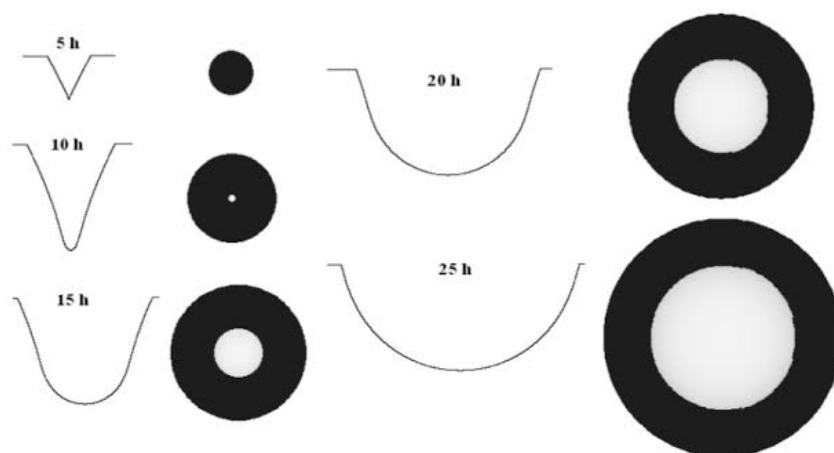


Figura 1.16: Simulación de luz generada para ataques químicos de 5, 10, 15, 20 y 25 de profundidad con programa TRACK-TEST

Al tomar en consideración este ángulo, se observarán solo aquellas con excentricidad mayor a 0.8 para asegurar que es el ángulo de incidencia.

Nikezic y Yu [23] generaron una simulación de luz de cómo se observaría una traza vista desde un microscopio óptico. Cada elemento de la traza y la intensidad de la luz relativa para cada elemento fue calculada. La intensidad de luz viene de elementos separados que son segmentados en números de intensidad dividiendo el rango de no transmisión en el detector (negro total) a transmisión total (o blanco total), dado en 256 intervalos, siendo 0 para el negro y 255 para el blanco.

La figura 1.16 tiene algunos resultados del programa utilizado por Yu denominado TRACK-TEST dado con partículas alfa de 5MeV bajo incidencia normal dando como tiempos de revelado 5, 10, 15, 20 y 25 horas. La cantidad de blancos ayuda a entender el tipo de traza que se debe observar.

1.9.1. Defectos del material a considerar en el análisis

Otro aspecto importante a considerar para el análisis de la traza es el material y sus defectos antes de la exposición a la radiación, como pueden ser efectos térmicos y mecánicos, generados en el ambiente donde este almacenado. Materiales sometidos a esfuerzos mecánicos previos pueden producir cambios en la distribución de las trazas y en el número de trazas de fondo. La figura 1.17(a) muestra un ejemplo de esfuerzo mecánico. También se han observado efectos debidos a la presencia de campos eléctricos que pueden alterar la formación de las trazas grabadas (Cranell

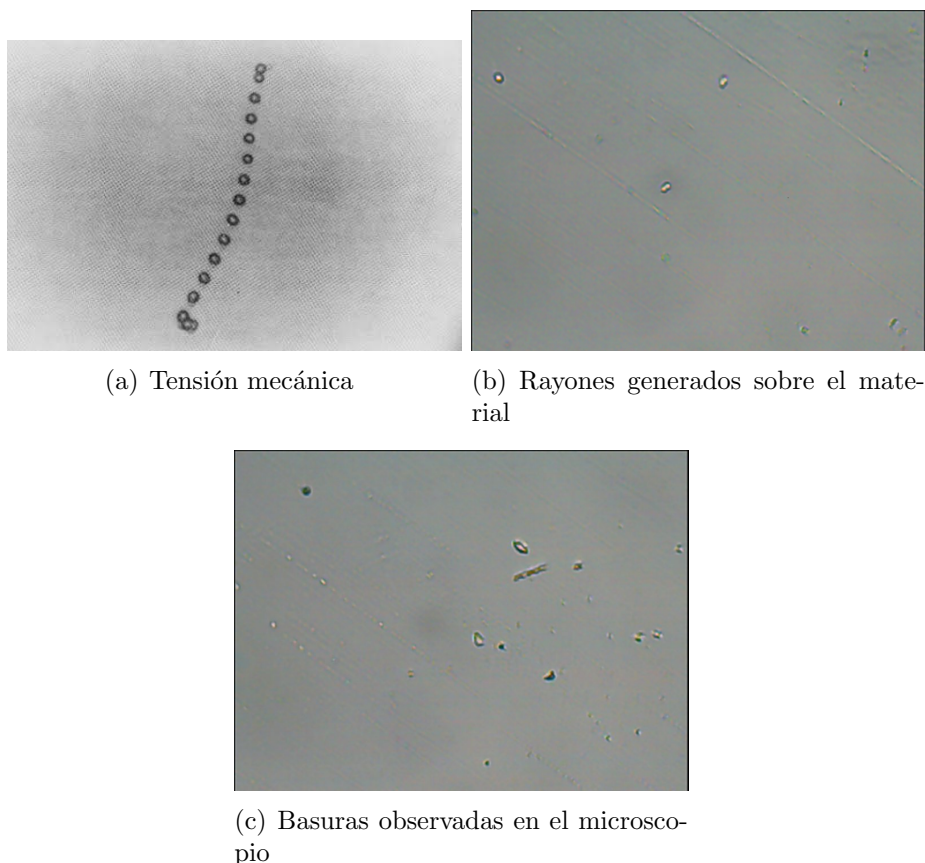


Figura 1.17: Algunos ejemplos de los defectos más clásicos sobre un material

1969 & Blauford 1970).

Otros problemas más básicos son polvo o basura en el momento de su producción que pueden afectar al conteo (1.17(b)), e incluso rayones generados por el ataque químico o por la mala utilización de éste (1.17(c)).

Por esta razón es importante conocer el material y su forma de almacenaje, utilizando un detector muestra (testigo), antes de analizar las trazas.

Por último, las partículas sobrepuestas (overlapping en inglés) no se tomarán en cuenta en el análisis pues no se puede asegurar cuantas trazas pasan en ese punto, e incluso si es algún esfuerzo sobre el material. Estos datos aumentan proporcionalmente a la cantidad de radiación suministrada al detector y el tiempo de ataque químico.

1.10. Tipo de trazas nucleares

Hay varios factores que generan distintos tipos de trazas, diámetros y formas. Estos factores son los que nos ayudan a distinguir entre una traza y otra.

El tipo de radiación que pueden detectar estos materiales son partículas alfa, iones, neutrones y en general partículas cargadas. Las partículas alfa al ser emitidas en el decaimiento del radón o del americio como ejemplo, lleva una energía cinética aproximada de 5 MeV. Con un ataque químico de 6 horas cuando se tienen mas de 50 partículas por campo, se pueden obtener trazas de diámetros entre 3 y 8 micras. En el caso de pocas partículas, puede ser un ataque de hasta 18 horas,

obteniendo así trazas de 10 a 15 micras.

En el caso de la detección de neutrones, como se sabe, se hace uso de las radiaciones (n,α) o (n,p) para su detección y los diámetros de las trazas formadas, que estarán en función de la energía de las mismas. Para fenómenos de fisión, por las altas energías de éstos, las trazas formadas pueden tener entre 20 y 35 micras.

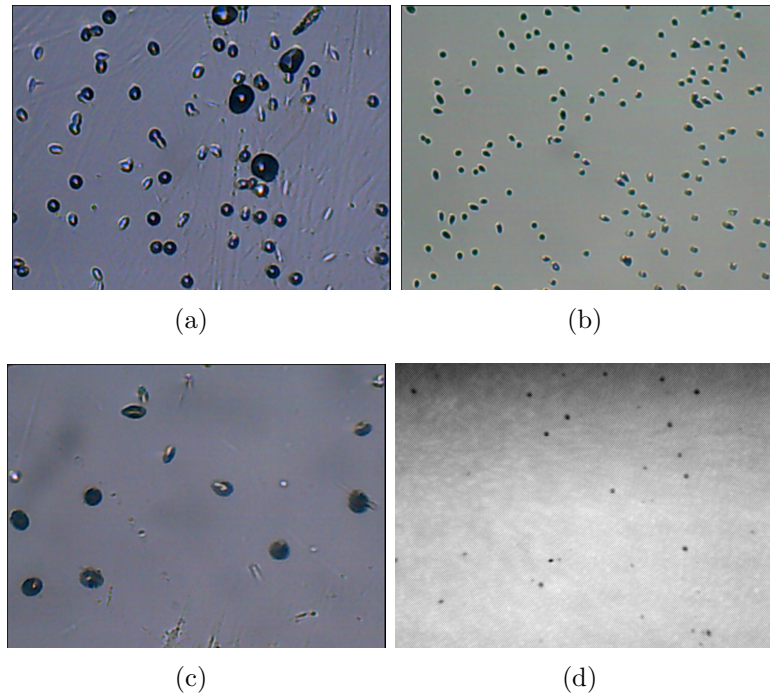


Figura 1.18: Ejemplos de trazas grabadas en CR-39 a distintos tipos de radiación: (a) Fragmentos de fisión, (b) Partículas α de Americio, (c) Radón intramuros, (d) Neutrones usando la reacción (n,α)

La metodología de trazas nucleares en sólidos es una alternativa importante en la detección de partículas cargadas, teniendo características que la favorecen en varias aplicaciones como son:

1. La detección de partículas cargadas en campos mixtos, como $\alpha - \gamma$ o $\alpha - \beta$
2. Se puede variar el tamaño de los detectores dependiendo del uso que se le pretende dar.
3. El proceso es simple y no requiere de instrumentación complicada o sofisticada.
4. El costo es menor que otros métodos de detección convencionales.

Capítulo 2

Digitalización de imágenes

2.1. Conversión de señal luminosa a señal digital

Tradicionalmente la información de salida de los sensores ha sido en forma analógica, esto es mediante escalas continuas y un vector marcador. Para este trabajo, se necesita convertir la señal luminosa dada por el microscopio en señal eléctrica para posteriormente tener una señal digital, la cual se maneja para el conteo y análisis de las trazas formadas.

En consecuencia, esta información debe convertirse en binaria, por lo que cada dato analógico decimal es codificado a una palabra formada por unos y ceros, con el fin de adaptarla a circuitos procesadores y de presentación.

La forma más sencilla para hacer esta conversión es con un convertidor analógico digital (**analogic digital convertor (ADC)** por sus siglas en ingles). Este dispositivo toma la información contenida en una señal analógica y la convierte a una equivalente de forma digital.

Para dar un ejemplo práctico de como funciona, podemos suponer una señal de pulsos en el rango de 0 a 1 V como entrada que tiene la capacidad de convertirse a números digitales de 0 a 2^n con n igual a 3. De esta forma el valor 0 volts tendrá un valor binario de 1 mientras que el valor 1V tendrá un valor 2^3 convertido a binario como 1000 generando particiones que facilitan la lectura de la señal. Con esta información digital, dada en valores binarios, puede ser manipulada por su compatibilidad con los procesadores actuales. Es claro entre mayor sea n, mayor será la resolución del sistema.

La resolución del ADC depende del rango de la digitalización. Si los números de 0 a 1000 generan una señal de 0 a 10,000, una digitalización más fina otorga mejor resolución.

Electrónicamente, muchos métodos son utilizados para esta conversión. El más simple de ellos es el conocido como el método de rampa o método Wilkinson. En ésta técnica, la señal de entrada es usada para cargar un capacitor, este a su vez, empieza a descargarse en un rango constante. Al inicio de la descarga una escala de pulsos con frecuencia constante inicia a contar. Cuando el capacitor esta completamente descargado, la escala se detiene dando el último valor como resultado de la señal de voltaje, el cual será utilizado para convertirse en binario. Este método se ilustra en la figura 2.1.

Matemáticamente, es el equivalente a multiplicar la señal analógica por una secuencia de impulsos de periodo constante. Como resultado se obtiene un tren de

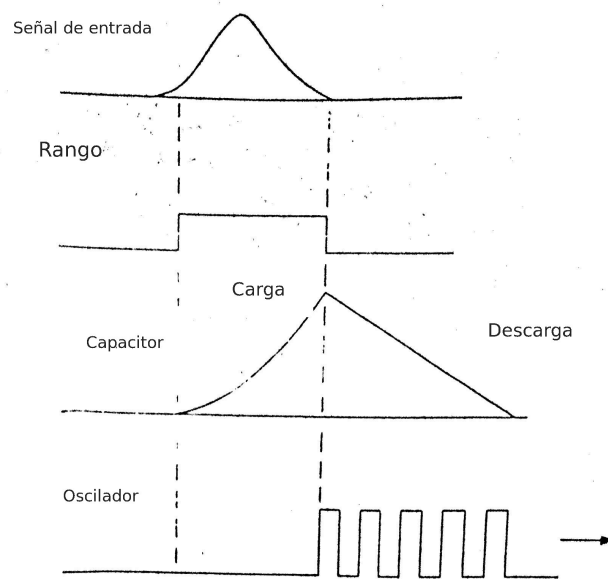


Figura 2.1: Diagrama representativo del método Wilkinson

impulsos con amplitudes limitadas por la envolvente de la señal analógica.

2.2. Manejo de la señal digital

Al tener una fotografía digital se necesita saber en qué formatos puede obtenerla y qué detalles son importantes sobre esta para tener un mejor aprovechamiento para el sistema de conteo y análisis.

El procesamiento digital de imágenes tiene por objetivo dos aspectos importantes para su uso: mejorar la información de una imagen y la interpretación que se le puede dar a dicha información al ser procesada dentro de un sistema de análisis por computadora.

Una imagen digital puede considerarse como una matriz cuyos índices de fila y columna identifican un punto de la imagen y el valor del correspondiente elemento de la matriz indica el nivel de color (tonos de gris) que tiene ese punto. A cada uno de estos puntos se le denomina pixel.

2.2.1. Resolución

La resolución es la capacidad de distinguir con mayor cuidado los detalles fundamentales de la señal digital obtenida. Por lo general, la frecuencia espacial a la cual se realiza la muestra de una imagen digital (la frecuencia de muestreo) es un buen indicador de la resolución. Este es el motivo de porque los puntos por pulgada (**dots per inch (dpi)**) nos da la resolución de la imagen.

2.2.2. Dimensiones de píxel

Son las medidas horizontales y verticales de una imagen, expresadas en píxeles. Las dimensiones de píxel se pueden determinar multiplicando tanto el ancho

como la altura del dpi. Una cámara digital también tendrá dimensiones de píxel, expresadas como la cantidad de píxeles en forma vertical y en forma horizontal que definen su resolución.

2.2.3. Profundidad de bits

Es determinada por la cantidad de bits (**Binary Digit (bit)**) utilizados para definir cada píxel. Cuanto mayor sea la profundidad de bits, tanto mayor será la cantidad de tonos (escala de grises o color) que puedan ser representados. Las imágenes digitales se pueden producir en blanco y negro (en forma bitonal), a escalas de grises o a color. Una imagen a escala de grises está compuesta por píxeles representados por múltiples bits de información, que típicamente varían entre 2 a 8 bits o más.

2.2.4. Rango dinámico

Es el rango de diferencia tonal entre la parte más clara y la más oscura de una imagen. Cuanto más alto sea el rango dinámico, se pueden potencialmente representar más matices, a pesar de que el rango dinámico no se correlaciona en forma automática con la cantidad de tonos reproducidos.

2.2.5. Tipos de formato(JPG o RAW)

en bruto (RAW) es un formato que utilizan las cámaras **Digital Single Lens Reflex (DSLR)** (Cámara réflex Digital) para almacenar las fotografías. Este archivo es más efectivo porque no viene compactado como el caso JPG. En el formato **Joint Photographic Experts Group (JPG)** se pierde información sobre detalles de la fotografía para que tenga mejor aprovechamiento la tarjeta de memoria, pero el fichero RAW es el archivo tal cual entró al sensor fotográfico, por lo que tiene mayor nitidez. En nuestro caso, por la forma en que se construyo el contador automático, se tendrá que utilizar el fichero JPG ya que aún no podemos implementar el fichero RAW por la cantidad de bits que ocupa.

2.2.6. Procesamiento de la imagen

Hay dos técnicas en el procesamiento digital de las imágenes, que son el dominio espacial y el dominio de la frecuencia.

El dominio espacial se refiere al propio plano de la imagen. En este tipo de técnica se manipulan directamente los píxeles de la imagen como un operador sobre la matriz para modificarla., Los operadores mas utilizados son los siguientes:

1. Identidad: Obtiene una imagen idéntica a la anterior
2. Inverso: Genera una imagen con colores invertidos (0 a 255 son los valores de cada tono de gris)
3. Brillo: Se logra sumando o restando blancos a los valores de gris
4. Binarizado: Formación de una imagen blanco con negro.

5. Histograma: Gráfica los niveles de gris contra la frecuencia dentro de la imagen
6. Ecuilizado: Permite modificar el contraste alterando el brillo a cada nivel de gris por separado.

La segunda técnica llamada dominio de frecuencia esta enfocada en el teorema de la convolución. Una imagen formada que puede verse como una matriz es transformada por un operador invariante a la posición. Estas técnicas no serán tratadas en esta tesis ya que no se utilizaron para este proyecto.

2.3. Óptica Digital

Las imágenes digitales son fotos electrónicas tomadas de una escena o escaneadas de documentos [25]. Actualmente las cámaras fotográficas o dispositivos digitalizadores ya tienen incorporado el sistema de digitalización de imágenes. Los elementos básicos que tiene son:

1. OBJETIVO: Donde se dirigen los rayos de luz hacia el sensor digital
2. DIAFRAGMA: Limita el tamaño de la entrada de los rayos de luz
3. OBTURADOR: Controla el tiempo que el sensor está expuesto a la luz
4. VISOR: Permite componer la escena a través de una pantalla incorporada en la cámara digital
5. DISPARADOR: Para elegir el momento de exposición
6. BATERÍA: Que alimento la circuitería electrónica durante el proceso de obtención de imágenes
7. FOTÓMETRO: Mide la luz proyectada a través del objetivo para que la cámara pueda calcular la exposición correcta

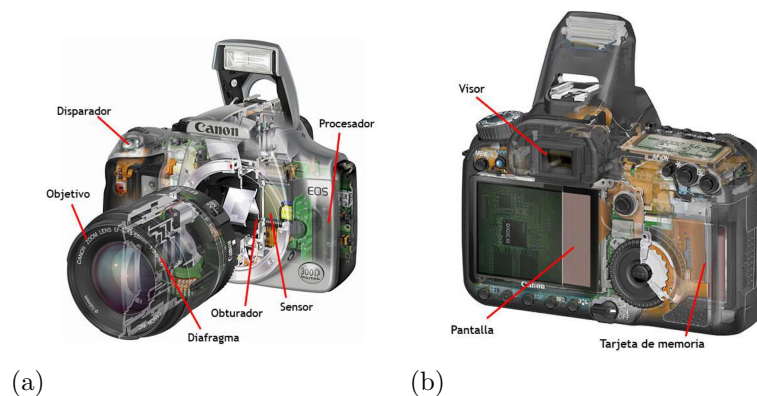


Figura 2.2: Partes básicas de una cámara digital

Para poder realizar una buena imagen se necesitan de varios aspectos a considerar en la cámara antes, durante y después de tomar una fotografía.

2.4. Operación de la cámara Digital

2.4.1. Apertura del diafragma

Si son objetivos con distancia focal fija, la apertura máxima también es fija, y para zooms donde la apertura máxima puede cambiar según lo que varía la distancia focal.

2.4.2. Distancia focal

La distancia focal de una lente es la distancia entre el centro óptico de la lente y el foco donde se concentran todos los rayos de luz. Los objetivos de las cámaras tienen una distancia focal fija o variable que comúnmente son llamados zooms. La distancia focal no afecta únicamente al acercamiento, también modifica la perspectiva de la foto.

2.4.3. Perspectiva

Al modificar la distancia focal modificamos el campo de visión. Así al aumentarlo nos acercamos y viceversa. Esto trae consigo que se modifique la proporción que los objetos ocupan en la foto. El efecto es como si el fondo se acercara. Esta función es la que nos permite distinguir entre las dos caras de un plástico al enfocar una traza.

2.4.4. Tiempo de exposición

El obturador es una cortinilla que se abre en el momento de disparar y limita el tiempo que el rayo de luz penetra en la cámara y alcanza el sensor digital. El obturador es un mecanismo muy preciso y rápido que permite limitar la exposición a tiempos muy pequeños. En el caso de las trazas, el tiempo no nos afecta en gran medida ya que son objetos estáticos.

2.4.5. Sensor y sensibilidad

El sensor de las cámaras fotográficas está compuesto por millones de pequeños semiconductores de silicio, los cuales captan los fotones (A mayor intensidad de luz, más carga eléctrica recibirá de ellos). Estos fotones son capturados por el sensor, los cuales se transformarán en una serie de valores digitales creando un pixel. Por lo tanto cada célula que desprenda el sensor de imagen se corresponde a un píxel o punto. El sensor hace las veces de película en la fotografía digital. El resultado del sensor, ya traducidos en formato binario, se guarda en las tarjetas de memoria en forma de ficheros de imagen.

2.4.6. Sensibilidad del sensor

Los sensores de las cámaras pueden trabajar a diferentes sensibilidades. De este modo, a mayor sensibilidad, mayor cantidad de luz son capaces de captar. Este proceso se mide con el estándar ([International Standardization Organization \(ISO\)](#)), pero usar una mayor sensibilidad afecta otros factores generando lo que

llamaremos ruido de foto.

Los sensores más utilizados en el mercado son CCD y CMOS.

El dispositivo de carga acoplada (**Charge-Coupled Device (CCD)**) es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados. Cada uno de ellos puede transferir su carga eléctrica a uno o varios de los condensadores que estén a su lado en el circuito impreso.

Por su parte, el semiconductor complementario de óxido metálico (**Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS)**), es una de las familias lógicas empleadas en la fabricación de circuitos integrados. Está formado de numerosos fotosensores, uno para cada píxel, que producen una corriente eléctrica que varía en función de la intensidad de la luz recibida. A diferencia del CCD se incorpora un amplificador de señal eléctrica, por lo que no es tan utilizado ya que tiene un elevado ruido de patrón fijo.

En el microscopio utilizado en este trabajo de tesis se utiliza un sensor tipo CMOS con sistema aceptado por la Comisión Nacional de Sistema de Televisión (**National Television System Committee (NTSC)**) integrado al ocular digital del microscopio.

2.4.7. Enfoque óptico

Hablando en términos de óptica podemos decir que enfocar es hacer coincidir los rayos de luz que inciden en la cámara en un punto llamado foco que a su vez coincidirá con el sensor de la cámara. Hay una distancia mínima de enfoque por debajo de la cual la cámara no es capaz de enfocar.

Se recomienda para el tipo de plásticos **allyl diglicol carbonate Columnia Resin no.39 (CR-39)** que al enfocar las caras de éste, se utilice alguna marca particular para asegurar de que lado se radió el plástico.

En este trabajo de tesis las cámaras utilizadas fueron una cámara réflex Cannon la cual esta incorporada a un microscopio Zeiss que da una amplia resolución, pero el trabajo fue mayormente concentrado en un objetivo digital incluido al microscopio quasar el cual se recomienda ampliamente por su bajo costo. Es importante entender que cualquier cámara SLR(Réflex) como la antes mencionada tiene todas estas características, aunque varios de éstos valores no pueden ser modificados manualmente. Para el caso del objetivo tiene los mismos principios pero los valores son modificables en el software utilizado para su uso. La parte más importante es lograr un buen enfoque para obtener la mayor cantidad de trazas visibles posibles en el campo.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Detección de las trazas en sólidos

De entre los diversos métodos de detección de radiación ionizante, el método de detección de radiación ionizante, denominado "detección de trazas en sólidos (DTS)", se caracteriza por su simplicidad y por no necesitar de grandes recursos tecnológicos para su disponibilidad [10].

El método de DTS, se puede resumir en tres pasos:

- Exposición a la radiación ionizante
- Revelado de la traza
- Caracterización y lectura de la traza

3.1.1. Exposición a la radiación ionizante

Los DTS solo son sensibles a ciertos tipos de radiación específicos (partículas alfa, protones, iones pesados y fragmentos de fisión).

El primer paso entonces consiste en exponer el material detector a la radiación ionizante. Al exponer el material detector a la radiación ionizante se crea la traza nuclear en el material y puede permanecer latente por cientos o miles de años hasta que sea revelada mediante un ataque químico.

Revelado químico de la traza

Después de ser expuesto un material específico a la radiación ionizante, el material deberá ser sometido a un ataque químico de desgaste superficial, presentándose un ataque preferencial en las zonas donde incidió la radiación ionizante, formándose un cono, al cual se le suele llamar traza grabada, a lo largo de la trayectoria de la partícula incidente.

En general, un recipiente con la solución y un baño de agua a temperatura controlada es suficiente para este proceso.

Caracterización y lectura de la traza

Finalmente, después del revelado químico, se obtiene una traza o huella de la radiación recibida, a nivel microscópico entre 5 y 100 μm que deberá ser leída y

caracterizada. El procedimiento más directo es mediante el uso de un microscopio óptico. De esta forma, si contamos el número de trazas grabadas por unidad de área, este valor nos dará una relación del número de partículas incidentes, y el tamaño del diámetro de la traza nos indicará la energía de la partícula.

3.2. Métodos de conteo y su evolución

El uso del método de trazas nucleares en sólidos tiene una restricción importante que es la evaluación de las trazas en el detector. Existen diferentes técnicas de conteo según se trate de detectores gruesos o delgados. Se pueden tener sistemas de conteo semiautomáticos, automáticos y completamente automatizados, dependiendo de la aplicación, recursos y cantidad de lecturas a realizar. En la tabla 3.1

Tabla 3.1: Diferentes métodos de conteo empleados. estos se pueden dividir en generaciones en base a la tecnología utilizada.

PRIMERA GENERACIÓN	SEGUNDA GENERACIÓN	TERCERA GENERACIÓN	CUARTA GENERACIÓN
Microscopio óptico	Análisis de imagen	Otoelectrónica	Procesamiento de imágenes
Microscopio electrónico	Vidimet	Contador de bacterias	Digitalización más microcomputadora
Cuantímetro	Interferometría láser	Pseudocoloración	Digitalización imágenes más microcomputadora
Micro- densitómetro	Difractor de Fraunhofer	Centellador	
Vidición	Absorción y Dispersión de luz	Análisis de imágenes	
		Inovión	

se pueden observar los primeros sistemas desarrollados mientras que en la tabla 3.2 se ejemplifican algunos de estos sistemas con sus características básicas. Para este proyecto se utilizó la cuarta generación como base.

Al inicio de la generación de las trazas nucleares en sólidos se utilizaban detectores más delgados, los cuales al recibir el ataque químico se perforaba el material. Se recubría un lado del detector con aluminio [15]. Al ser expuesto, el aluminio se disolvía formando un hoyo en la parte opaca de la película volviendo visible la traza.

Una versión más reciente era presionar sobre el detector un líquido teñidor que al pasar a través de los hoyos, dejaba una marca en un papel filtro del otro lado del detector, dejándolas a simple vista.

A través de los años y con las nuevas tecnologías se han desarrollado una gran variedad de métodos siendo hasta hace poco un cuello de botella para la utilización de estos detectores, pues el conteo requería de métodos tecnológicos complejos y costosos.

Tabla 3.2: Características de algunos métodos de conteo (OP.=Optimización, M=Manual, S= Semiautomático, A=Automático,LIM. INF.= Límite Inferior, LIM. SUP.= Límite Superior, PREC.= Precisión, VEL. de CONT.= Velocidad de conteo)

SISTEMA	OP.	LIM. INF. (Tr/cm ²)	LIM. SUP. (Tr/cm ²)	PREC.	VEL. DE CONT.
Microscopio Óptico	M	Fondo	10 ⁵	1 %	—
Lector de Microfichas	M	Fondo	10 ⁴	1 %	—
Cuantímetro	S	1600	5x10 ⁴	2.5 %	min/cm ²
Contador de Chispa	S	Fondo	4x10 ³	10 %	min/cm ²
Barrido óptico de Trazas	S	Fondo	10 ⁵	1 %	hrs/cm ²
Centelleo	S	57	1530	5 %	min/cm ²
Vitatrón	S	Fondo	2x10 ⁴	1 %	min/cm ²
Vidimet	S	Fondo	10 ⁵	2 %	—
Microscopio con microcompu.	A	Fondo	3x10 ⁴	1 %	seg/cm ²
Microscopio acoplado a cámara digitalizadora	A	Fondo	3x10 ⁶	1 %	seg/cm ²

Al usar materiales mas gruesos, entre las 500 y 600 micras de espesor, se recomendó como método más eficaz el uso de un microscopio óptico, una cámara de video y un monitor. Con éste método el problema era el tiempo desperdiciado en el conteo manual.

Años después se desarrolló un contador semiautomático mediante un contador de colonias de bacterias, haciendo así el conteo de trazas y la identificación de los diámetros al mismo tiempo (Griffith et al. 1984 [18]). (figura 3.1).

Con la idea de automatizar el conteo, se utilizó un dosímetro asociado a una computadora personal, teniendo por primera vez datos digitalizados. El sistema se muestra en la figura 3.2 (Espinosa et al. 1986 [9]).

En la conversión de señal analógica a digital y el uso de una supercomputadora se desarrollo un sistema con el grupo de investigación científica de IBM para la realización de la digitalización de imágenes procesados en una computadora. A este sistema se le llamó Inovión.

Este suceso dio como resultado un sistema de conteo e imágenes por tonos de gris utilizado en el Instituto de Física de la UNAM.(figura 3.3), generando así la investigación y calibración del sistema (Viquez et al. 1991 [30]).

Todos los sistemas de conteo automáticos eran costosos o complejos, lo cual se simplificó gracias a las tarjetas digitalizadoras.Solo algunas firmas comerciales tiene sistemas de conteo automatizados, pero es recomendable para investigación utilizar el conteo de digitalización.

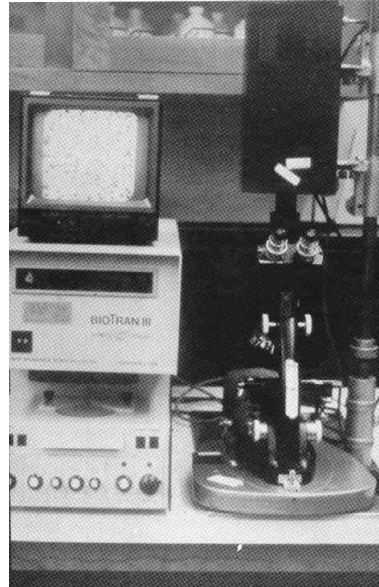


Figura 3.1: Sistema de conteo de trazas mediante un contador de colonias de bacterias (LLNL-USA)

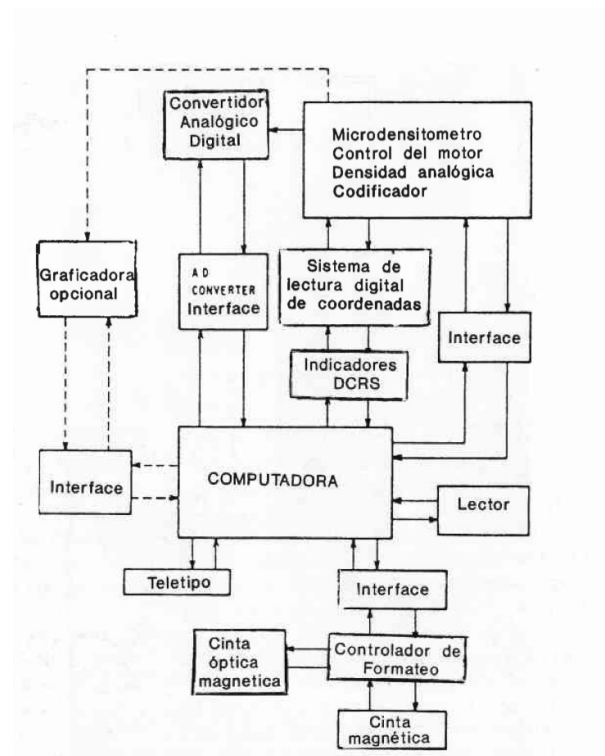


Figura 3.2: Sistema de conteo basado en un microdensitómetro

En el presente, el problema del conteo y análisis de trazas nucleares ha sido casi resuelto, y muchos sistemas han sido desarrollados y comercializados, por lo que el nuevo desafío es la optimización del sistema manteniendo costos bajos.

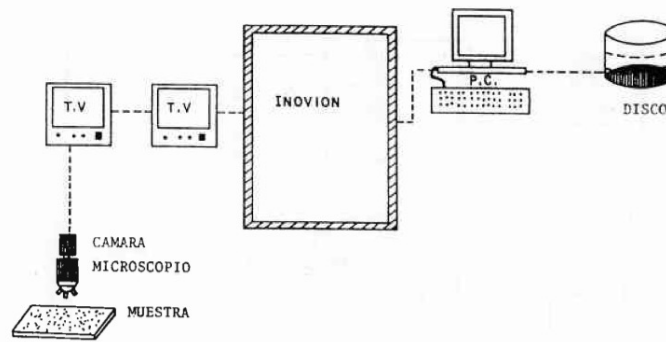


Figura 3.3: Sistema de conteo mediante el uso de Inovión

3.3. Sistema DIAS (Digital Image Analysis)

En el IFUNAM, para el proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría en el departamento de física experimental, se instaló un sistema de digitalización de imágenes (método DIAS) para el conteo y análisis de trazas nucleares [6],[17]. Este sistema presenta varias ventajas en comparación con sistemas similares.

El sistema funciona de la siguiente manera: un microscopio óptico es usado para aumentar las trazas, y una cámara digital a color (**Charge-Coupled Device (CCD)**) que convierte la señal analógica a eléctrica. La información analógica es montada a la tarjeta electrónica que digitaliza la señal. Para este sistema se utilizó una tarjeta electrónica Grabber Mylex 33-ZXD, para que pudiera soportar un software de análisis de imagen denominado MOCHA(Jandel). La ventaja que ofrecía este cambio es poner un monitor VGA para poder ver la magnificación de las trazas en tiempo real antes de analizarlas y poder procesar la información necesaria (figura 3.4).



Figura 3.4: Sistema DIAS utilizado en el proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría, IFUNAM

3.4. Sistema CADIS (Counting and Analysis Digital Image System)

El método que se propone en esta tesis es el conteo automático basado en digitalización de imágenes.

Aunque existen varios de estos sistemas en el mercado, no son tan accesibles para cualquier investigador, por lo que proponemos un sistema más simple en utilización y espacio.

Se evaluaron varias características para observar que tan útil y práctico es en comparación a los sistemas antes descritos. Se toman como limitaciones los siguientes casos:

1. Densidad de trazas mínima observable de 1 traza/cm²
2. Densidad de trazas máxima que puede observar el sistema de 500,000 trazas/cm² considerando que el sistema pueda eliminar la superposición de trazas
3. Confiabilidad del conteo de al menos 90 %
4. Diámetro mínimo de 3 micras
5. Diámetro máximo de 15 micras
6. Reproducibilidad
7. Magnificaciones de al menos 200X en que puede identificar una traza.
8. Cantidad mínima de campos requeridos para que el sistema sea eficiente

Se realizaron varios experimentos para poner a prueba estas propuestas e identificar las limitaciones del contador, para saber si realmente puede ser útil ante un conteo real.

En el capítulo de resultados se puede observar la diferencia entre las limitaciones que se requieren para que sea un sistema competitivo con lo logrado en el proyecto. En el capítulo de la instrumentación se dará detalle de los complementos que utiliza el sistema para su uso.

Capítulo 4

Instrumentación

4.1. Hardware

El sistema del contador se compone de una computadora de escritorio o laptop con sistema operativo Windows XP o posterior, ubuntu 4.1 o posterior. Se utilizó un microscopio quasar para la simplificación ya que la digitalización de la imagen es directa de la cámara integrada al microscopio, aunque se pueden utilizar distintos microscopios para mejorar la resolución. El diagrama del hardware se puede observar en la imagen [4.1](#).

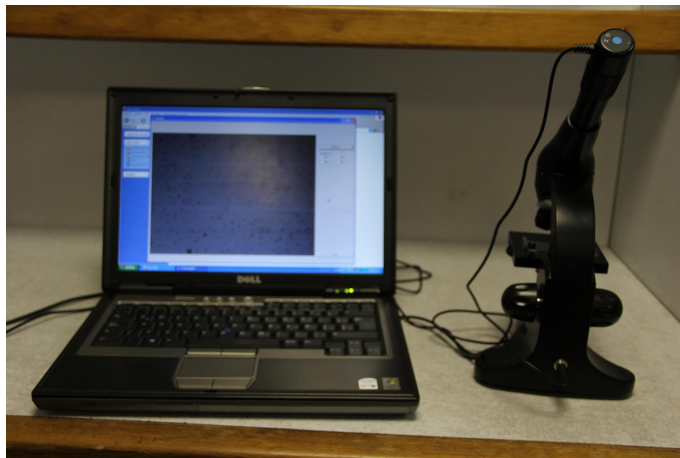


Figura 4.1: diagrama del sistema CADIS con microscopio QUASAR utilizado en el proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría, IFUNAM

También se utilizó en algunos aspectos el microscopio ZEISS en el cual tiene incluida la cámara cannon como objetivo digitalizador. Este microscopio tiene la ventaja de tener mayor resolución pero por ello tiene un costo más elevado. La figura [4.2](#) nos muestra la forma de utilización.

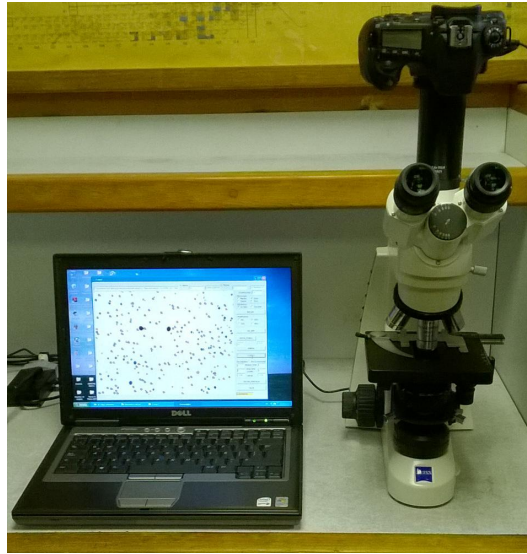


Figura 4.2: Sistema CADIS con microscopio ZEISS utilizado en el proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría, IFUNAM

4.2. Especificaciones de los microscopios

4.2.1. Microscopio óptico escolar

Cuerpo real metálico con 3 objetivos 100 % cristal, luz propia. Un excelente apoyo para observaciones simples.

- Magnificaciones comunes: 200x, 400x y 1000x
- Ocular y 3 objetivos acromáticos
- Platina y cuerpo de metal
- Espejo y luz artificial

4.2.2. Especificaciones Microscopio quasar

El microscopio QUASAR con ocular USB incluido puede capturar fotos y video en tiempo real a Color y directamente a la PC, único con Software incluido, ideal para observaciones en grupo o simplemente para digitalizar cualquier imagen. Incluye 2 oculares ópticos y poderoso lente BARlow 3x para uso normal si en ocular electrónico, con tres objetivos de campo amplio que permite magnificaciones reales hasta 1600x. Carrusel de filtros y lámpara superior para observaciones difíciles como objetos mas gruesos u opacos.

- Cabeza inclinada a 45 grados y giratoria a 360 grados
- 2 pares de oculares Wide Field Acromáticos de 10x y 20x.
- Magnificación de 40x, 100x, 200x, y 400x
- Ocular electrónico USB .35MP compatible con Windows 8 y Mac
- 3 objetivos con cristal acromático modificado 4x, 10x y 40x

- Lámpara superior con control de intensidad para superficies
- Lámpara inferior con control de intensidad variable
- Carrusel integrado de 5 filtros con clip de parada
- Elevador mecánico con piñón y cremallera
- Platina Holder para movimientos X y Y
- Cuerpo metálico robusto y estativo
- Eliminador para tomacorriente y opción a baterías
- Lente Barlow para 1600x
- dimensiones 28x15x16 cm.

4.2.3. Especificaciones microscopio ZEISS

El microscopio ZEISS es un instrumento binocular de cuatro objetivos con iluminación modular. La cabeza del microscopio tipo Seidentopf permite un rápido ajuste a la distancia interpupilar usando un movimiento de vaivén intuitiva, permitiendo giros de hasta 360°. Tiene un amplio rango de magnificación, y un sistema óptico de corrección infinita de color, lo que provee de un poder de análisis para muestras geológicas, microbios, patógenos y más. Los objetivos son acromáticos parfocales para minimizar las distorsiones de imagen y proporcionar un mayor contraste. Además, cuenta con controles de enfoque coaxial dual de baja posición, para ajuste fino en 0.5mm por rotación.

Sistema óptico

- Diseño binocular Seidentopf
- Binocular con puntero 10x
- sistema optico de corrección de luz infinito
- Revólver de 4 objetivos inclinado
- objetivos con magnificación 100x, 200x, 400x y 1000x
- objetivos acromáticos de 10x, 20x, 40x, y 100x
- Objetivos parafocales con 45mm de distancia

Iluminación

- Iluminación óptica modular
- sistema de luz fluorescente reflejada
- luz halógena de 30W
- luz de LED cálido de 3200K
- Regulador de intensidad montado en la base

Enfoque

- Enfoque fino y grueso coaxial
- Operador de enfoque derecha/izquierda de baja posición
- Unidad de enfoque fino a 0.5 mm por rotación
- Unidad de enfoque grueso a 45 mm por rotación
- Rango recorrido total de 15mm

4.3. Software

Ya que se ha armado todo el hardware es importante entender el funcionamiento general del sistema en sí para su utilización. Se utilizaron dos productos de software para la realización de este proyecto. En primer lugar se necesita la instalación del software que controla la cámara de video del microscopio quasar o cualquier otro.

En segundo lugar tenemos propiamente al programa de conteo automático. El programa de conteo fue diseñado por el Dr. Enrique Cabrera Bravo y el Dr. Guillermo Espinosa García, investigadores del Instituto de Física de la UNAM teniendo los derechos de autor correspondientes por el [Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial \(IMPI\)](#).

El diagrama de flujo del funcionamiento del sistema se muestra en la figura 4.3. Quedando así conformada la instrumentación con últimos adelantos tecnológicos, los cuales fueron desarrollados en el proyecto PAD-IFUNAM.

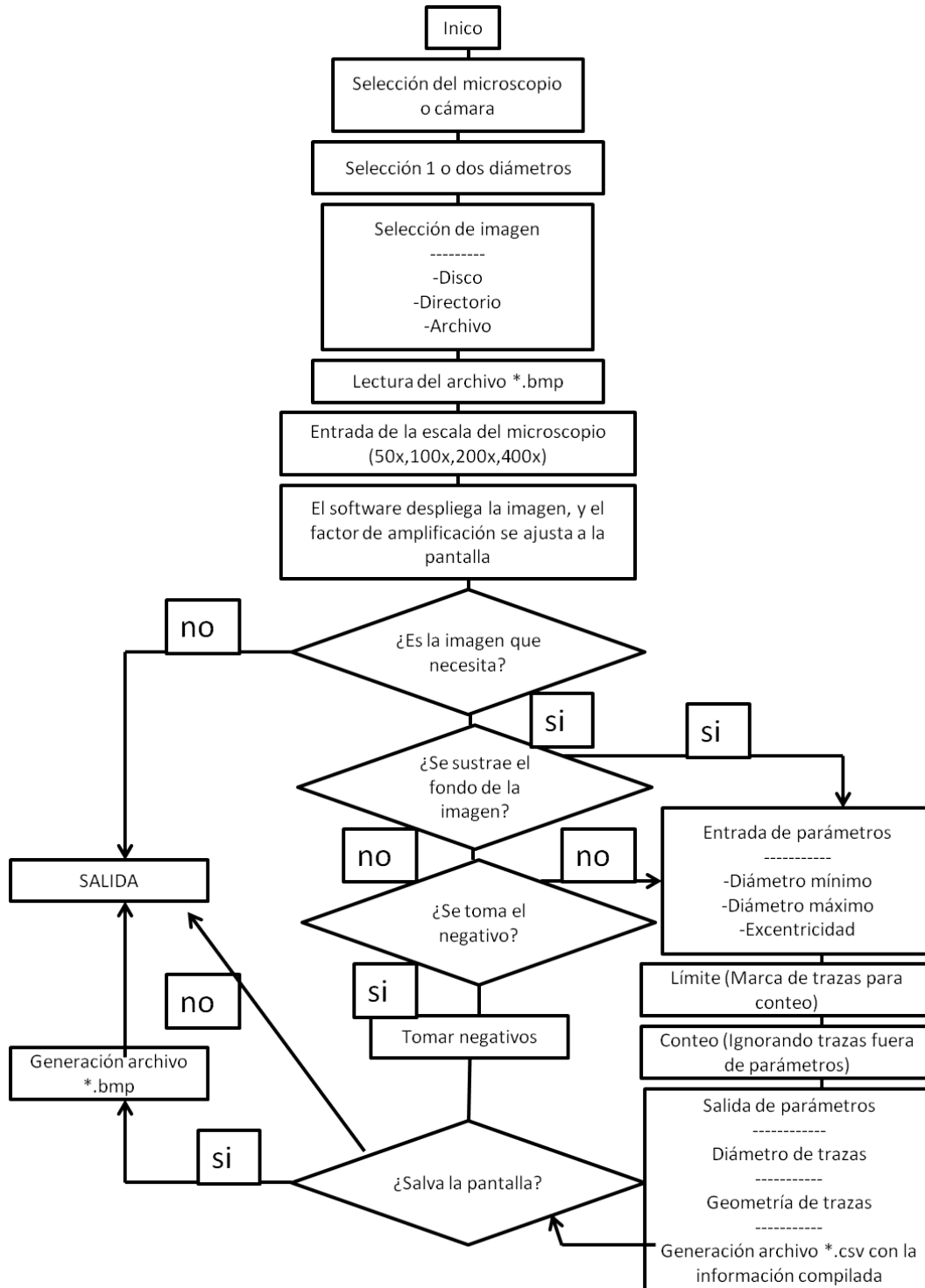


Figura 4.3: Diagrama de flujo del funcionamiento básico del contador digital

Capítulo 5

Operación del sistema y Resultados

Se realizaron tres experimentos básicos los cuales ayudaron a observar el comportamiento del sistema(estabilidad), la confiabilidad o reproducción y la incertidumbre en la operación de éste para el conteo y análisis, tema principal de este trabajo, considerando que este sistema será de uso comercial.

5.1. Método de uso del programa de conteo

El método a seguir para el análisis es el siguiente:

1. Al tener el detector plástico con trazas formadas que se desea analizar, se toma una fotografía del campo a observar y se guarda en la dirección que se designe de los directorios de la computadora.(En el apéndice A se da detalle del manual de uso del software para la cámara digital del microscopio quasar)
2. Se inserta el disco o usb donde contenga el programa de Conteo Digital a su computadora personal
3. Para tener el programa dentro del sistema y evitar usar el usb se puede copiar toda la carpeta tal cual fue otorgada a la carpeta de interés dentro del ordenador
4. Se abre la carpeta denominada ” ConteoDigital” (figura 5.1)

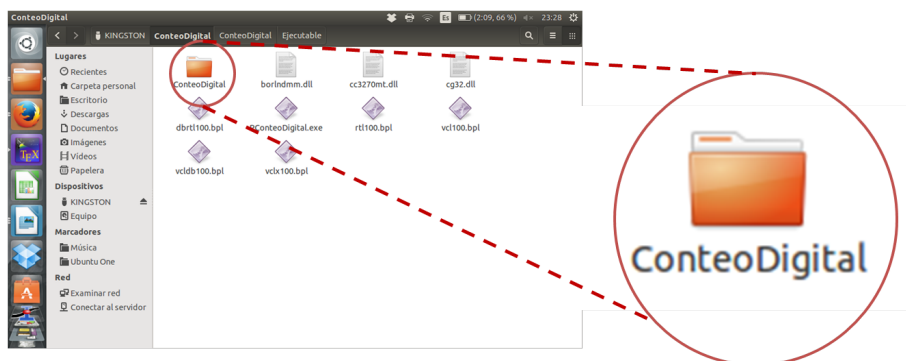


Figura 5.1: Carpeta de Conteo Digital

5. Dentro de ésta, se encuentra una carpeta llamada "Ejecutable" (figura 5.2)

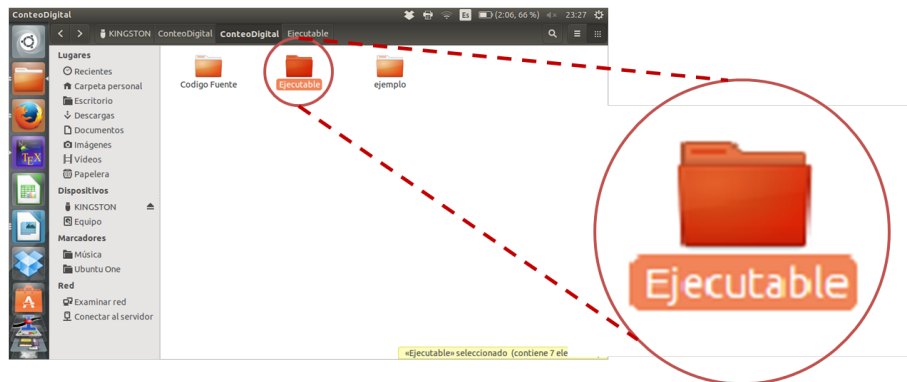


Figura 5.2: Carpeta "Ejecutable"

6. Se identifica el ícono en forma de edificio azul llamado "Contador digital" y se presiona. (Para el sistema ubuntu solo aparece un rombo morado como el que se muestra en la figura 5.3).

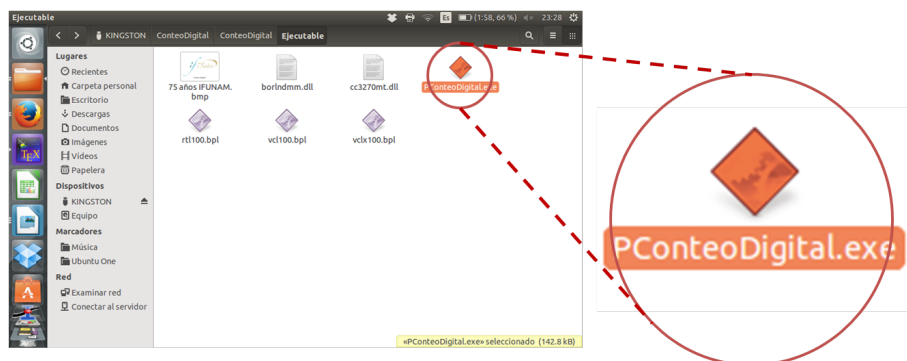


Figura 5.3: Icono del "ConteoDigital"

7. Se indica que microscopio o dispositivo digitalizador es el que desea utilizar en la parte superior derecha de la pantalla nueva como muestra la figura 5.4. (En este trabajo el contador digital fue ajustado a los microscopios quasar, zeiss y una cámara fotográfica específica. Si se desea cambiar estos parámetros en el futuro dependerá del microscopio que se utilice). También se debe indicar si se tendrán trazas de diferentes diámetros o no. Por ultimo presione el botón iniciar.

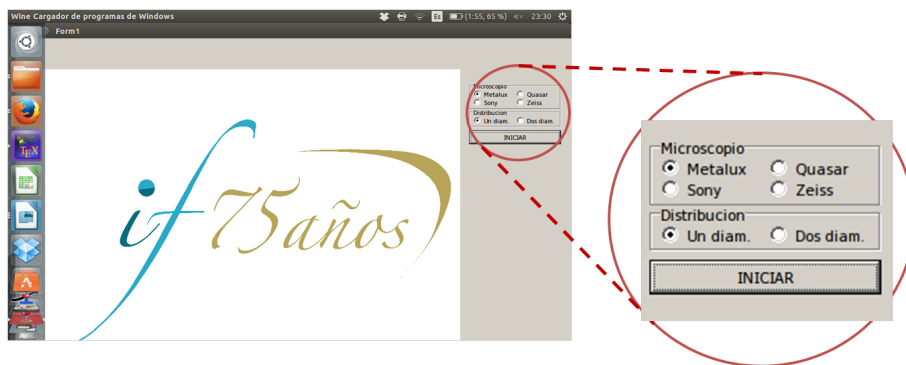


Figura 5.4: Selección de microscopio

8. Se entra a la carpeta donde se guardo la imagen que se requiere contar. En la parte superior de la pantalla emergente se puede cambiar de carpetas o sectores y en la parte derecha verá los archivos dentro de esa carpeta (fig 5.5). **NOTA IMPORTANTE:** El Contador Digital solo le permitirá leer imágenes BMP (mapa de bits o **Bits Map (BMP)**) a 24 bits.

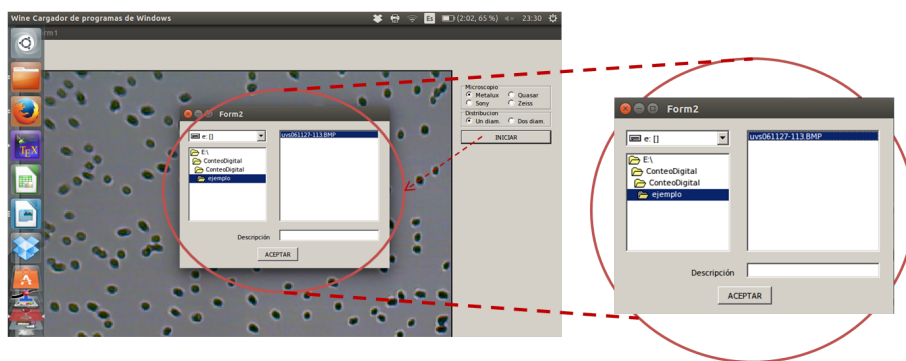


Figura 5.5: Selección de archivo

9. En el recuadro "Descripción" se puede poner una nota sencilla para identificar su foto, como el número de plástico o el número de campo que se esta leyendo. Este dato irá en el inicio del Excel generado con el conteo.(figura 5.6). Al terminar presione aceptar.
10. Se elije la amplificación en la que se uso el objetivo del microscopio elegido(40x, 100x, 200x o 400x). Este paso es importante para que la medición de los diámetros se lo de en las micras específicas y evitar conversiones posteriores.(figura 5.7) y presione el botón "LEER BMP"

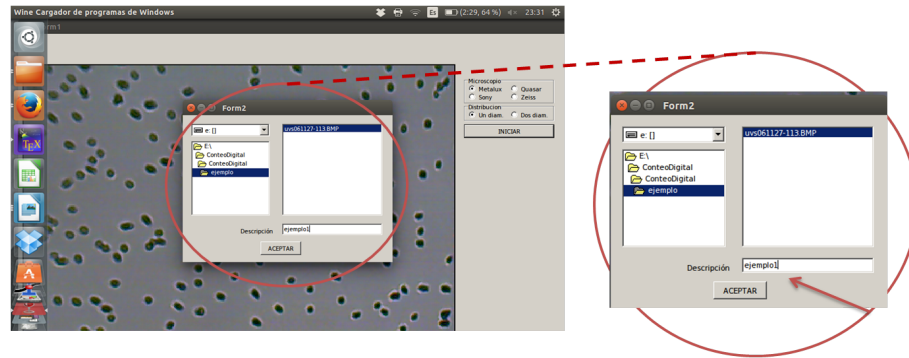


Figura 5.6: Descripción del archivo

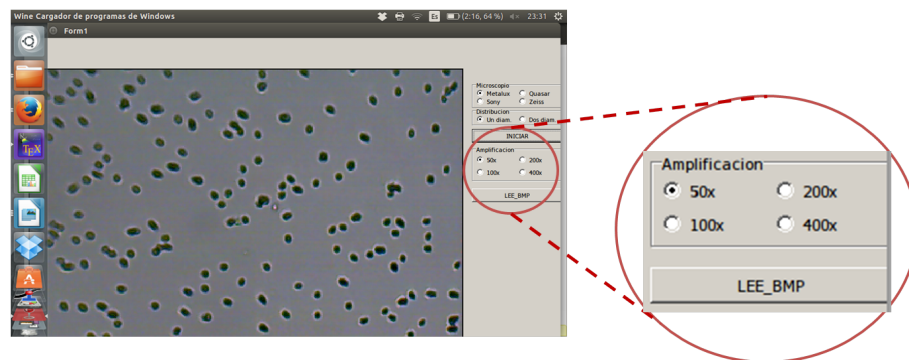


Figura 5.7: Amplificación

11. Se determinan los diámetros mínimo y máximo (Parte superior derecha de la pantalla) dependiendo de la traza que desee leer. Es mas sencillo cambiar el número de píxeles (Recuadro de la izquierda de cada par como se observa en la imagen 5.8).
12. En la tabla 5.1 se hace referencia de que diámetros es recomendable leer para cada tipo de traza según el número de píxeles. En este trabajo de tesis solo se realizaron conteos en la medida 100x para el microscopio quasar.

Tabla 5.1: Píxeles respecto al diámetro de la traza (en micras para la amplificación 1000x del microscopio quasar)

Tipo de traza	Píxeles mín/máx	Diámetro mín/máx
alphas	10/30	3.33/10
radón	15/35	3.33/14.33

13. Se elige la excentricidad en el recuadro de la derecha media que necesite para su imagen (figura 5.8). Si hay interés en trazas de forma circular observables se hizo un experimento (véase en resultados) donde las trazas que a ojo se ven circulares el contador las toma como excentricidad mayor a 0.8 por lo cual se recomienda utilizar este valor.
14. Al terminar de seleccionar los diámetros se puede cambiar el umbral que será la cantidad de contraste entre el blanco y el negro de la imagen. Este

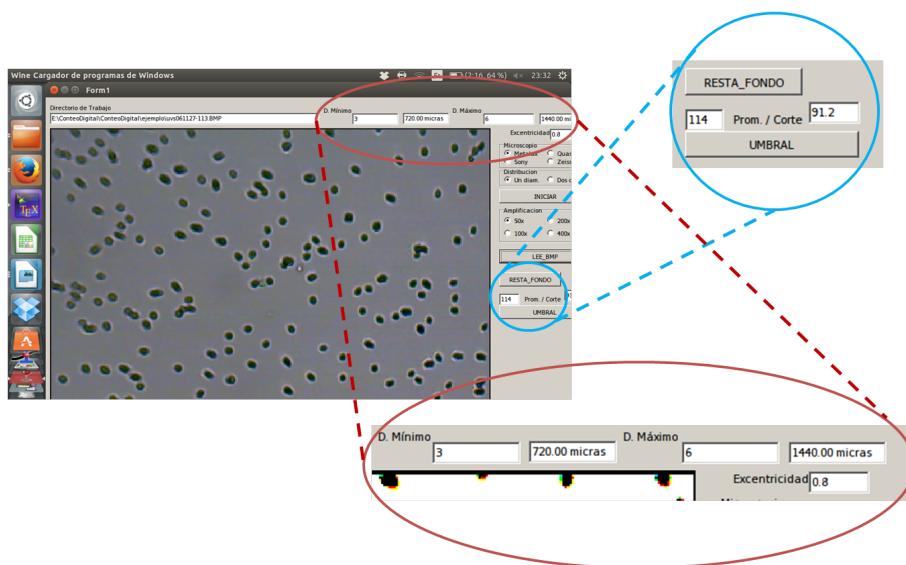


Figura 5.8: diámetros, excentricidad y umbral

valor dependerá de la calidad de la fotografía que el microscopio arroje. Por default el valor del "corte" está al 80% del promedio. Para el microscopio quasar en el objetivo 100x se recomienda este umbral, si usted cambia de objetivos, las tablas 5.2 y 5.3 hacen una referencia de los valores sugeridos para los objetivos y microscopios que se utilizaron para esta tesis.

Tabla 5.2: Valores del corte de umbral por objetivo para el microscopio quasar (Para sacar el valor que debe de ir en el recuadro solo es sacar el porcentaje del valor "prom.")

Objetivo	Porcentaje de umbral
40x	80%
100x	80%
400x	50%

Tabla 5.3: Valores del corte de umbral por objetivo para el microscopio zeiss (Para sacar el valor que debe de ir en el recuadro solo es sacar el porcentaje del valor "prom.")

Objetivo	Porcentaje de umbral
50x	60%
100x	50%
200x	No fue probado
1000x	No fue probado

- Se presiona el botón "UMBRAL" y se verifica que no se pierda detalle de las trazas visibles. Si esta muy blanca su imagen se necesita un corte de umbral mayor, mientras que si sale muy oscura se necesita un umbral menor.

16. Por último se presiona el botón "CONTEO". En la esquina inferior derecha se podrá observar dos conteos, dependiendo de la excentricidad y dependiendo del diámetro. Cuando se hacen conteos de densidad grande se recomienda tomar en cuenta el valor de conteos por diámetro mientras que en trazas muy específicas se recomienda tomar en cuenta por excentricidad. Entre mayor densidad mayor es la cercanía entre estos números. También se recomienda hacer un promedio de las dos, pero dependerá del experimento a realizar.
17. Para revisar en específico las trazas contadas debe ir a la carpeta donde tenía la imagen original y observará dos archivos Excel nuevos. Uno de ellos tiene el nombre de la imagen con terminación h que es el conteo por diámetro y otro con terminación t que es el conteo por excentricidad. (Figura 5.9)

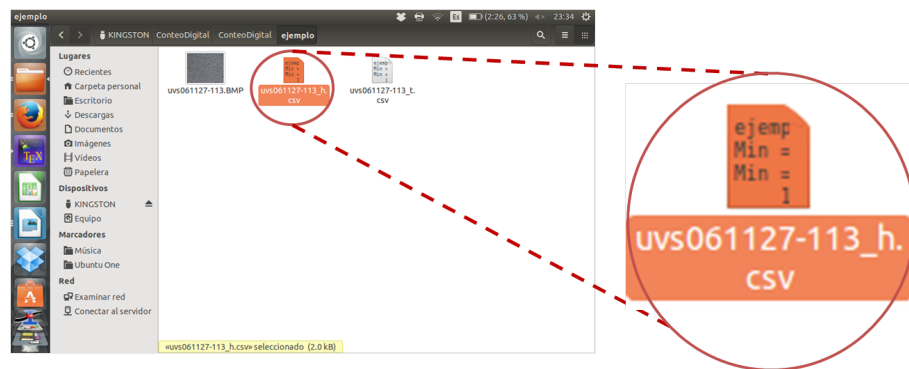


Figura 5.9: Donde se encuentra el archivo h de conteo

En el archivo h las columnas presentadas son el número de traza contada, el área de la traza dada en píxeles, la posición del píxel en x y la posición del píxel en y. Esto ayuda para identificar específicamente que traza se mide. (figura 5.10)

	A	B	C	D	E
1	ejemplo1				
2	Min = 3.000000	Max = 6.000000	excen = 0.800000		
3	Min = 719.999962 micras	Max = 1439.999925 micras			
4	1	35		6	6
5	2	36		6	6
6	3	34		6	5
7	4	36		7	6
8	5	34		6	6
9	6	36		7	6
10	7	36		6	6
11	8	34		6	6
12	9	32		6	5
13	10	31		5	6
14	11	35		6	6
15	12	29		6	5

Figura 5.10: Excel h

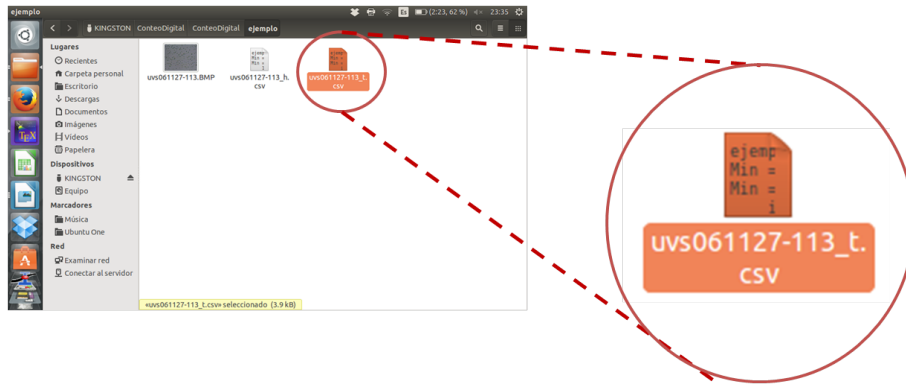


Figura 5.11: Localización del archivo t

18. Para el caso del archivo t (figura 5.11) las columnas dadas son el número de traza contada, el área de esa traza, la posición en el eje x, la posición en el eje y, el diámetro que tiene sobre el eje x y el diámetro que tiene con el eje y. (Figura 5.12)

	A	B	C	D	E	F	G
1	ejemplo1						
2	Min = 3.000000	Max = 6.000000					
3	Min = 719.999962 micras	Max = 1439.999925 micras					
4	i	area	pixx	pixy	dx	dy	
5	0		18	0	9	4	6
6	1		14	0	179	3	5
7	2		30	3	3	6	4
8	3		35	8	44	7	5
9	4		35	13	134	6	6
10	5		36	13	228	6	6
11	6		34	35	136	6	5
12	7		36	37	158	7	6
13	8		35	42	115	5	7
14	9		34	47	51	6	6
15	10		36	53	203	7	6

Figura 5.12: Excel t

En base a las instrucciones antes mencionadas, se puede hacer un trato amigable con el programa logrando así un análisis de las trazas grabadas con éxito, además, con los datos de los archivos h y t antes mencionados se puede trabajar ya en las especificidades necesarias para determinar el tipo y densidad de traza

5.2. Calibración del sistema (Linealidad)

Para todos los experimentos se preparó una serie de plásticos expuestos a una fuente de Americio y una separación entre la fuente y el plástico de 2 mm. Esta serie fue caracterizada como se observa en la tabla 5.4. Con estos detectores expuestos

Tabla 5.4: Características de los plásticos de la serie 1. Ataque químico de 6 horas en solución de KOH

número de plástico	tiempo de exposición(s)
3976312	1
3976307	3
3976309	6
3976311	9
3976308	12
3976310	15
3976306	fondo

a diferentes tiempos se realizarán los experimentos de linealidad.

5.2.1. Comprobación de la linealidad

El primer experimento es observar que los plásticos antes mencionados estuvieran con una densidad de trazas similares para poder determinar los factores de correlación entre el conteo manual y el conteo automático.

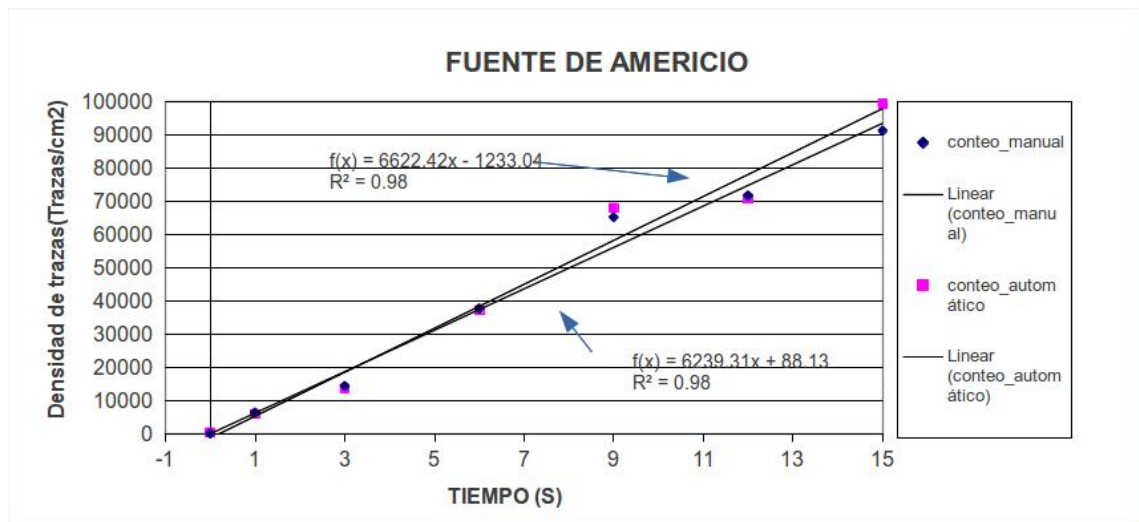


Figura 5.13: Resultado del conteo automático y el Manual para la serie en la tabla 5.4

La linealidad también nos aporta la ventaja de la extrapolación y poder determinar si el contador es viable para su uso en un rango específico.

Para la serie de plásticos descrito en la tabla 5.4 se realizó un conteo manual y uno automático. Se hizo un conteo a 5 campos sin discriminación del ángulo con una resolución de 10X de objetivo mas 10X de la cámara digital, es decir, de cualquier

traza formada sobre la primer capa sin tomar en cuenta las trazas sobrepuestas. El resultado esta dado por la figura 5.13.

Como se puede observar, el conteo manual tiene un factor de linealidad del 98 % y el conteo automático del 98 %, por lo que se tiene un 2 % máximo de incertidumbre haciendo el sistema eficiente.

Se eligió el objetivo de 10x porque el sistema tiene un error mecánico en el objetivo de 40 que genera una falta de enfoque en las orillas lo cual nos pierde información de las trazas grabadas, y el objetivo de 20x no permite ver trazas ya que las trazas son mayores a este campo.

5.3. Factor de correlación

Para el siguiente caso nos interesa ver cual es la confiabilidad de los datos entre lo que se ve a ojo y lo que esta contando la máquina, pues queremos que el sistema observe los mismos datos que se observan a simple vista.

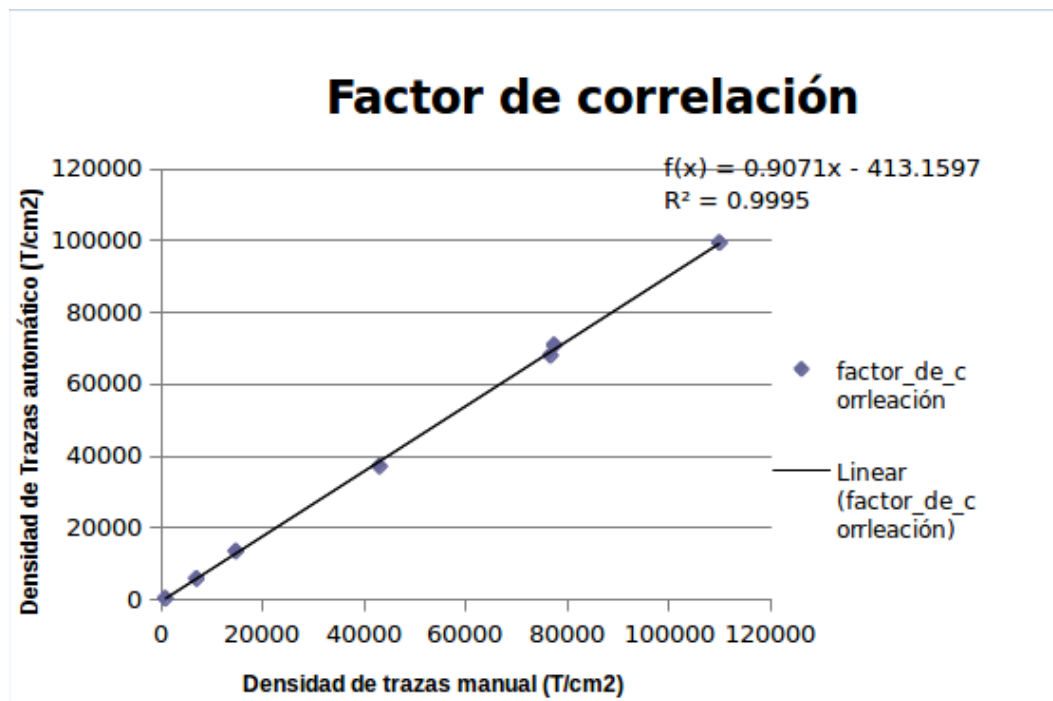


Figura 5.14: Factor de correlación entre el conteo manual y el conteo automático

Se utilizaron los mismos campos contados en el experimento anterior para realizar la correlación entre uno y otro. Al obtener éste factor entre el conteo manual y el conteo automático obtenemos un factor de 0.9958 lo cual refiere a una buena calibración. (Figura 5.14).

5.4. Excentricidad

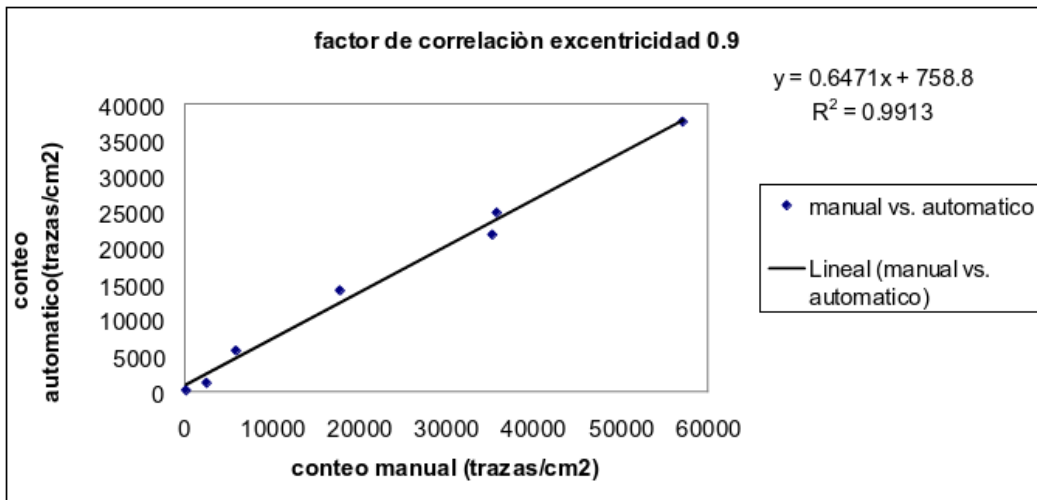
El segundo experimento fue realizar un conteo con discriminación del ángulo para entender como afecta el valor de la excentricidad contra el conteo manual. Es evidente que el ojo humano es incapaz de distinguir entre una excentricidad de 1 o de 0.8

En general, los laboratorios utilizan como estadística aceptable para los datos obtenidos en un experimento los que para el ojo humano se ven redondas, aunque sabemos que en una máquina, se puede elegir el valor específico dependiendo del experimento.

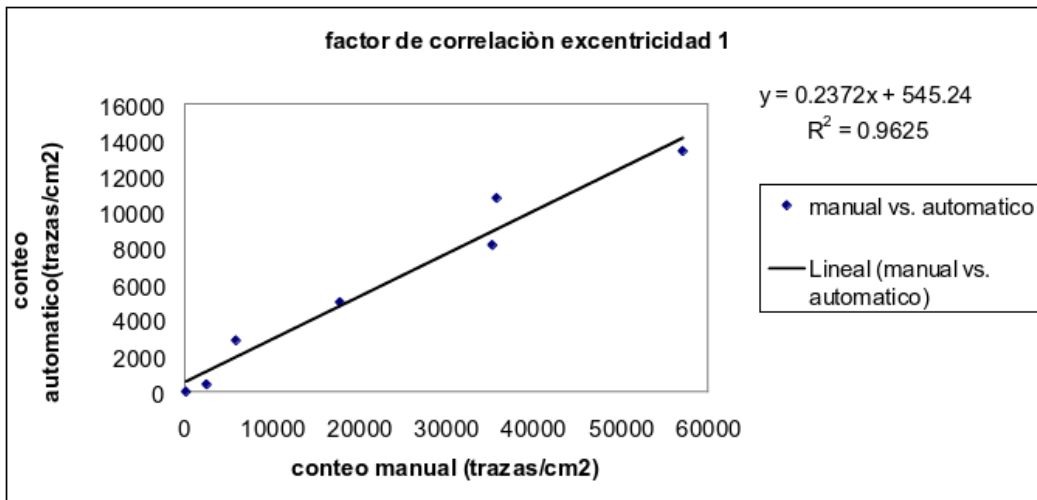
Este experimento se enfocó en observar que tanta información se pierde en el ojo humano al contar trazas redondas con respecto a la excentricidad dada por una máquina. Se realizó un conteo manual y tres conteos automáticos a diferentes excentricidades (0.8, 0.9 y 1), obteniendo así el factor de correlación entre ellos.

Al generar los factores de correlación entre el conteo manual y el conteo de cada una de las excentricidades obtenemos que para la excentricidad 0.9 es de 99.13 % (Figura 5.15(a)), para la excentricidad 1 es de 95.25 % (Figura 5.15(b))y para la excentricidad 0.8 es de 99.26 % (Figura 5.15(c)).

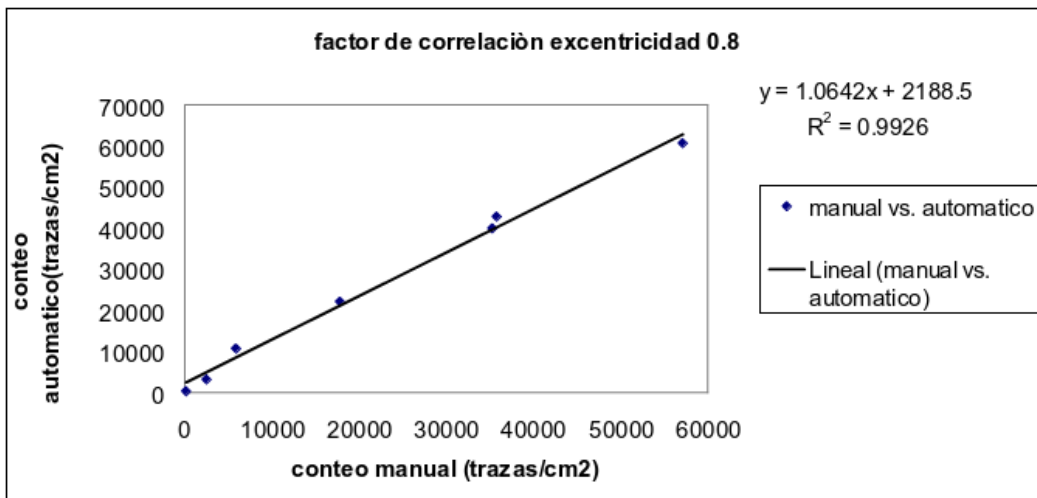
Esto nos indica que, como las trazas no son cien por ciento perfectas, las que consideramos como trazas a ojo tienen una excentricidad aproximada de 0.8 o mayor, por lo que se recomienda al lector utilizar esta excentricidad para conteos que no necesitan una estadística específica.



(a) Factor de correlación para excentricidad 0.9



(b) Factor de correlación para excentricidad 1



(c) Factor de correlación para excentricidad 0.8

Figura 5.15: Factores de correlación dependiendo de la excentricidad

5.5. Campos de lectura y tiempos de análisis

Un tercer experimento es realizar varios conteos para obtener la incertidumbre dependiendo de la cantidad de campos contados. Esto es útil para el costo-beneficio; entre menor sea el tiempo utilizado para el conteo, mayores datos pueden ser verificados y analizados sin necesidad de usar demasiado tiempo o personal para llevar el experimento a cabo.

Con la misma serie antes mencionada se hicieron conteos a 3 campos, 5 campos y 10 campos para determinar la incertidumbre porcentual en cada caso. Para los 3 campos se obtiene una desviación porcentual del 57 % con un tiempo de 2 minutos. En el caso de 5 campos se obtiene la desviación de 29 % con un tiempo estimado de 3 minutos. Para el caso de 10 campos se obtiene una desviación de 5 % con un tiempo de 6 minutos.

Aunque el tiempo aumenta considerablemente al aumentar campos, también se genera menor incertidumbre.

Se hizo un segundo análisis de la incertidumbre solo con el plástico de mayor cantidad de trazas y se obtuvo que el porcentaje de incertidumbre baja drásticamente a 15 % para 3 campos, 5 % para 5 campos y 1 % para 10 campos, lo que nos indica que a mayor cantidad de trazas puede bajar la cantidad de campos contados.

5.5.1. Comparativa con otro método

Para poder observar el alcance del proyecto realizado se hizo una comparativa con un producto comercial. se obtuvo la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Tabla comparativa de limitaciones para el sistema CADIS con un sistema comercial (TASLIMAGE)

DATOS DE COMPARACIÓN	TASLIMAGE	CADIS
Tiempo de lectura	30-80s por plástico	70-300s por plástico
Límite inferior	5Bq/m ³	5Bq/m ³
Límite superior	15MBq/m ³	18MBq/m ³
Precisión	3-6 % entre 200-5000 Bq/m ³	2-10 % entre 75-2500
Formato de salida	csv	csv

Capítulo 6

Aplicaciones

6.1. En Física Nuclear

Los detectores de trazas en sólidos pueden detectar libremente los fragmentos de fisión en presencia de altas dosis de partículas cargadas ligeras, radiación gamma y neutrones. son ideales para el estudio de tipos extraños de partículas cargadas pesadas emitidas en reacciones nucleares.

Han sido utilizados en la medición de la fisión por decaimiento espontáneo por núcleos pesados, entre otros parámetros necesarios en la ciencia nuclear. [13][24]

6.2. En Geocronología

Ha sido encontrado que todos los materiales contienen alguna traza del uranio natural en la corteza terrestre. Algunos átomos de uranio solidificado a través de un proceso espontáneo de fisión, produce fragmentos de fisión observables en el daño de dichos materiales. La densidad de este daño es proporcional al producto de uranio contenido en el material y el año de éste. Este método fue conocido como "fechado por trazas nucleares" ahora es considerado un método estándar en el fechado geológico, arqueológico e incluso cosmológico.[5][14]

6.3. En Cosmología

Los detectores de trazas han sido empleados satisfactoriamente como medida en el flujo de radiaciones a grandes altitudes. El análisis de estas trazas sobre microcráteres han dado información sobre la composición y el flujo de meteoritos en el espacio[26]. El análisis de trazas en meteoritos hace posible la medida de la duración de varios tipos de exposición en el espacio y da información de procesos importantes como:

- La erosión y las tasas de almacenamiento de radiación en la superficie lunar
- El tamaño original de un meteorito a partir del sobrante de impacto en la atmofera terrestre.
- El tiempo de caída de tectitas en la tierra.
- El flujo de rayos cósmicos en distintos periodos.

6.4. En Sismología

Han sido encontrados cambios interesantes en los ambientes naturales y en el comportamiento de los seres vivos después de la sacudida física de terremotos. Recientemente, la idea de los movimientos de los fluidos y gases sobre la corteza terrestre por el movimiento de la tierra se ha entendido satisfactoriamente. Fleischer llevó a cabo un trabajo sistemático del movimiento de los gases sobre la corteza y determinó los factores de predicción con antelación al movimiento de las capas tectónicas. Los detectores de trazas dan señales de alerta ante un terremoto indicando la existencia de la relación entre los procesos de un terremoto y la emisión de gas radón y torón. Los resultados obtenidos revelan que el choque de ondas afecta considerablemente la emanación de dichos gases sobre la corteza.[3]

6.5. Radón Intramuros

El radón es un elemento químico con 86 protones que pertenece al grupo de los gases nobles, es incoloro, inodoro y radiactivo.

El radón, al ser un elemento radioactivo, puede tener efectos en salud. como cáncer de pulmón y en general al sistema respiratorio, leucemias y posibles contaminaciones en sangre. El estudio, análisis y evaluación del radón intramuros es muy importante siendo conocido que este es el contribuyente mayoritario (57 %) de la exposición de los seres vivos y humanos.

Esta técnica es tan importante que en la actualidad existen instituciones más dedicadas al estudio del radón como son: [UNSCEAR](#), [ICRP](#), [EURATOM](#), [IEA](#), [NCRP](#), [BEIR-VI](#), se han publicado libros y recomendaciones internacionales como el BEZR, UNSEN, IA, etc. y se han escrito más de 35,000 artículos en los últimos tiempos.[11]

6.6. Biología y medicina

El uso de "agujeros" por trazas latentes también pueden servir de filtros [19]. El tamaño, forma y número de estos orificios o deposiciones puede ser controlada a través de condiciones experimentales.

Estos filtros pueden ser usados en sangre para filtrar células cancerígenas e incluso para limpiar el aire de partículas de polvo.

Otras aplicaciones exitosas de las trazas nucleares es la radiobiología de plutonio. Los detectores de trazas han sido utilizados por científicos para la localización de concentraciones de este elemento radiactivo en el hígado principalmente. Este método es simple: el detector se pone en contacto con el tejido a estudiar y se obtiene así una radiografía de alfa natural. El estudio de mono-células del hígado está ganando importancia para el diagnóstico médico.

Uno de los usos más ingeniosos de esta técnica es emplear una sola traza para contar y medir la movilidad electrocinética de partículas de tamaño submicrónico [29]. Los glóbulos rojos tienen diámetros entre 7 y 8 micras con un espesor de 1 a 2 micras. Estos glóbulos cuando están sanos son extremadamente flexibles, por lo que pueden pasar a través de capilares muy finos. Varios experimentos han demostrado que al pasar estas células por las porosidades del detector de trazas

dan información viable sobre la pérdida de elasticidad de los glóbulos, por lo que la innovación de los detectores como microfiltros esta en auge.

Para energías específicas en el orden de cientos de MeV por nucleón, donde los diámetros están dentro de los 10 cm, se pueden hacer diagnósticos médicos para el tratamiento de canceres.

Esta técnica usa un arreglo delgado de varias hojas de diferentes plásticos que son atacados a distintas separaciones con la fuente de radiación. solo las trazas de la última capa son revelados para hacer el análisis de las trazas.

6.7. Litografía de iones pesados

La fotolitografía ha sido tomada por los científicos como un arte desde el siglo 19.

Esta técnica fue refinada con el uso de rayos UV, rayos X y rayos de electrones. En el presente la aplicabilidad de los rayos de iones pesados en esta industria esta siendo explorada.

Ésta innovación ofrece generar estructuras muy finas y a la vez obtener mayor profundidad, generando así una tercera dimensión a la litografía convencional. Ésta es definida directamente por el grosor de la capa. La acción amorfa de éstos iones es lo que provoca el drástico cambio en la materia.

6.8. Altímetro de pájaros usando trazas nucleares

Una aplicación muy interesante de la técnica de detección de trazas nucleares en sólidos es éste altímetro. Se construyo un cuerpo ligero donde se integró un barómetro que puede utilizarse para medir la distribución de las altitudes preferentes para el vuelo de las aves. En este sistema barométrico se insertó una fuente de radiación alfa fija tal que las partículas solo podían alcanzar la posición más cercana de un detector sensible. A mayor altitud, el rango de partículas alfa aumento debido a la densidad de la atmósfera inferior generando trazas a lo largo del detector.

Este estudio sistemático de la distribución de trazas dio información sobre la distribución de tiempos gastados en vuelo por las aves a diferentes altitudes. También proporcionaron las altitudes preferentes dependiendo de la variedad de aves y los climas ya sean secos o húmedos.[16].

En todas estas aplicaciones puede ser usado el programa de computo desarrollado en el IFUNAM y este trabajo de tesis.

Apéndice A

Manual de uso del software para la cámara digital del microscopio quasar

1. Inserte el cable USB de la cámara digital incluida en su microscopio al puerto USB de la computadora personal o laptop.
2. Inserte el disco de instalación del programa incluido en el paquete del microscopio quasar
3. Siga las instrucciones que le presenta la pantalla emergente del ayudante de instalación de Windows
4. Abra el icono que aparecerá en su escritorio del programa
5. Le aparecerá una pantalla semejante a la que se muestra en la figura [A.1](#).
6. En la parte central del menú "capturar" (Parte superior media) podrá observar lo que ve el microscopio, si usted mueve los objetivos la cámara ajustará al mismo tiempo la visión.
7. Para tomar una fotografía de lo observable en la pantalla, en la parte izquierda media se observa el botón "Capturar imagen"
8. Al instalar el programa se creará una carpeta llamada donde podrá encontrar las imágenes capturadas. Estas imágenes son guardadas en formato JPG. Para saber como cambiar de formato vea el siguiente apéndice.



Figura A.1: Visualización básica del programa para la cámara digital del microscopio Quasar

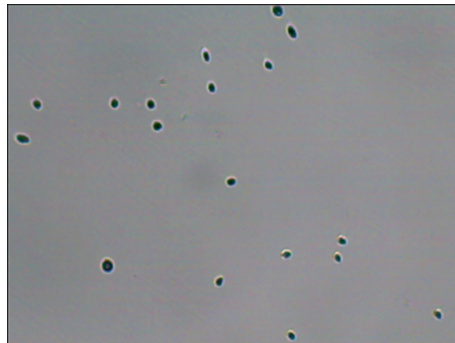
Apéndice B

Campos ejemplo de los detectores CR39 utilizados

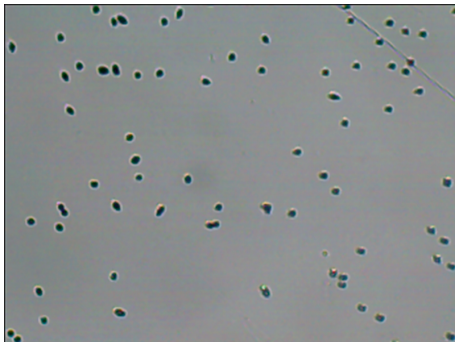
Plástico 3976312
Ataque químico en KOH:
6 horas
Expuesto a fuente de Americio
1 segundo
2 mm de separación



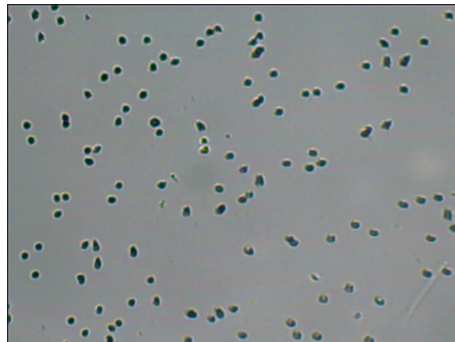
Plástico 39766307
Ataque químico en KOH:
6 horas
Expuesto a fuente de Americio
3 segundos
2 mm de separación



Plástico 3976309
Ataque químico en KOH:
6 horas
Expuesto a fuente de Americio
6 segundos
2 mm de separación

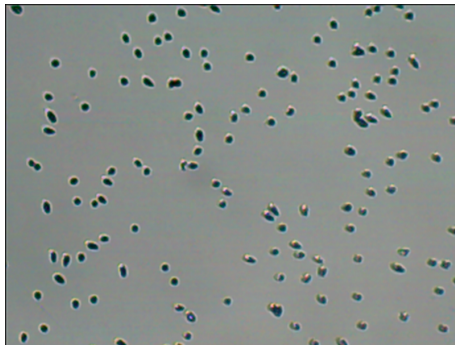


Plástico 3976311
Ataque químico en KOH:
6 horas
Expuesto a fuente de Americio
9 segundos
2 mm de separación

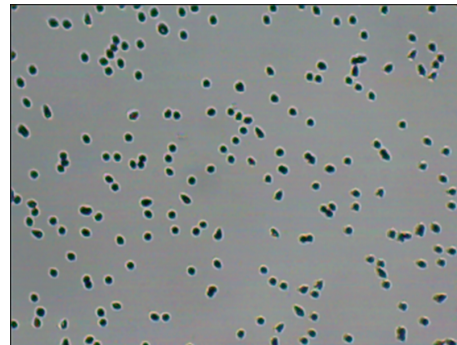


54 APÉNDICE B. CAMPOS EJEMPLO DE LOS DETECTORES CR39 UTILIZADOS

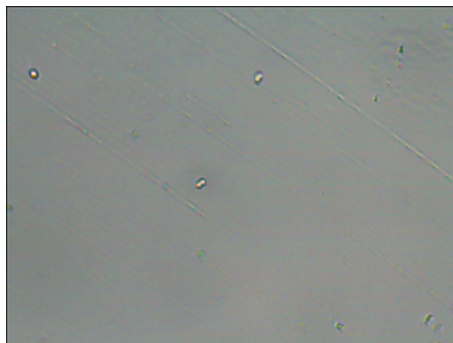
Plástico 3976308
Ataque químico en KOH:
6 horas
Expuesto a fuente de Americio
12 segundos
2mm de separación



Plástico 3976310
Ataque químico en KOH:
6 horas
Expuesto a fuente de Americio
15 segundos
2 mm de separación



Plástico 3976306
Ataque químico en KOH:
6 horas
Radiación de fondo
Bk



Glosario

A

actividad

Número de desintegraciones que se producen por unidad de tiempo. 10

ataque químico

Proceso en el cual se expone al material a una reacción química para hacer visibles características estructurales. 15

B

bit

Dígito del sistema binario. 19

C

coeficiente de atenuación lineal

Se define como la sumatoria de las probabilidades de que haya efecto Compton, fotoeléctrico o producción de pares en la interacción con radiación gamma. 3

convolución.

operador matemático que transforma dos funciones en una tercera que en cierto sentido representa la magnitud de superposición. 20

D

desintegración

Liberación de energía que experimenta un núcleo atómico por pérdida de alguna partícula. 3

detector

Aparato para descubrir la presencia de algún fenómeno. 14

F

frecuencia

número de oscilaciones por unidad de tiempo. 17

fuerza nuclear fuerte

Es la fuerza que mantiene unidos a los protones en el núcleo, a pesar de la fuerza de repulsión eléctrica.. 3

H**hardware**

Conjunto de elementos físicos o materiales que constituyen una computadora o un sistema informático en general. 32

I**ionización**

Fenómeno mediante el cual se producen iones, estos son átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutra.. 1

M**matriz**

Es un arreglo bidimensional de números en cantidades abstractas. 20

N**número atómico**

Número de protones que hay en un núcleo del átomo de un elemento. 1

P**píxel**

mínima unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital. 18

partículas alpha

Son núcleos de helio completamente ionizados, es decir, sin envoltura de electrones. 2

poder de frenado

Cantidad de energía depositada por una partícula cargada en un medio material por unidad de longitud. 1

R**radiación**

Propagación de la energía en forma de onda o partícula. 6

rayos delta

Electrones desplazados en el material expuesto a radiación. 10

S**señal**

Variación de una magnitud física. 17

semiconductor

Sustancias cristalinas que poseen una conductividad electrónica variable con la temperatura y que en el cero absoluto son aisladores. 10

software

Conjunto de programas o rutinas que permiten a una computadora realizar determinadas tareas. 32

T**tensión eléctrica**

Trabajo que se necesita para desplazar una carga eléctrica entre dos puntos de un campo eléctrico. 8

traza nuclear

Es la huella del paso de partículas nucleares y de iones pesados a través de sólidos, generando patrones. 10

Siglas

A

ADC

analogic digital convertor. 17

B

BEIR-VI

Comitee on the Biological Effects of Ionizing Radiation-The Health Effects of Exposure to Indoor Radon. 48

bit

Binary Digit. 19

BMP

Bits Map. 37

C

CCD

Charge-Coupled Device. 22, 27

CMOS

Complementary Metal-Oxide-Semiconductor. 22

CR-39

allyl diglicol carbonate Columnia Resin no.39. 22

D

dpi

dots per inch. 18

DSLR

Digital Single Lens Reflex. 19

DTS

detección de trazas en sólidos. 23

E**EURATOM**

European Atomic Energy Community. 48

I**ICRP**

International Commission on Radiological Protection. 48

IEA

International Energy Agency. 48

IMPI

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. 32

ISO

International Standardization Organization. 21

J**JPG**

Joint Photographic Experts Group. 19

N**NCRP**

National Council on Radiation Protection & Measurements. 48

NTSC

National Television System Committee. 22

R**RAW**

en bruto. 19

U**UNSCEAR**

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 48

Índice de figuras

1.1. Ionización por centímetro de partículas alfa [1]	2
1.2. Representación gráfica del efecto fotoeléctrico	4
1.3. Representación gráfica del efecto Compton	4
1.4. Proceso de formación de pares	5
1.5. Curva característica de los detectores por ionización en gas	6
1.6. Fundamentos de la detección de la radiación ionizante	7
1.7. Detector de cámara de ionización marca Victoreen modelo 450	7
1.8. Contador proporcional marca lamse	8
1.9. Prototipo de monitor de radiación con detector Geiger-Müller	8
1.10. Esquema del principio básico de la termoluminiscencia	9
1.11. Policarbonato CR-39 como detector de trazas nucleares	9
1.12. Distribución espacial de la energía depositada por los rayos delta alrededor de traza producida por la partícula en un sólido	11
1.13. Geometría de la traza con V_t y V_g constantes	12
1.14. Geometría de la traza variando V_t	12
1.15. Cálculo de la secuencia de la formación de trazas en obsidiana, para fragmentos de fisión. (Fleischer et al. 1969)	13
1.16. Simulación de luz generada para ataques químicos de 5, 10, 15, 20 y 25 de profundidad con programa TRACK-TEST	14
1.17. Algunos ejemplos de los defectos más clásicos sobre un material	15
1.18. Ejemplos de trazas grabadas en CR-39 a distintos tipos de radiación: (a) Fragmentos de fisión, (b) Partículas α de Americio, (c) Radón intramuros, (d) Neutrones usando la reacción (n,α)	16
2.1. Diagrama representativo del método Wilkinson	18
2.2. Partes básicas de una cámara digital	20
3.1. Sistema de conteo de trazas mediante un contador de colonias de bacterias (LLNL-USA)	26
3.2. Sistema de conteo basado en un microdensitómetro	26
3.3. Sistema de conteo mediante el uso de Inovión	27
3.4. Sistema DIAS utilizado en el proyecto de Aplicaciones de la Dosi- metría, IFUNAM	27
4.1. diagrama del sistema CADIS con microscopio QUASAR utilizado en el proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría, IFUNAM	29
4.2. Sistema CADIS con microscopio ZEISS utilizado en el proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría, IFUNAM	30
4.3. Diagrama de flujo del funcionamiento básico del contador digital	33

5.1. Carpeta de Conteo Digital	35
5.2. Carpeta "Ejecutable"	36
5.3. Icono del "ConteoDigital"	36
5.4. Selección de microscopio	37
5.5. Selección de archivo	37
5.6. Descripción del archivo	38
5.7. Amplificación	38
5.8. diámetros, excentricidad y umbral	39
5.9. Donde se encuentra el archivo h de conteo	40
5.10. Excel h	40
5.11. Localización del archivo t	41
5.12. Excel t	41
5.13. Resultado del conteo automático y el Manual para la serie en la tabla 5.4	42
5.14. Factor de correlación entre el conteo manual y el conteo automático	43
5.15. Factores de correlación dependiendo de la excentricidad	45
A.1. Visualización básica del programa para la cámara digital del mi- croscopio Quasar	52

Índice de tablas

3.1. Diferentes métodos de conteo empleados. estos se pueden dividir en generaciones en base a la tecnología utilizada.	24
3.2. Características de algunos métodos de conteo (OP.=Optimización, M=Manual, S= Semiautomático, A=Automático,LIM. INF.= Límite Inferior, LIM. SUP.= Límite Superior, PREC.= Precisión, VEL. de CONT.= Velocidad de conteo)	25
5.1. Píxeles respecto al diámetro de la traza (en micras para la ampli-ficación 1000x del microscopio quasar)	38
5.2. Valores del corte de umbral por objetivo para el microscopio qua-sar(Para sacar el valor que debe de ir en el recuadro solo es sacar el porcentaje del valor "prom.")	39
5.3. Valores del corte de umbral por objetivo para el microscopio zeiss(Para sacar el valor que debe de ir en el recuadro solo es sacar el porcentaje del valor "prom.")	39
5.4. Características de los plásticos de la serie 1. Ataque químico de 6 horas en solución de KOH	42
5.5. Tabla comparativa de limitaciones para el sistema CADIS con un sistema comercial (TASLIMAGE)	46

Bibliografía

- [1] BEISER, A. A. *Concepts of modern physics*, 6 ed. McGraw-Hill, 2003.
- [2] BLIN-STOYLE, R. *Nuclear and particle Physics*, 1 ed. Chapman-Hall, 1991.
- [3] CAMPERO, A., FLEISCHER, R., AND LIKS, R. Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes. *Journal Geophysical Research* 85 (1980), 3053–3057.
- [4] DAS, A., AND FERBER, T. *Introduction to nuclear and Particle Physics*, 2 ed. World Scientific Publishing, 2003.
- [5] DURRANI, S., AND KHAN, H. Annealing of fission track in tektites: Corrected ages of bediasites. *Earth Planet Sci Lett* 9 (1972), 431–445.
- [6] ESPINOSA, G., GAMMAGE, R., MEYER, K., AND DUDNEY, S. Nuclear track analysis by digital image. *Radition Measurements* 26 (1996), 173.
- [7] ESPINOSA, G., GOLZARRI, J., AND BOGARD, J. Radon and progeny alpha-particle energy analysis using nuclear track methodology. *Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 277 (2008), 131–135.
- [8] ESPINOSA, G., GOLZARRI, J., AND CASTAÑO, V. Measurement of the energy spectrum of fission fragments using nuclear track detectors and digital image processing. *Radiation Measurements* 45 (2010), 786–788.
- [9] ESPINOSA, G., GOLZARRI, J., GAMBOA, I., TOMMASINO, L., AND GRIF-FITH, R. Digital image counting system for nuclear track detectors. *International Journal of Radiation Applications and Instruments* 12 (1986), 235.
- [10] ESPINOSA G., G. *Trazas nucleares en sólidos*, 1 ed. Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, 1994. ISBN: 968-36-4219-5.
- [11] ESPINOSA GARCÍA, G. C. *Gas Radón en Cuevas (Su origen, medición, distribución, y sus posibles riesgos y/o beneficios en salud pública)*. En Imprenta, 2015.
- [12] FLEISCHER, R., P.B.PRICE, AND WALKER, R. *Nuclear Tracks in Solids, principles and applications*. University of California Press, 1975.
- [13] FLEISCHER, R., AND PRICE, P. Decay constant for spontaneous fission on uranium 238. *Physics Rev.* 133B (1964), 63–64.

- [14] FLEISCHER, R., PRICE, P., AND WALKER, R. Solid state track detectors: applications to nuclear science and geophysics. *Annual Review Nuclear Science* 15 (1965), 1–28.
- [15] FLEISCHER, R., PROCE, P., AND WALKER, R. Method of forming fine holes of near atomic dimensions. *Review of Scientific Instrumentation* 34 (1963), 510.
- [16] FLEISHER, R. L. Technological applications of ion tracks in insulators. *MRS Bulletin* 20 (12 1995), 35–14.
- [17] GAMMAGE, R., AND ESPINOSA, G. Digital imaging system for track measurements. *Radiation Measurements* 28 (1997), 835.
- [18] GRIFFITH, R., MCMAHON, T., AND ESPINOSA, G. A commercial bacterial colony counter for semiautomatic track counting. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 8 (1984), 215.
- [19] KAHN, H., BRANDT, R., HIRDES, D., TRESS, G., DERSCH, G., AND JAMIL, K. Use of mica nuclear filter in the development of a background free radon presonnel dosimeter. *Journal of Aerosol Science* 14 (1983), 232–237.
- [20] KAHN, H., AND DURRANI, S. Measurement of spontaneous-fision decay constant of uranium 238 with a mica solid state track detector. *Rad Effects* 17 (1973), 133–135.
- [21] MAYER, J. W., AND STAU, S. *Electronic Materials Science*, 1 ed. McMillan, 1990.
- [22] McDONALD, S. G., AND BURNS, D. M. *Física para la ciencias de la vida y la salud*, 1 ed. Fondo educativo interamericano, S.A., 1978.
- [23] NIKEZIC, D., AND YU, K. *Nuclear Track Detectors: Deseign, Methods and Applications*. Nova Science Publishers, Inc., 2009.
- [24] ROBERT, J., GOLD, R., AND ARMANI, R. Spontaneous fission decay constant os uranium 238. *Physics Rev.* 174 (1968), 1482–1984.
- [25] RODRIGUEZ MARTÍN, J. Curso de fotografía digital. url: <http://thewebfoto.com/Thewebfoto-Curso-de-fotografia-digital.pdf>, 2008.
- [26] SMITH, D., ADAMS, N., AND KAHN, H. Flux and composition of micrometeoroids in the diameter range 1-10 micrometers. *Nature* 252 (1974), 101–106.
- [27] TIPLER, P. A., AND LLEWELYN, R. A. *Modern Physics*, 3 ed. W.H. Freeman and Company, 2000.
- [28] TOMASSINO, L., AND ESPINOSA, G. Neutrons, radon, naparticles, and nanoholes-everything comes to a full circle with track detectors. *Radiation Measurements* 50 (2013), 22–25.
- [29] VATER, P., TRESS, G., BRANDT, R., GENSWURGER, B., AND SPOHR, R. Nuclear tracks microfilters made of mica. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 173 (1980), 205–210.

- [30] VIQUEZ, S., ESPINOSA, G., AND CASTAÑO, V. Image processing analysis of chemical tracks. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 19 (1991), 271.
- [31] WONG, S. S. *Introductory Nuclear Physics*, 2 ed. John Wiley and Sons, Inc., 1998.