

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE  
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

**DETECTORES POR TRAZAS EN SÓLIDOS  
METODOLOGÍA Y DESARROLLO**

TESIS  
DOCTORADO EN CIENCIAS

**GUILLERMO CIRANO ESPINOSA GARCÍA**

Ensenada, Baja California, México, junio de 1994.



RESUMEN de la tesis de GUILLERMO CIRANO ESPINOSA GARCIA presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS en FÍSICA APLICADA con opción en FÍSICA DE MATERIALES. Ensenada, Baja California, México. Junio de 1994.

DETECTORES POR TRAZAS EN SÓLIDOS  
METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Resumen aprobado por:

Dr. Miguel José Yacamán  
Director de tesis

Esta tesis está basada fundamentalmente en algunos de los trabajos de investigación desarrollados dentro del Programa de Aplicaciones de la Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM. Se presentan los esfuerzos y contribuciones realizados en el estudio de materiales como detectores de radiación ionizante, de los procesos químicos para la formación de trazas nucleares visibles y la optimización de los parámetros para la caracterización de las partículas nucleares. Se discute la metodología para cada uno de los pasos, así como las diferentes alternativas que se han dado a través del tiempo, mostrando los resultados recientes, haciendo énfasis en las contribuciones originales realizadas en este tema.

Para el estudio de algunos de los efectos en los materiales semiconductores, se desarrolló y diseñó la instrumentación necesaria. Entre éstas una fuente de alto voltaje y alta frecuencia para la generación de arborescencias en polímeros. Y versiones sucesivas de sistemas para el análisis y conteo de las trazas formadas por la radiación ionizante en el material.

El estudio abarca la discusión de todos los elementos que intervienen en los sistemas, y que hacen posibles las aplicaciones en la solución de problemas particulares: a) la evaluación de radón intramuros, con el fin de determinar su relación y efectos en la salud pública y más específicamente con el desarrollo de cáncer pulmonar, y poder determinar el umbral de seguridad radiológica respecto a este gas natural, y b) distinguir y caracterizar contaminantes transuránicos en el medio ambiente para su aseguramiento y limpieza.

ABSTRACT of the Thesis of GUILLERMO CIRANO ESPINOSA GARCIA submitted as a partial fulfilment requirement to obtain the degree of DOCTOR IN SCIENCE in APPLIED PHYSICS with option in PHYSICS OF MATERIALS. Ensenada, Baja California, México. June, 1994.

## TRACK DETECTORS IN SOLIDS METHODOLOGY AND DEVELOPMENT

Abstract approved by:

This thesis is based fundamentally on some of the research work carried out as part of the Program of Dosimetry Applications at Instituto de Fisica, UNAM. A present action is made of the efforts and contributions to the study of materials as detectors of ionizing radiation, of the chemical process for the formation of visible nuclear tracks, and the optimization of parameters for the characterization of nuclear particles. A discussion is presented of the methodology for each one of the steps, as well as of the different alternatives that have arisen at different times, showing recent results with emphasis on the original contributions to the subject.

The necessary instrumentation for the study of some of the effects on semi conducting materials was developed and designed. Among them a high voltage and high frequency power supply for the production of treeing in polymers, and successive versions of systems for the analysis and counting of tracks formed by ionizing radiation in materials.

The study includes the discussion of all the elements entering in the systems, making possible applications in the solution of specific problems: a) The evaluation of indoor radon, with the purpose of determining its relation and effects on public health, and very specifically with the development of lung cancer, and in order to determine the threshold of radiological safety relative to this natural gas, and b) to distinguish and characterize transuranic contaminants in the environment for the latter's assurance and clean up.





CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE  
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA.

DIVISION DE FISICA APLICADA.  
DEPARTAMENTO DE FISICA DE MATERIALES

DETECTORES POR TRAZAS EN SOLIDOS  
METODOLOGIA Y DESARROLLO

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para  
obtener el grado de DOCTOR EN CIENCIAS presenta:

GUILLERMO CIRANO ESPINOSA GARCIA

Ensenada, Baja California, México. Junio de 1994

**DEDICATORIA**

**A**

**BARUJ Y AARON**

mis publicaciones  
de "Premio Nobel"

**A ROSA**

A la memoria de **MIS PADRES**

## AGRADECIMIENTOS

A mi Director de tesis **Dr. Miguel José Yacamán**, por haberme "Impulsado Fuertemente" a realizar este doctorado, por su colaboración para que esta tesis pudiera concluirse. Por su apoyo, sugerencias y orientación.

A los miembros del comité de tesis: **Dr. Hector Echevarria**, **Dr. Ignacio Garzón** y **Dra. Diana Tentori**, por su entusiasmo, comentarios, discusión del tema y correcciones al manuscrito. Muy especialmente al **Dr. Eugenio Ley Koo** le agradezco por sus enseñanzas, apoyo y paciencia en este trabajo y toda mi vida académica.

Al **Dr. Marvin Abraham**, por su interés en el tema, apoyo y comentarios a la tesis.

A **José Ignacio Golzarri**, compañero y amigo por ayudarme con el manuscrito y formatos de esta tesis.

A todos mis profesores, compañeros y amigos, por su apoyo.

Al Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada (**CICESE**).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**).

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM (**DGAPA**).

Al Instituto de Física de la UNAM (**IFUNAM**).

Al Lawrence Livermore National Laboratory (**LLNL**).

Al Oak Ridge National Laboratory (**ORNL**).



## CONTENIDO

### Página.

|            |                                                                                           |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I</b>   | <b>INTRODUCCION.</b>                                                                      | <b>1</b>  |
| <b>II</b>  | <b>METODOLOGIA.</b>                                                                       | <b>6</b>  |
| II.1       | Exposición del detector a la radiación ionizante.                                         | 7         |
| II.2       | Revelado por ataque químico (grabado químico).                                            | 8         |
| II.3       | Caracterización y lectura de la traza.                                                    | 9         |
| II.4       | Alcance y posibilidades del método DTS.                                                   | 14        |
| II.4.1     | Aspectos a considerar en la detección por trazas en sólidos.                              | 17        |
| II.4.2     | Tipo de partícula.                                                                        | 19        |
| II.4.3.    | Revelado de la traza.                                                                     | 22        |
| II.5       | Uso de vidrio, Lexano y CR-39 como DTS.                                                   | 23        |
| <b>III</b> | <b>DESARROLLO EXPERIMENTAL.</b>                                                           | <b>32</b> |
| III.1      | Materiales inorgánicos.                                                                   | 33        |
| III.2      | Materiales orgánicos.                                                                     | 35        |
| III.2.1    | Tiempos de grabado.                                                                       | 36        |
| III.2.2    | Respuesta a la energía.                                                                   | 37        |
| III.2.3    | Respuesta a la temperatura.                                                               | 41        |
| III.3      | Instrumentación.                                                                          | 45        |
| <b>IV</b>  | <b>RESULTADOS.</b>                                                                        | <b>59</b> |
| IV.1       | Uso de detectores pasivos por trazas nucleares para la determinación de radón intramuros. | 59        |
| IV.1.1     | Selección del material detector.                                                          | 63        |

## CONTENIDO (Continuación)

### Página.

|        |                                                                  |     |
|--------|------------------------------------------------------------------|-----|
| IV.1.2 | Selección del volumen sensible del dispositivo para medir radón. | 67  |
| IV.1.3 | Método de lectura.                                               | 68  |
| IV.1.4 | Calibración.                                                     | 71  |
| IV.1.5 | Aspectos que se deben considerar.                                | 73  |
| IV.1.6 | Recomendaciones.                                                 | 76  |
| IV.2   | Distribución y caracterización de contaminantes transuránicos.   | 78  |
| IV.2.1 | Mapeo de sitios mediante DTS.                                    | 81  |
| IV.2.2 | Determinación de perfiles de contaminación.                      | 84  |
| IV.2.3 | Material seleccionado y proceso químico.                         | 85  |
| V      | APLICACIONES.                                                    | 92  |
| V.1    | Los DTS en los diferentes campos de la ciencia.                  | 97  |
| VI     | CONCLUSIONES.                                                    | 99  |
|        | LITERATURA CITADA.                                               | 103 |
|        | APENDICE A. ASPECTOS BASICOS.                                    | 111 |



## LISTA DE FIGURAS

### Página.

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.  | Diagrama a cuadros donde se muestran los pasos del método de detección por trazas en sólidos.                                                                                                                                                                           | 7  |
| Figura 2.  | Formación de arborescencias.                                                                                                                                                                                                                                            | 13 |
| Figura 3.  | Diagrama ampliado del método para la detección por trazas en sólidos (DTS).                                                                                                                                                                                             | 14 |
| Figura 4.  | Fotografías de trazas de partículas alfa con diferentes procesos y materiales. a) Nitrato de celulosa a $90^{\circ}$ , b) nitrato de celulosa a $45^{\circ}$ , c) CR-39 sin pregrabado, d) CR-39 con pregrabado, e) Lexano con grabado químico, f) neutrones en Lexano. | 15 |
| Figura 5.  | Se muestra la interdependencia de los pasos en el método de detección por trazas y sus posibilidades y alcances.                                                                                                                                                        | 17 |
| Figura 6.  | Respuesta angular de los DTS (variación de densidad de trazas con el ángulo de irradiación).                                                                                                                                                                            | 18 |
| Figura 7.  | En la fotografía, se muestra el efecto de la tensión mecánica en un material detector, produciendo cadenas de trazas indeseadas.                                                                                                                                        | 20 |
| Figura 8.  | La figura muestra la respuesta del "soda lime glass", para diferentes concentraciones de HF.                                                                                                                                                                            | 23 |
| Figura 9.  | Velocidad de grabado para "soda lime glass".                                                                                                                                                                                                                            | 24 |
| Figura 10. | Gráficas de respuesta del Lexano a neutrones.                                                                                                                                                                                                                           | 26 |
| Figura 11. | Formulas químicas del CR-39.                                                                                                                                                                                                                                            | 27 |
| Figura 12. | Respuesta del CR-39.                                                                                                                                                                                                                                                    | 28 |
| Figura 13. | Respuesta del grabado electroquímico del CR-39.                                                                                                                                                                                                                         | 30 |
| Figura 14. | Gráficas de optimización de parámetros para los DTS.                                                                                                                                                                                                                    | 34 |

## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Página.

|            |                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 15. | En la figura se muestra la relación de grabado para diferentes concentraciones de la solución para: a) acetato de celulosa, b) butirato de celulosa (azul), c) nitrato de celulosa y d) policarbonato (CR-39). | 37 |
| Figura 16. | Respuesta del tiempo de grabado vs. diámetro de la traza para tres diferentes solventes.                                                                                                                       | 38 |
| Figura 17. | En la figura se muestra la respuesta del lexano a partículas alfa de diferentes energías, para tiempos de grabado de 0 a 90 minutos.                                                                           | 39 |
| Figura 18. | En la figura se muestra la eficiencia de detección del CR-39 para diferentes energías, con el mismo proceso de grabado en todos los casos.                                                                     | 40 |
| Figura 19. | En la figura se muestra el número relativo de trazas visibles en varios materiales en función al tiempo de grabado químico.                                                                                    | 40 |
| Figura 20. | En la figura se muestra el número relativo de trazas visibles en CR-39 en función al tiempo de grabado químico.                                                                                                | 41 |
| Figura 21. | En la figura se muestra la respuesta de la velocidad de grabado vs. la temperatura de la solución (KOH, 6N).                                                                                                   | 42 |
| Figura 22. | En la figura se muestra la respuesta de eficiencia diferentes CR-39. a) Pershore (normal). b) Fukuvi. c) Pershore (calidad especial). d) American Acrilics.                                                    | 44 |
| Figura 23. | Primera cámara para el grabado electroquímico.                                                                                                                                                                 | 48 |
| Figura 24. | Diseño de la nueva cámara para GEQ.                                                                                                                                                                            | 49 |
| Figura 25. | Fotografía de la cámara de grabado electroquímico en operación en el IFUNAM.                                                                                                                                   | 49 |
| Figura 26. | Sistema de conteo por chisporroteo.                                                                                                                                                                            | 52 |



## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

|                                                                                                                                                          | <u>Página.</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Figura 27. Sistema de conteo de trazas mediante un contador de colonias de bacterias.                                                                    | 53             |
| Figura 28. Calibración del sistema "contador de bacterias".                                                                                              | 54             |
| Figura 29. Sistema de conteo basado en un microdensitómetro.                                                                                             | 55             |
| Figura 30. Sistema de conteo mediante el uso del Inovion.                                                                                                | 56             |
| Figura 31. Imagen de una traza, haciendo uso del sistema Inovión.                                                                                        | 56             |
| Figura 32. Diagrama a cuadros del sistema del sistema de conteo y análisis mediante digitalización de imágenes (tarjeta unica).                          | 57             |
| Figura 33. Serie de decaimiento del uranio (U-238).                                                                                                      | 61             |
| Figura 34. Dosis anual de radiación ambiental recibida por los humanos.                                                                                  | 62             |
| Figura 35. Respuesta de los diferentes tipos de CR-39 para una fuente de Am-241 (todos los materiales tuvieron el mismo tratamiento químico).            | 65             |
| Figura 36. Eficiencia del CR-39 de diferentes productores (American Acrylics, Fukuvi y Pershore Moulding).                                               | 66             |
| Figura 37. Dispositivo para efectuar el tratamiento químico.                                                                                             | 66             |
| Figura 38. Detector de CR-39.                                                                                                                            | 67             |
| Figura 39. Dispositivo para monitoreo de radón intramuros.                                                                                               | 70             |
| Figura 40. Respuesta de la cámara de calibración del IFUNAM.                                                                                             | 72             |
| Figura 41. Respuesta de la cámara de calibración del ORNL.                                                                                               | 72             |
| Figura 42. Diferentes tipos de detectores de radón: a) ENEA (Italia), b) Harwell (UK), c) Landauer (USA), d) Karlsruhe (Alemania), e) Piesch (Alemania). | 75             |

## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Página.

|            |                                                                                                                                |     |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 43. | Respuesta del CR-39 a partículas alfa de Am-241.                                                                               | 80  |
| Figura 44. | Respuesta del CR-39 a partículas alfa del Pu-239.                                                                              | 80  |
| Figura 45. | Distribución de la contaminación radiactiva en la unión de las losetas del piso.                                               | 83  |
| Figura 46. | Diseño de la estaca para medición de perfiles de contaminantes a profundidad.                                                  | 84  |
| Figura 47. | Mapa de localización de los DTS en el lugar.                                                                                   | 85  |
| Figura 48. | Perfiles de contaminación.                                                                                                     | 86  |
| Figura 49. | Trazas nucleares de Pu-239.                                                                                                    | 88  |
| Figura 50. | Trazas formadas por concentraciones de Pu-239 y Am-241.                                                                        | 88  |
| Figura 51. | Respuesta del CR-39 al americio (Am-241).                                                                                      | 89  |
| Figura 52. | Respuesta del CR-39 a materiales preparados con diferentes contaminantes.                                                      | 89  |
| Figura 53. | Distribución de frecuencias de areas de tres diferentes energías de partículas alfa. (Abu-Jarad <i>et al.</i> 1991).           | 90  |
| Figura 54. | Número de trabajos presentados en los más recientes congresos internacionales.                                                 | 94  |
| Figura 55. | Número de participantes y países en los últimos congresos.                                                                     | 95  |
| Figura 56. | Número de trabajos presentados por temas en los últimos congresos internacionales. a) Radón. b)Neutrones. c)Materiales.        | 95  |
| Figura 57. | Distribución espacial de la energía depositada por los rayos delta alrededor de traza producida por la partícula en un sólido. | 115 |

## LISTA DE FIGURAS (Continuación)

|                                                                                                                              | <u>Página.</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Figura 58. El mecanismo de punta de explosión iónica para la formación de trazas en sólidos inorgánicos.                     | 118            |
| Figura 59. Se muestran trazas nucleares producidas por partículas ionizantes en diferentes materiales grabados químicamente. | 125            |
| Figura 60. Geometría de la traza con $V_t$ y $V_g$ constantes.                                                               | 126            |
| Figura 61. Geometría de la traza variando $V_t$ .                                                                            | 128            |
| Figura 62. Cálculo de la secuencia de la formación de trazas en obsidiana, para fragmentos de fisión (Fleischer, 1969b).     | 129            |

## LISTA DE TABLAS

|             |                                                                                                                                                   | <u>Página.</u> |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Tabla I.    | Características de algunos métodos de conteo.                                                                                                     | 11             |
| Tabla II.   | Efectos de foto-oxidación en trazas de partículas.                                                                                                | 21             |
| Tabla III.  | Parametros optimos para grabado del "soda lime glass".                                                                                            | 24             |
| Tabla IV.   | Materiales estudiados como posibles detectores por trazas.                                                                                        | 33             |
| Tabla V.    | Materiales orgánicos usados como detectores y sus condiciones de grabado.                                                                         | 35             |
| Tabla VI.   | Lista de materiales más comúnmente usados como DTS.                                                                                               | 36             |
| Tabla VII.  | Características del generador de alto voltaje y alta frecuencia.                                                                                  | 47             |
| Tabla VIII. | En esta tabla, se muestran los diferentes métodos de conteo empleados. Estas se pueden dividir en generaciones en base a la tecnología utilizada. | 51             |
| Tabla IX.   | Respuesta de los CR-39 de la Pershore Moulding Ltd.                                                                                               | 64             |
| Tabla X.    | Condiciones para el tratamiento del CR-39 (Pershore Moulding, 32 h de moldeo), para medición de radón intramuros.                                 | 65             |
| Tabla XI.   | Respuesta de diferentes materiales al paso del radón.                                                                                             | 69             |
| Tabla XII.  | Medición de salón A-22 del IFUNAM a lo largo de 5 años.                                                                                           | 73             |
| Tabla XIII. | Medición de superficies contaminadas con partículas alfa.                                                                                         | 81             |
| Tabla XIV.  | Comparación de medidas de contaminación alfa en diferentes puntos de una instalación.                                                             | 82             |

## LISTA DE TABLAS (Continuación)

Página.

|            |                                                                            |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla XV.  | Mediciones de áreas contaminadas mediante diferentes métodos de detección. | 82  |
| Tabla XVI. | Relación de modelos existentes.                                            | 123 |



## DETECTORES POR TRAZAS EN SOLIDOS METODOLOGIA Y DESARROLLO

### I. INTRODUCCION

La tesis "*DETECTORES POR TRAZAS EN SOLIDOS, METODOLOGIA Y DESARROLLO*", está basada fundamentalmente en algunos de los trabajos de investigación desarrollados dentro del programa de *Aplicaciones de la Dosimetría*, que se han realizado en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Entre los objetivos principales de la tesis se tienen:

i) Caracterizar la respuesta de materiales plásticos (polímeros) a radiación alfa y su aplicación en la medición de radón ambiental y contaminantes transuránicos. (Espinosa *et al.* 1981b; Díaz *et al.* 1984; Espinosa *et al.* 1984a; Espinosa, 1991).

ii) Estudio de los efectos en materiales semiconductores, después de haber sido impactados por partículas nucleares cargadas y sometidos a procesos de desgaste mediante soluciones químicas con el fin de optimizar su desempeño como detectores. (Espinosa y Moreno. 1979; Espinosa *et al.* 1981a; Tommasino *et al.* 1984; Espinosa *et al.* 1994d).

iii) Calibración de las trazas formadas por las partículas nucleares en materiales de estado sólido y diseño de la instrumentación necesaria para su

caracterización y análisis de reproducibilidad, linealidad, sensibilidad y eficiencia. (Espinosa *et al.* 1982; Griffith *et al.* 1984; Somogyi *et al.* 1984; Guel *et al.* 1984; Espinosa *et al.* 1986b; Espinosa y Castaño. 1990; Viques *et al.* 1991; Espinosa *et al.* 1992; Espinosa, 1994).

El logro de estos objetivos requirió de la búsqueda y el desarrollo de las metodologías e instrumentación apropiadas para los Detectores por Trazas en Sólidos (DTS), como:

i) El estudio de la respuesta de materiales a los efectos de temperatura, campos de radiación gama y campos mixtos (Vargas. 1982; Tommasino *et al.* 1984; Espinosa *et al.* 1988).

ii) El efecto de la temperatura y concentraciones en las soluciones de pre-grabado y ataque final para la formación de trazas en los materiales de estado sólido (Raya, 1985; Espinosa y Gammage. 1993; Espinosa *et al.* 1994b; Espinosa *et al.* 1994c).

iii) Los efectos del alto voltaje y formas de onda a través de materiales poliméricos, para la producción de arborescencias, partiendo de una traza nuclear formada (Castaño y Espinosa. 1990; Espinosa y Castaño. 1991; Espinosa *et al.* 1991a).

iv) Asociado a estos estudios, se diseñó y construyó instrumentación específica. Versiones sucesivamente mejoradas de generadores de alto voltaje y alta frecuencia para el grabado electroquímico de las trazas (Espinosa y

Griffith, 1981b; Espinosa *et al.* 1992). Sistemas para el análisis y caracterización de las trazas formadas por la radiación ionizante y para el estudio de peculiaridades inherentes a cada material como detector (Espinosa *et al.* 1986b; Viques *et al.* 1991), y su posible aplicación en diferentes campos de la investigación y la tecnología (Espinosa *et al.* 1981a; Gamboa *et al.* 1984a; Gamboa *et al.* 1984b; Jacobson *et al.* 1984; Castillo *et al.* 1984; Espinosa *et al.* 1986a; Espinosa. 1990; Espinosa y Gammage. 1990; Espinosa y Ramos. 1992; Espinosa *et al.* 1994a; Borau *et al.* 1994; Mayer *et al.* 1994; Espinosa *et al.* 1994b).

Gran parte de estos trabajos se han realizado en colaboración con instituciones internacionales, como el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL, USA), Oak Ridge National Laboratory (ORNL, USA), Energia Nucleare e Energie Alternative (ENEA, Italia), entre otras.

La detección de radiación ionizante, por trazas en sólidos, es un tema de investigación "reciente", pues los primeros trabajos aparecieron en los albores de los años 70's, pero éstos fueron muy criticados y todavía en los años 80's se editaron un buen número de publicaciones donde se menciona que la "detección por trazas en sólidos no es factible", desalentando cualquier desarrollo a futuro. Debido a esto y a un muy fuerte empuje de los sistemas electrónicos de detección, los cuales requieren de un gran soporte tecnológico, los DTS se han desarrollado en países con tecnologías más modestas y la comunidad científica en este tema, es aún muy pequeña.

En México, antes de iniciar estos trabajos, no existía ningún grupo

desarrollando investigaciones en este tema.

El contenido de la tesis está distribuido de la siguiente manera:

En el Capítulo I, se plantean aplicaciones particulares y en función de ellas, las características que deben satisfacer los DTS y algunos parámetros exteriores que pueden influir en su respuesta como detectores de radiación ionizante.

En el Capítulo II, se analiza la formación de las trazas nucleares en materiales de estado sólido, en base a los tres pasos fundamentales en el proceso, que son: exposición a la radiación ionizante, revelado químico de la traza, y caracterización y lectura de las trazas. Se especifican los aspectos a considerar en la detección de radiación y la respuesta a diferentes tipos de partículas. Se definen los métodos para el uso de los diferentes materiales, y se hace un estudio de alcances y posibilidades de los DTS.

En el Capítulo III, se hace un análisis de los materiales posibles como detectores por trazas, describiendo el proceso experimental para la optimización de parámetros, y también se especifican las características de la instrumentación desarrollada para los DTS.

En el Capítulo IV, se muestran los resultados obtenidos en aplicaciones específicas de los DTS, donde se hace énfasis en la evaluación de radón intramuros y la determinación de perfiles y distribución de contaminantes de materiales radiactivos trasuránicos.

En el capítulo V, se hace un análisis de las aplicaciones de los DTS, así como sus perspectivas futuras en el campo de la ciencia y la tecnología.

Finalmente, en las conclusiones se resumen los aspectos relevantes de cada uno de los capítulos y los resultados generales.

En el apéndice se dan los aspectos básicos sobre la formación de trazas en materiales de estado sólido.

## II. METODOLOGIA

Como es sabido la formación de la traza en el material, tiene lugar debido a fenómenos físicos.

En este capítulo se describe el procedimiento por el cuál se hace evidente (ópticamente visible) la traza formada por la radiación ionizante incidente.

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

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

- I.- Exposición a la radiación ionizante.
- II.- Revelado químico de la traza.
- III.- Caracterización y lectura de la traza.

El diagrama de la figura 1, muestra los pasos de este proceso.



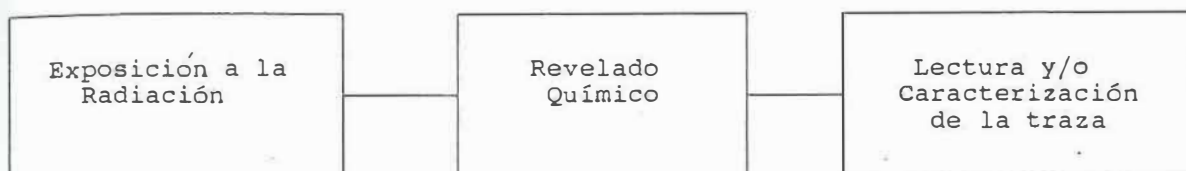


Figura 1. Diagrama a cuadros donde se muestran los pasos del método de detección por trazas en sólidos.

## II.1 Exposición del detector a la radiación ionizante.

Una de las características de los DTS es que sólo son sensibles a partículas alfa, protones, iones pesados y fragmentos de fisión, siendo ciegos básicamente a partículas beta, radiación gama y rayos X. Esta autodiscriminación en la detección, es una excelente característica para mediciones en campos de radiación mixtos.

Se han expuesto materiales detectores como el CR-39 (Allyl diglicol policarbonato) a campos de Mega-Roentgens de exposición gama, sin que se afecte el material o la medición. (Espinosa *et al.* 1987).

Así este primer paso consistirá en exponer el material detector a la radiación ionizante. Esta puede ser la radiación natural para mediciones ambientales o bien se puede exponer a radiaciones ionizantes en condiciones específicas para efectos de calibración, evaluación de parámetros, medición de contaminantes y en general medición de partículas.

Al exponer el material detector a la radiación, se "crea" la traza nuclear en el material, y permanece latente por cientos o miles de años, hasta que sea revelada esta traza, mediante un ataque químico. Se puede decir que en una gran cantidad de materiales expuestos a radiación ionizante, se encuentran trazas, esperando a ser "descubiertas" y caracterizadas.

## **II.2 Revelado por ataque químico (grabado químico).**

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.

Los parámetros básicos en este proceso de revelado son: características del material detector, tipo de solución química de grabado y concentración, temperatura de la solución de grabado y tiempo de permanencia en la solución. A este proceso se le llama grabado químico. (GQ).

En general, un recipiente con la solución y un baño de agua de temperatura controlada (baño maría) serán suficientes para este paso del proceso.

### II.3 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 10 y 100  $\mu\text{m}$ , 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 número nos dará una relación del número de partículas incidentes, y el tamaño del diámetro de la traza, medido en la superficie del material, nos indicará la energía de la partícula.

Para condiciones establecidas de grabado químico, que se describirán en otro capítulo, se puede obtener una eficiencia en la detección de más del 90%, y espectros de energía con resoluciones equivalentes a los sistemas de detección electrónicos (Raya, 1985; Segovia, 1978; Espinosa *et al.* 1984a)

Para la lectura de las trazas, se pueden tener gran diversidad de sistemas, algunos simples, como el utilizar una cámara de video asociada a un microscopio óptico y amplificar la señal en un monitor de televisión, otros más complejos basados en densitometría, otros en medición de imágenes y

actualmente los más avanzados por medio de digitalización de imágenes. En general, se puede considerar un proceso generacional en los sistemas de análisis y conteo, como se puede observar en la tabla I, donde se muestran, en forma secuencial los sistemas desarrollados con sus características básicas (Espinosa y Gammage. 1993).

Como se ve, se pueden tener sistemas semiautomáticos (Griffith *et al.* 1984), automáticos (Viques *et al.* 1991) y completamente automatizados, dependiendo de la aplicación, de los recursos y de la cantidad de lecturas por realizar en el tiempo.

Para incrementar la sensibilidad en el método de DTS, se pueden considerar dos pasos adicionales en el procedimiento:

A) Pre-grabado del material detector (Tommasino *et al.* 1984). Este paso consiste en someter el material a un desgaste o ataque químico previo a ser usado el detector. El proceso ayuda a eliminar las impurezas en la superficie del material, adquiridas en la fabricación, embalaje o transporte, así como cualquier "artefacto" (partícula no deseada), en las primeras capas de la superficie al interior del material, así como rasgaduras u otras marcas en la superficie del detector. También ayuda a eliminar las primeras micras de espesor del material, que por lo general tienen mayor rigidez mecánica, por ser las regiones que solidifican primero en el proceso de producción del material. Con este proceso se aumenta la sensibilidad hasta 10 veces y se disminuye el conteo de fondo del propio material.

Tabla I. Características de algunos métodos de conteo.

| SISTEMA                                        | OPERACION | LÍMITE INFERIOR<br>(Trazas/cm <sup>2</sup> ) | LÍMITE SUPERIOR<br>(Trazas/cm <sup>2</sup> ) | PRECISION | VELOCIDAD DE CONTEO |
|------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------|---------------------|
| Microscopio Óptico                             | M         | Fondo                                        | 10 <sup>3</sup>                              | 1%        | - - - -             |
| Lector de Microfichas                          | M         | Fondo                                        | 10 <sup>4</sup>                              | 1%        | - - - -             |
| Cuantímetro 720                                | S         | 1600<br>4000                                 | 5 x 10 <sup>4</sup><br>2.2 x 10 <sup>5</sup> | 2.5%      | min/cm <sup>2</sup> |
| Contador de Chispa                             | S         | Fondo                                        | 4 x 10 <sup>3</sup>                          | 10%       | min/cm <sup>2</sup> |
| Barrido Óptico de<br>Trazas Automatizado       | S         | Fondo                                        | 10 <sup>3</sup>                              | 1%        | hrs/cm <sup>2</sup> |
| Centelleo                                      | S         | 57                                           | 1530                                         | 5%        | min/cm <sup>2</sup> |
| Método de Barrido<br>Electrónico               | A         | Fondo                                        | 2 x 10 <sup>4</sup>                          | 1%        | min/cm <sup>2</sup> |
| Vitatrón                                       | S         | Fondo                                        | 10 <sup>3</sup>                              | 2%        | - - - -             |
| Vidimet                                        | S         | 10 <sup>2</sup>                              | 10 <sup>3</sup>                              | 2%        | - - - -             |
| Microscopio acoplado<br>a una microcomputadora | A         | Fondo                                        | 3 x 10 <sup>4</sup>                          | 1%        | seg/cm <sup>2</sup> |

M = Manual; S = Semiautomático; A = Automático

B) Grabado electroquímico: este grabado consiste en que una vez que se tiene la traza o cono formado en el material por el grabado químico, someter al material detector a un campo eléctrico de corriente alterna, dentro de una solución química conductora, formándose una arborescencia debida al rompimiento del dieléctrico, en este caso, el material semiconductor detector.

De esta forma, una traza grabada químicamente de aproximadamente  $10\text{ }\mu\text{m}$  de diámetro, se convertirá en una traza arborescente de 200 o 300  $\mu\text{m}$  de diámetro exterior, haciendo con ésto más facil la visualización y el conteo. La sensibilidad aumenta debido a que algunas trazas químicamente grabadas que no se hicieron visibles (en el rango de 5 a 10  $\mu\text{m}$ .), se explotan mediante la arborescencia, por lo que virtualmente se "observa" un número mayor de trazas grabadas electroquímicamente.

En la figura 2 se muestra un dibujo de la formación de arborescencias, así como fotografías de la traza antes y después del grabado electroquímico. A este proceso se le llama en general Grabado Electroquímico (GEQ).

De esta forma, con estos dos pasos en el método de detección, queda un proceso como se muestra en la figura 3.

Es interesante hacer notar que el proceso de pre-grabado químico, fue desarrollado y presentado internacionalmente por el proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría del IFUNAM en el año de 1983, y también se diseñaron cámaras y equipo electrónico (Espinosa *et al.* 1992; Espinosa y Gammage. 1993b) para producir el campo eléctrico con características muy particulares, para el proceso de grabado electroquímico que actualmente se usan en la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, Veracruz. Siendo éstas un prototipo para el proceso, como se verá posteriormente en la sección de instrumentación.

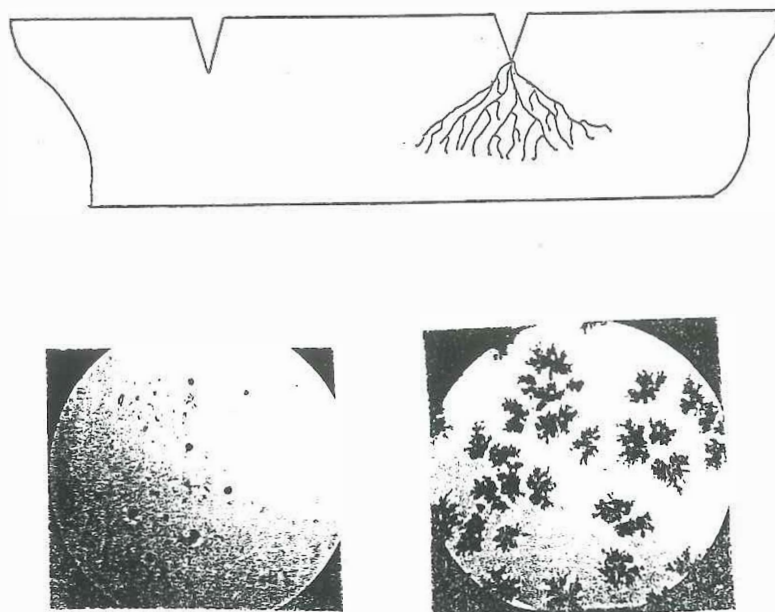


Figura 2. Formación de arborescencias

En el método de DTS, los procesos de grabado y tratamiento químico son muy importantes en la formación final de la traza nuclear, por lo que en los primeros años de investigación en el método, se trabajó en la optimización de los parametros y en su normalización (Khan *et al.* 1984 ; Tommasino *et al.* 1984), hasta obtener una "receta" que optimizara la respuesta del detector (Espinosa y Gammage. 1993).



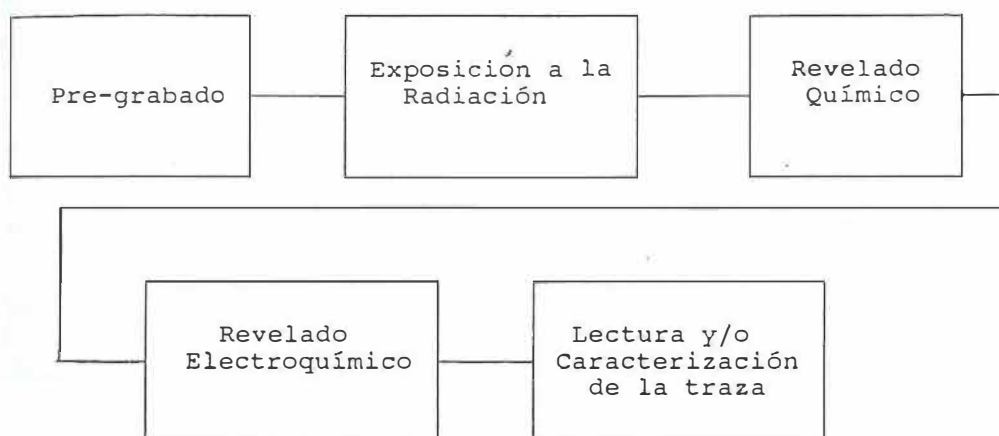


Figura 3. Diagrama ampliado del método para la detección por trazas en sólidos (DTS).

L. Tommasino en 1978, describió la metodología para el revelado de las trazas como "ciencia y/o ficción", pues una vez que se tiene la huella o traza en el material, debido al proceso químico, puede convertir en "mágico" todo el proceso, apareciendo y desapareciendo trazas, produciendo figuras cónicas, arboladas o figuras indescriptibles como se muestran en la figura 4.

#### II.4 Alcances y posibilidades del método de detección por trazas en sólidos.

Aun cuando el método de DTS es simple en su proceso, su alcance y posibilidades son muy amplias pues se pueden caracterizar los parámetros de

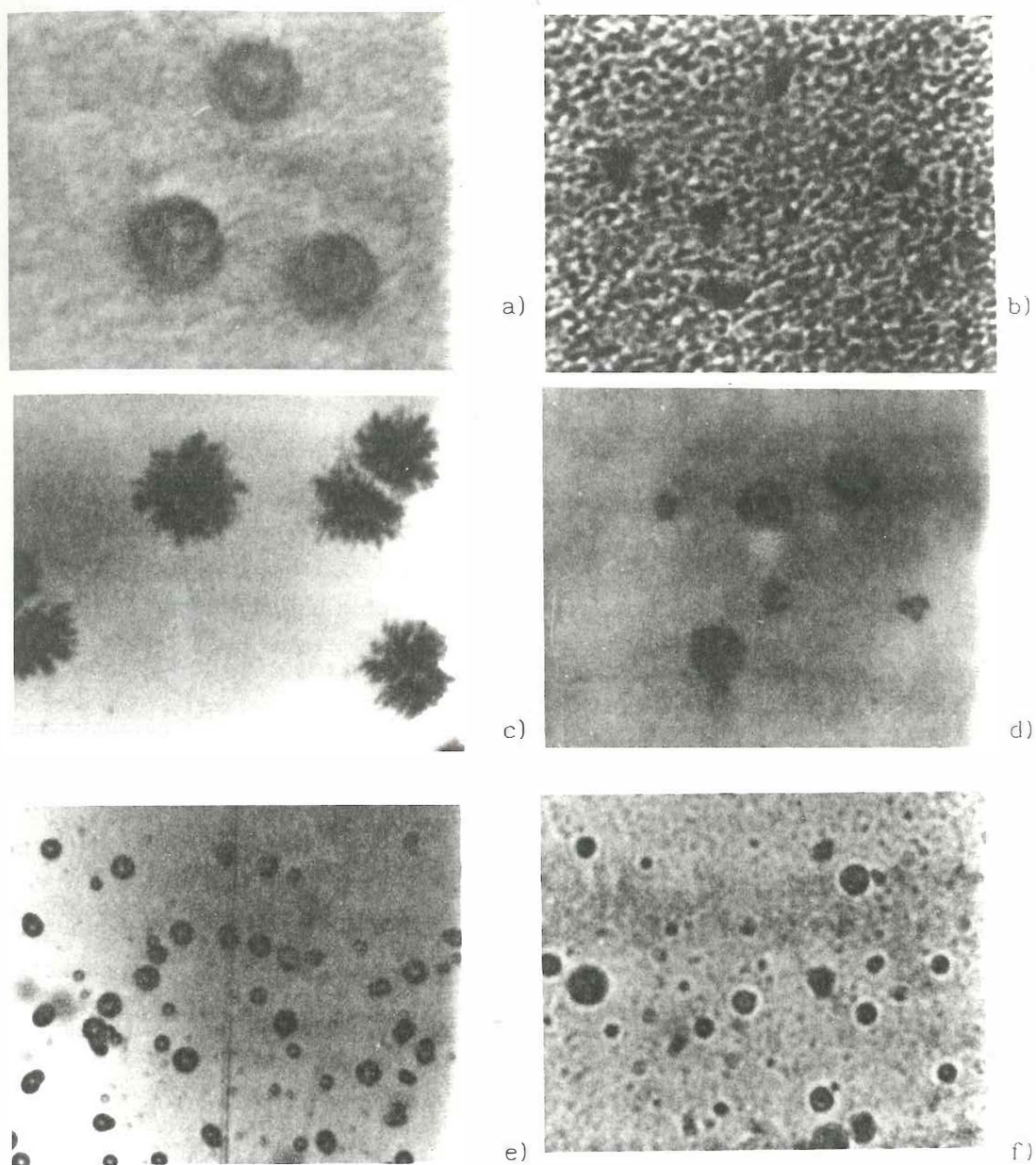


Figura 4. Fotografías de trazas de partículas alfa con diferentes procesos y materiales. a) Nitrato de celulosa a  $90^\circ$ , b) nitrato de celulosa a  $45^\circ$ , c) CR-39 sin pregrabado, d) CR-39 con pregrabado, e) Lexano con grabado químico. f) neutrones en Lexano.

las partículas ionizantes incidentes como: energía, y a partir de ésta, determinar el isótopo, masa y número atómico, esto es analizando la longitud de la trayectoria, el diámetro de la traza en superficie para condiciones específicas de grabado químico y midiendo la velocidad de grabado por sí misma.

También se pueden caracterizar parámetros del material detector como: movilidad electrónica, homogeneidad en las diferentes capas del espesor y porosidad, mediante la respuesta al daño.

Otro punto que ha sido básico, es la caracterización de los parámetros de revelado químico para cada uno de los materiales de detección. La optimización y normalización de las condiciones de revelado, tanto químico como electroquímico, ha sido un proceso que ha tomado tiempo, pues para cada material, las condiciones óptimas cambian, y los parámetros del propio grabado son múltiples también, así la combinación hace que las combinaciones tiendan a infinito. Finalmente se tiene el análisis de los parámetros de las trazas reveladas en el material, que nos van a dar la caracterización de los parámetros de las partículas ionizantes incidentes, tales como diámetro, perfil, longitud y simetría respecto al eje de la traza. Y la caracterización de respuesta de un material específico como detector de radiación, que debe de cumplir con los requisitos de reproducibilidad, linealidad, sensibilidad y eficiencia constante, requisitos primordiales en un buen detector de radiación. Este proceso se describe en la figura 5.

## REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LAS RELACIONES BASICAS EN DTES

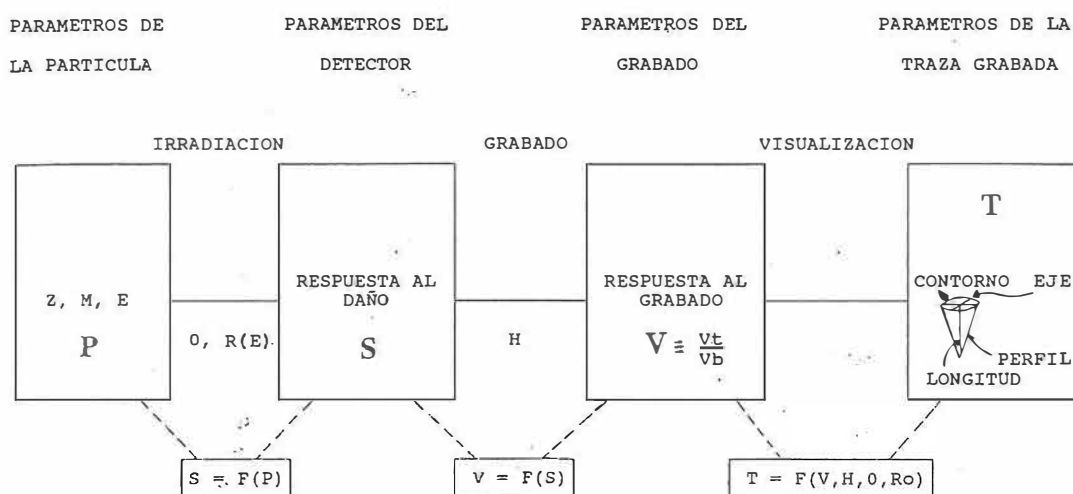


Figura 5. Se muestra la interdependencia de los pasos en el método de detección por trazas y sus posibilidades y alcances.

### II.4.1 Aspectos a considerar en la detección por trazas en sólidos

En la exposición a la radiación:

En este tema y en este trabajo consideramos sólo materiales detectores por trazas en sólidos (DTS). El ángulo de incidencia de la radiación en el material detector es muy importante, pues para ciertos ángulos el detector es ciego, como se muestra en la figura 6, (Khan *et al.* 1984; Espinosa *et al.* 1984a), y aún más, para una exposición de incidencia aleatoria, además de las zonas ciegas, se tendrán zonas para ángulos de incidencia de más de  $45^\circ$ , donde el revelado de la traza no se inicia en la superficie original del

material, sino a algunas micras de las capas inferiores, esto es debido, fundamentalmente a que la energía necesaria para producir una traza latente, se produce más allá de la superficie del material. Este efecto también se puede deber a la isotropía del material. Así, estas trazas en el proceso de grabado químico surgirán a diferentes tiempos, complicando el proceso de conteo y análisis.

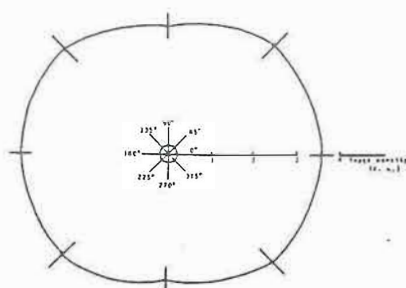


Figura 6. Respuesta angular de los DTS (variación de densidad de trazas con el ángulo de irradiación).

En general se pretenderá obtener perpendicularidad entre la partícula incidente y el material detector, es decir un ángulo de incidencia de  $90^\circ$ . Esto se logra mediante colimadores y máscaras entre el detector y la fuente radiactiva. Para cada caso se tendrá que hacer un cálculo de eficiencia de detección con condiciones similares a las de la medición.

#### II.4.2 Tipo de partícula.

Como se dijo anteriormente, los DTS sólo son sensibles a partículas que ionizan directamente y con masa mucho mayor a la del electrón. Esta autodiscriminación en la detección hace que los DTS sean bien aceptados en la medición de contaminación por alfas en campos intensos de partículas gama o beta.

Otros aspectos a considerar respecto a los materiales son los efectos ambientales, tales como efectos térmicos y mecánicos, donde la historia del material es importante. 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 7, muestra este efecto donde, debido a un esfuerzo mecánico del material se obtiene una colección de trazas indeseadas.

Efectos debidos a campos eléctricos y campos de radiación:

Se han observado efectos debidos a la presencia de campos eléctricos, en el momento de la exposición a la radiación (Crannell *et al.* 1969 y Blauford *et al.* 1970). Crannell encontró que las trazas de partículas alfa en nitrato de celulosa se hacen más grandes, si al material se le aplica un campo eléctrico, y Blanford observó que la sensibilidad del Lexano (policarbonato) aumentaba con la presencia de arcos eléctricos alrededor del material, al



momento de exponerlo a la radiación ionizante. En ambos casos existe la presencia de ozono, por lo que no se definió a que agente se debió el cambio, si al campo electrico o al ozono.

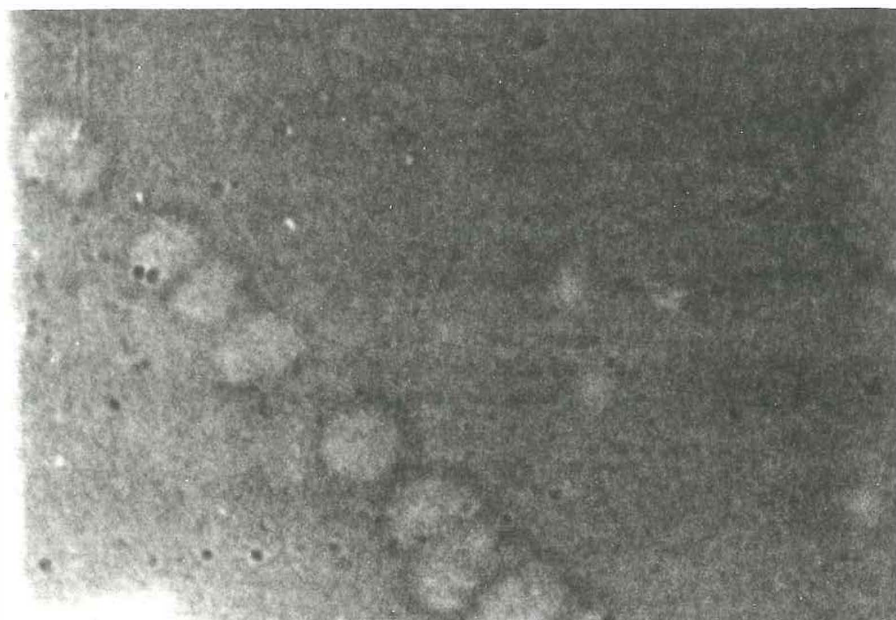


Figura 7. En la fotografía, se muestra el efecto de la tensión mecánica en un material detector, produciendo cadenas de trazas indeseadas.

Crawford en 1968, e independientemente Benton y Hanke en 1969, encontraron que al someter el lexano a rayos UV de aproximadamente  $3100 \text{ \AA}$ , la sensibilidad del material mejoraba. Esto se debe, básicamente a la foto oxidación, por lo que otros autores sometieron diferentes materiales detectores a radiación ionizante en presencia de ambientes enriquecidos de oxígeno y UV, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla II.



Tabla II. Efectos de foto-oxidación en trazas de partículas.

| MATERIAL                   | EXPOSICION                         | EFEECTO                                                       | REFERENCIA                                            |
|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Nitrato de Celulosa        | O <sub>2</sub> + UV                | Se incrementa la sensibilidad                                 | Henke et al. (1970)                                   |
| Policarbonato              | O <sub>2</sub> + UV                | V <sub>i</sub> se incrementa<br>máximo incremento a 3040 Å    | Crawford et al. (1968)<br>DeSorbo and Humphrey (1970) |
| Policarbonato              | O <sub>2</sub> + UV                | V <sub>i</sub> se incrementa<br>máximo incremento a 3130 Å    | Henke et al (1970)                                    |
| Policarbonato              | N <sub>2</sub> O + UV              | V <sub>i</sub> decrece                                        | DeSorbo and Humphrey (1970)                           |
| Policarbonato              | NO + UV                            | V <sub>i</sub> se incrementa                                  | DeSorbo and Humphrey (1970)                           |
| Policarbonato              | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + UV | V <sub>i</sub> se incrementa<br>Se incrementa la sensibilidad | Caputi end Crawford (1970)<br>Henke et al. (1970)     |
| Polietileno<br>Tereftalato | O <sub>2</sub> + UV                | Se incrementa la sensibilidad                                 | Henke et al (1970)                                    |

En el laboratorio de IFUNAM, en 1987 se expuso material CR-39 a partículas alfa, sometido este material a rayos UV y en presencia de oxígeno, encontrándose un aumento de sensibilidad similar al del pre-grabado. También se sometió el CR-39 a un campo de 50 KV y se expuso a partículas alfa, no obteniendo un resultado cuantificable.

Debido a que el principal objetivo de los trabajos está encaminado a la aplicación tecnológica de los detectores, intentando ser competitivos con otros métodos de detección electrónicos o químicos, el someter a los materiales a condiciones particulares externas queda fuera de nuestros objetivos.

### II.4.3 Revelado de la traza.

Para considerar el tipo de revelado de la traza, es necesario conocer el material detector. En este trabajo nos centraremos en el grabado de los materiales usados más comúnmente en el IFUNAM.

Básicamente se considerará en este trabajo el grabado para vidrio, Lexano y CR-39, siendo este último, el empleado en el IFUNAM. (La patente del uso del CR-39 para medición de radón, junto con el dispositivo, están en trámite).

Para llegar a la optimización de parámetros de grabado, se requirió mucho tiempo y mucho esfuerzo tanto localmente como internacionalmente, pues debido a la gran variedad de materiales que se usaron en los años 70's y 80's, y al gran número de variables a manejar, cada laboratorio produjo "su propia receta", diferente a las otras "recetas", haciendo que los resultados no se pudieran comparar. No fue sino hasta el año de 1983, cuando se decidió normalizar los parámetros de grabado químico y grabado electroquímico. Durante este tiempo, trabajos como el de Sohrabi (1978), realizado en el ORNL fueron muy importantes para modular a los demás autores.

### II.5 Uso de vidrio, Lexano y CR-39 como DTS.

Uso de vidrios portaobjetos (soda lime glass) como DTS.

Uno de los primeros materiales usados como detector, fueron los "portaobjetos" de vidrio, usados en microscopía, resultando excelentes detectores de fragmentos de fisión (Raya. 1985; Segovia. 1978). El solvente ideal para este material, es el ácido fluorhídrico (HF).

En concentraciones al 4% para obtener tiempos de grabado del orden de minutos, en la figura 8, se muestra la respuesta del vidrio portaobjetos (VPO) para microscopio como material detector, a diferentes concentraciones de HF.

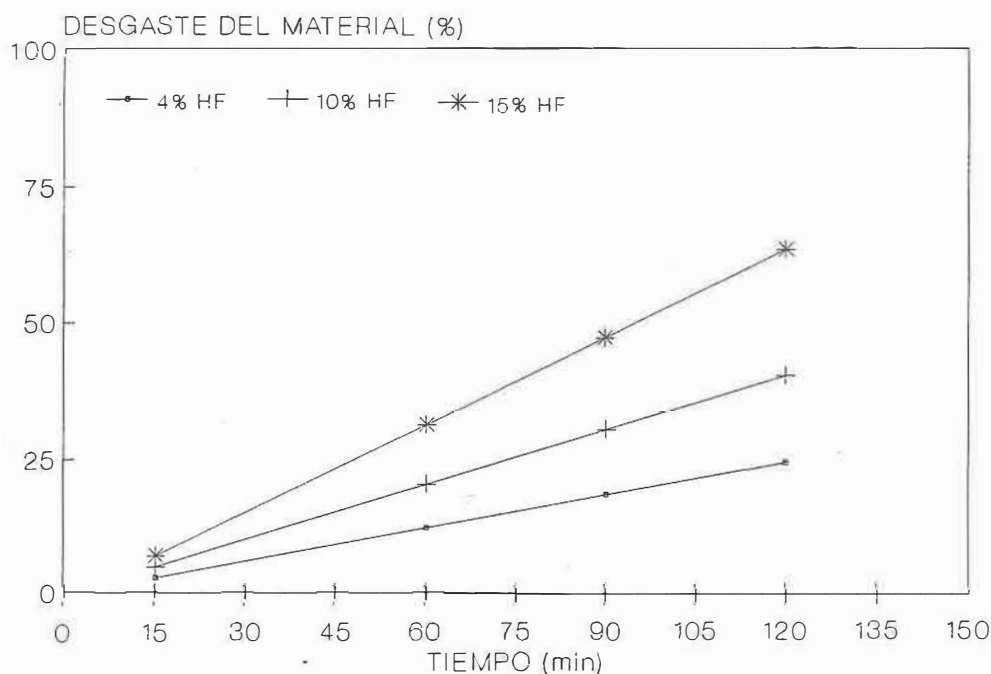


Figura 8. La figura muestra la respuesta del "soda lime glass", para diferentes concentraciones de HF.

Otra respuesta importante del vidrio portaobjetos, es la de  $V_t/V_g$  que se muestra en la figura 9.

De esta forma se encontraron los parámetros óptimos para vidrios portaobjetos mostrados en la tabla III.

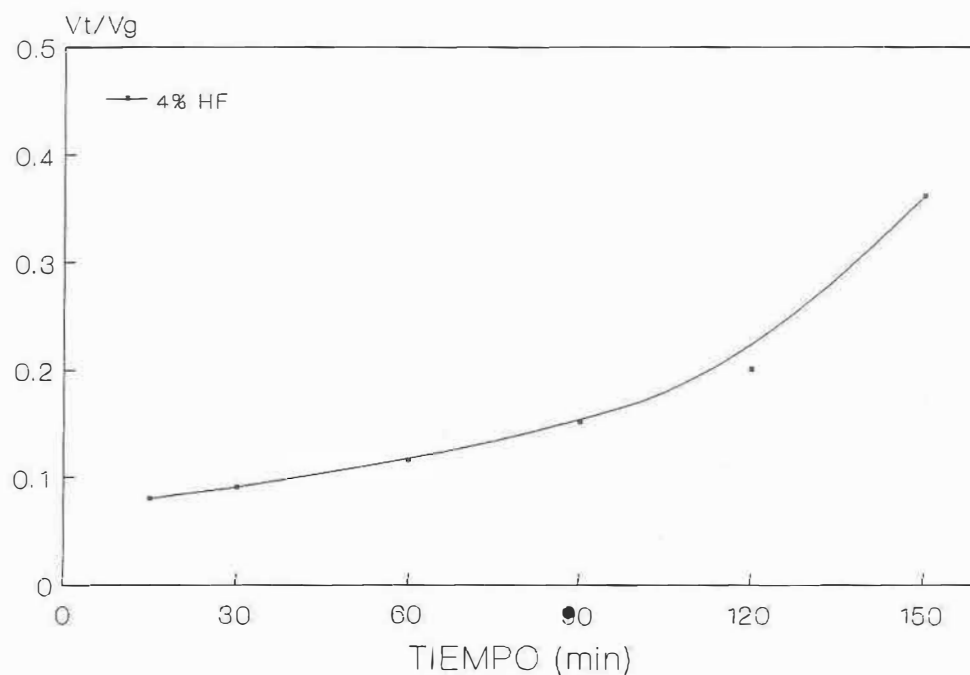


Figura 9. Velocidad de grabado para el "soda lime glass".

Tabla III. Parámetros óptimos para grabado del "soda lime glass".

|                |                         |
|----------------|-------------------------|
| Solución:      | ácido fluorhídrico (HF) |
| Concentración: | 10%                     |
| Tiempo:        | 15 min                  |
| Temperatura:   | 25 ° C                  |

Uso del Lexano usado como detector:

Originalmente los esfuerzos para encontrar nuevos materiales fueron hechos en minerales, pero en la década de los 60's se encontró que los polímeros eran excelentes DTS, con respuesta a mucho más bajas energías. Así el Lexano, usado básicamente como un material de blindaje y protección, se convirtió en uno de los materiales más valiosos como detector por trazas.

La empresa Bayer (Alemania), produjo su propio material denominado Macrofoil. Las condiciones de grabado químico fueron obtenidas para Lexano los datos experimentales se muestran en la figura 10.

Uso del CR-39 (Policarbonato) como detector:

A principio de la decada de los 80's, se descubre que el CR-39, empleado en óptica y en la industria aeronáutica es el "gran" detector de partículas alfa con muy amplia respuesta a la energía, entre los 0.3 y 13 MeV. Así este material se convirtió en el más usado de los detectores. En la figura 11, se muestran las fórmulas químicas del CR-39. En general, los polímeros desplazaron a los minerales como detectores.

Las condiciones de grabado, fueron obtenidas de los experimentos y datos mostrados en la figura 12 (Sohrabi y Shirazi. 1984).

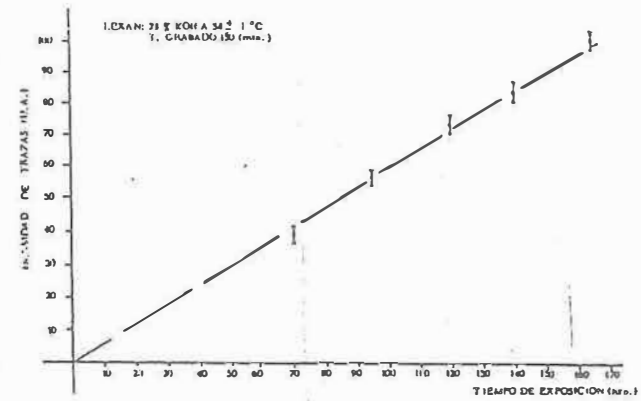
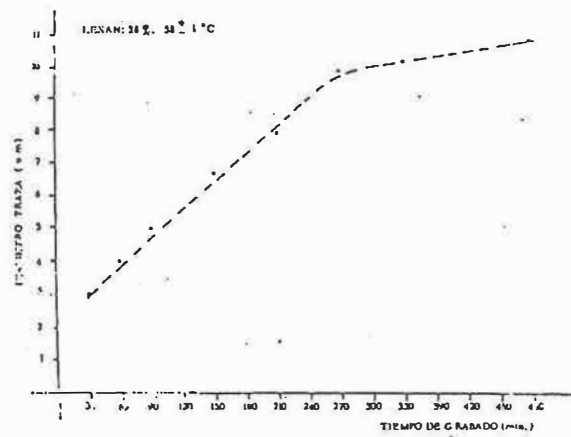
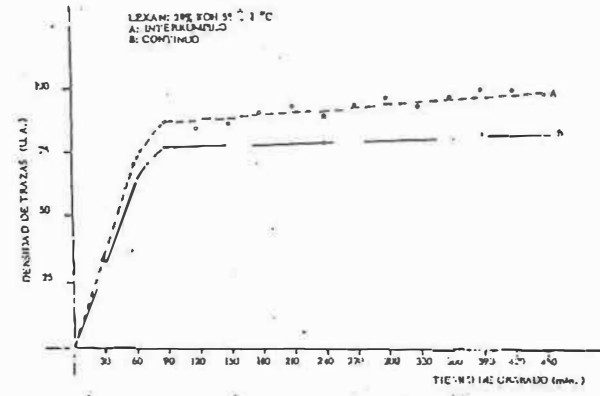
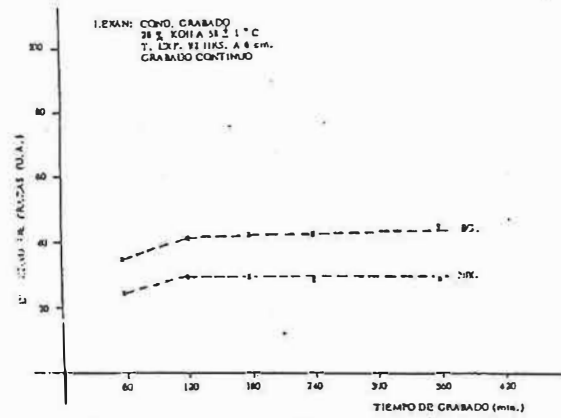


Figura 10. Gráficas de respuesta del Lexano a neutrones.



## Alyll Diglycol Policarbonato

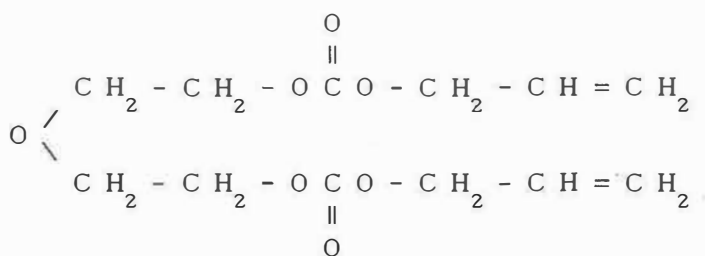
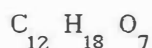


Figura 11. Fórmulas químicas del CR-39.

Finalmente, se estableció el método para el CR-39 como sigue:

Se ha seleccionado el CR-39 de la compañía Pershore Moulding Ltd, de Inglaterra, por considerar (mediante experiencias), que es el material que satisface mejor los requisitos de uniformidad en espesor, reproducibilidad de respuesta, fácil manejo, bajo fondo de trazas, alta sensibilidad. En la actualidad existen cinco compañías que producen este material para fines de investigación, y estas son:

- a) Pershore Moulding Limited (inglesa).

b) American Acrylics and Plastic Inc. (norteamericana)

c) Fukuvi Chemical Ind. Co. LTD (japonesa).

d) Dataqua System (húngara).

e) Universidad de Bristol (inglesa).

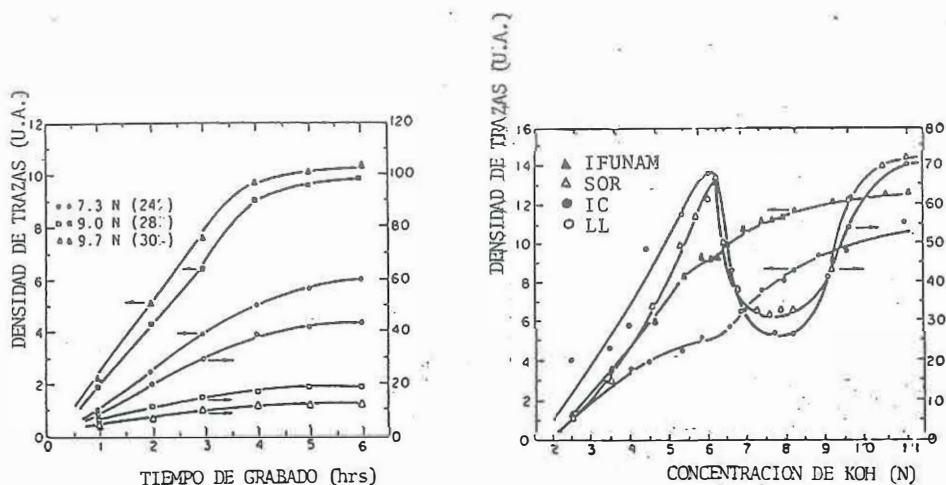


Figura 12. Respuesta del CR-39.

En México, se usa CR-39 en la industria de la óptica, pero no reúne las características para uso en investigación.

Ha sido un reto el mejorar y producir este material, desafortunadamente no existe el uso masivo adecuado en investigación de este material, así, sólo los ingleses y los japoneses actualmente lo comercializan al menudeo.

La Pershore, ofrece varios tipos de cualidades de material detector. En

el capítulo de resultados, se muestran las características de respuesta y eficiencia de algunos, comparándolos con el CR-39 japonés y norteamericano.

Las características para el método de DTS para el grabado químico, se establecen:

a) Pre-grabado químico:           KOH  
                                          6N  
                                           $60^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$

(tiempo de pre-grabado = 5 horas. Con esto se remuevan  $10\text{ }\mu\text{m}$  aprox).

b) Grabado químico:               KOH  
                                          6N  
                                           $70^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$

(tiempo de grabado variable entre 5 y 20 horas, dependiendo del diámetro deseado de la traza).

c) Grabado electroquímico:       KOH (lado por grabar)  
                                          NaCl (lado no grabable)  
                                          Campo eléctrico 30 KV/cm  
                                          Frecuencia 2 KHz.  
                                          Señal senoidal.

(tiempo de grabado variable, dependiendo de la aplicación y el tamaño de traza deseada, entre 2 y 15 horas).

En la figura 13, se muestran las respuestas del grabado electroquímico para diferentes condiciones.

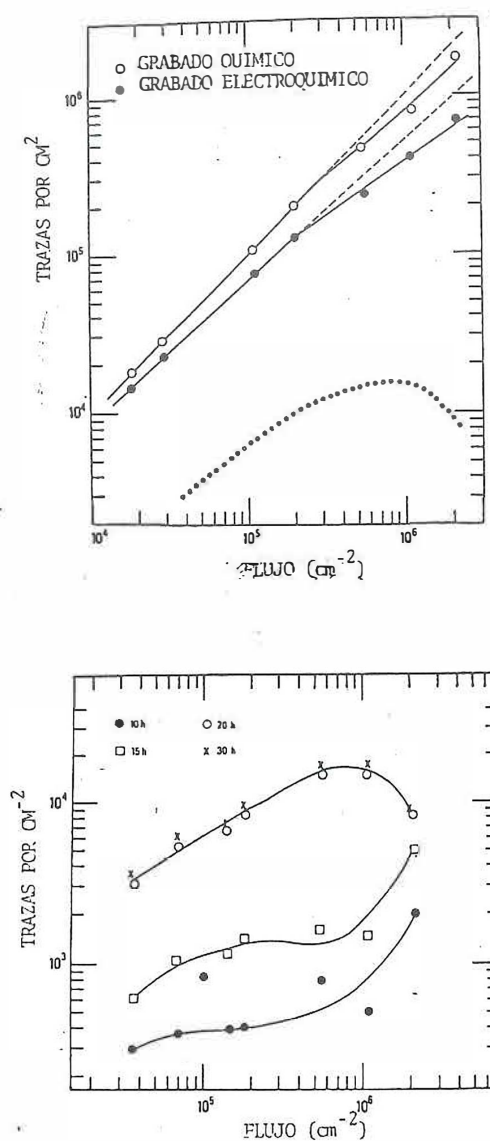


Figura 13. Respuesta del grabado electroquímico del CR-39.

Estas características del método de grabado se dan también en la referencia (Espinosa *et al.* 1984a)

Una vez establecidas las características óptimas para el grabado, en el siguiente capítulo veremos los materiales empleados y la instrumentación empleada.

### III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

En la metodología de Detección por Trazas en Sólidos (DTS), lo más importante podemos decir es el material detector. Cuando se descubre la formación y revelado de trazas en los 60's la tendencia fue hacia los materiales inorgánicos, debido fundamentalmente al uso de minerales en emulsiones, método muy común para la medición de trayectorias y otras características de las partículas en colisiones atómicas, posteriormente se encontró una excelente respuesta en materiales como celulosa y en los policarbonatos. Actualmente los polímeros son los más empleados, dando una respuesta a la detección de la radiación con alta sensibilidad, eficiencia y precisión.

Asociado al material, tenemos la solución en que se debe sumergir el detector para su desgaste (solución de grabado). A continuación, en la tabla IV, se muestra una lista de los materiales estudiados y las características de la solución para grabado.

En este caso se trabajó con los materiales anteriores, y sólo en el vidrio de silicio y en el "soda lime glass" (portaobjetos) se han encontrado trazas medibles dando como resultado la producción de una tesis "Optimización de los parámetros de fisión del Cf-252, obtenido con DTS".

### III.1 Materiales inorgánicos.

Tabla IV. Materiales estudiados como posibles detectores por trazas

|                                                                        | Solución de grabado, concentración, temperatura y tiempo recomendado. |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Mica (moscovita)                                                       | 20%, HF, 12 min, 40°C.                                                |
| Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )                                             | 38%, HF, 12-20 hrs, 30°C.                                             |
| Obsidiana (volcánica)                                                  | 38%, HF, 3-5 hrs, 30°C.                                               |
| Vidrio de silicio                                                      | 38%, HF, 10 min, 20°C.                                                |
| Soda lime glass<br>(vidrio porta objetos)                              | 38%, HF, 10 min, 20°C.                                                |
| Rubí (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 38%, HF, 5 hrs, 45°C.                                                 |
| Zafiro (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :TiFeO <sub>3</sub> )           | 38%, HF, 8 hrs, 45°C.                                                 |
| Apatita (Ca(CaF)(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )                      | 38%, HF, 4 hrs, 45°C.                                                 |
| Olivina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Mg <sub>2</sub> )             | 38%, HF, 3 hrs, 45°C.                                                 |

En la figura 14, se muestran algunas gráficas que llevaron a la optimización de parámetros.

En general los detectores inorgánicos responden a partículas muy energéticas como los fragmentos de fisión (más de 60 MeV) pero son muy poco sensibles a energías de menos de 10 MeV, por lo que en los 80's, los detectores con materiales orgánicos fueron usados. Siendo los más comunes el acetato y el nitrato de celulosa, por su fácil adquisición.



En la tabla V, se da una lista de los materiales que fueron usados y sus condiciones de grabado.



Figura 14. Gráficas de optimización de parámetros para los DTS.

A mediados de los 80's y después de haber experimentado todo mundo con todos los materiales comerciales posibles, la selección se redujo a los más sensibles y los que reunieran las características para aspectos de dosimetría y aplicaciones donde se requiere reproducibilidad, alta eficiencia de detección y linealidad. Así, con la aparición del CR-39 en 1981 como material comercial para detección de radiación ionizante, quedaron los materiales mostrados en la tabla VI.

### III.2 Materiales orgánicos.

Tabla V. Materiales orgánicos usados como detectores y sus condiciones de grabado.

|                                                       | Solución de grabado, concentración, temperatura y tiempo recomendado. |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Acetato de celulosa<br>(Kodacel, Triafol)             | 6N, KOH, 60°C, 30 min.                                                |
| Nitrato de celulosa<br>(Daicel)                       | 6.5 N, NaOH, 70°C, 3 min.                                             |
| Butirato de celulosa<br>(Triafol B)                   | 6.5 N, NaOH, 70°C, 5 min.                                             |
| Triacetato de celulosa<br>(Kodacel TA401, Triafol TN) | 6.5 N, NaOH, 40°C, 9 min.                                             |
| Cormofenol (Fenoplastic)                              | 6.5 N, NaOH, 60°C, 60 min.                                            |
| Policarbonatos<br>(Lexano, Makrofol, Kimfol)          | 6N, KOH, 60°C, 20 min.                                                |
| Policarbonato (CR-39)                                 | 6N, KOH, 70°C, 5 hrs.                                                 |
| Nitrato de celulosa (LR-115)                          | 10% wt, NaOH, 60°C, 5 hrs.                                            |

Se intentaron otros materiales comerciales en México, como:

|                |                        |
|----------------|------------------------|
| M3 Acetato     | 6N, KOH, 60 C, 15 min. |
| Acetato Xerox  | 6N, KOH, 60 C, 9 min.  |
| Mica adhesiva  | 6N, KOH, 60 C, 3 hs.   |
| Película Kodak | 6N, KOH, 60 C, 5 hs.   |

En la figura 15, se muestra la respuesta de estos materiales a diferentes concentraciones de solución y a diferentes tiempos de grabado.

Tabla VI. Lista de materiales más comúnmente usados como DTS.

#### INORGANICOS

- Soda Lime Glass.
- Apatita.
- Obsidiana

#### ORGANICOS

- Acetato de Celulosa (LR-115, Kodak).
- Lexano.
- Makrofol.
- CR-39
  - Pershore Moulding Limited, UK.
  - American Acrylics, USA.
  - Fukuvi - Bariotrack, JAPON.

Como se menciona en el otro capítulo, estos estudios y análisis de respuesta a la radiación ionizante de materiales se hicieron al inicio del proyecto de Detectores por Trazas en Sólidos, para obtener los parámetros óptimos para la identificación y cuantificación de las trazas.

Como se puede ver en la figura 15, al aumentar la concentración de la solución en general, se aumenta la velocidad del desgaste del material. Así se debe encontrar la concentración para la cual la traza se forma en un tiempo "manejaable" y la traza no desaparece debido a un desgaste incontrolado. Para cada material, la concentración puede ser diferente.

#### III.2.1 Tiempos de grabado.

Otro parámetro a seleccionar, es el tiempo de grabado, el diámetro de la traza se aumentará con mayor tiempo de estancia del detector en la solución. En la figura 16, se muestra el efecto del tiempo de grabado y del tipo de solución por sí misma.

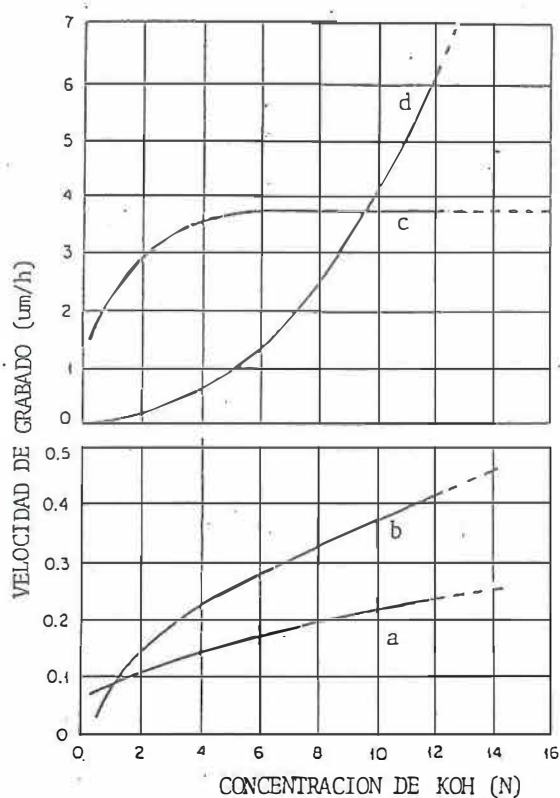


Figura 15. En la figura se muestra la relación de grabado para diferentes concentraciones de la solución para: a) acetato de celulosa, b) butirato de celulosa (azul), c) nitrato de celulosa y d) policarbonato (CR-39).

### III.2.2 Respuesta a la energía.

Otra importante consideración del material, es su respuesta a la energía. En la figura 17, se muestra la respuesta del Lexano, midiendo el diámetro de la traza para partículas alfa de diferentes energías y para diferentes tiempos de grabado.

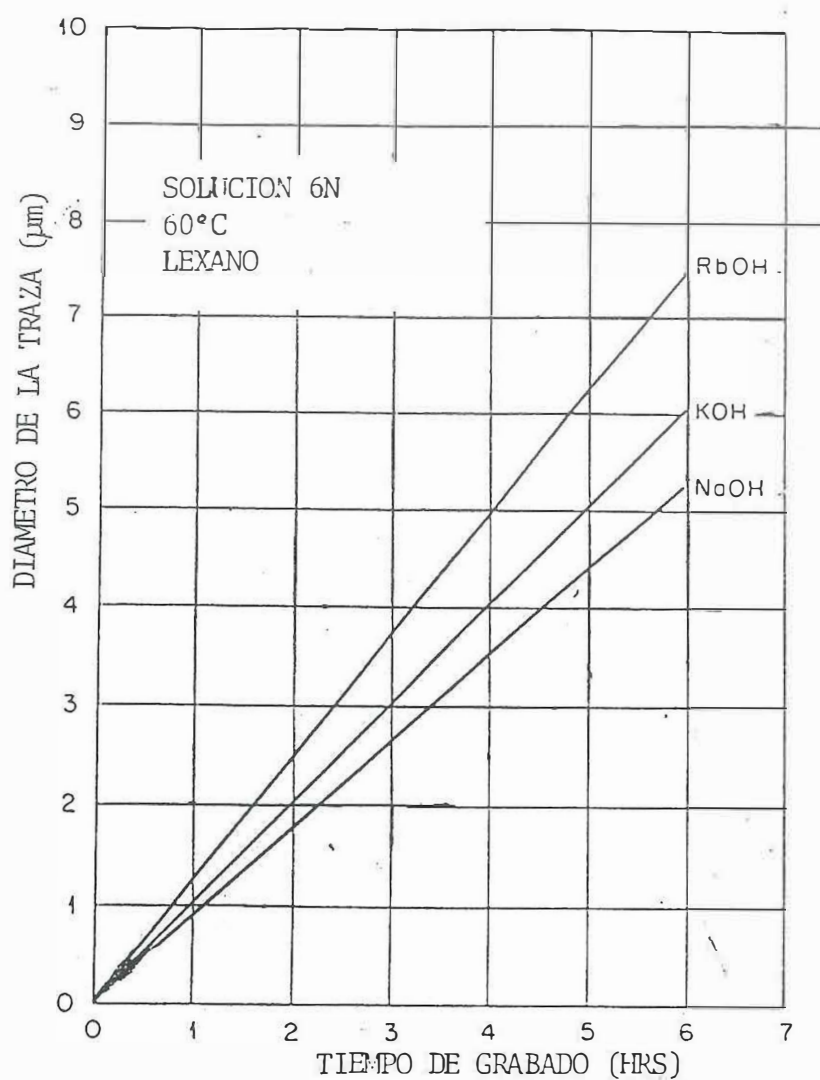


Figura 16. Respuesta del tiempo de grabado vs. diámetro de la traza para tres diferentes solventes.

De esta forma, la eficiencia de detección para un proceso dado de grabado, cambiará con la energía de la partícula incidente. En la figura 18, se muestra la respuesta del CR-39 para diferentes energías.

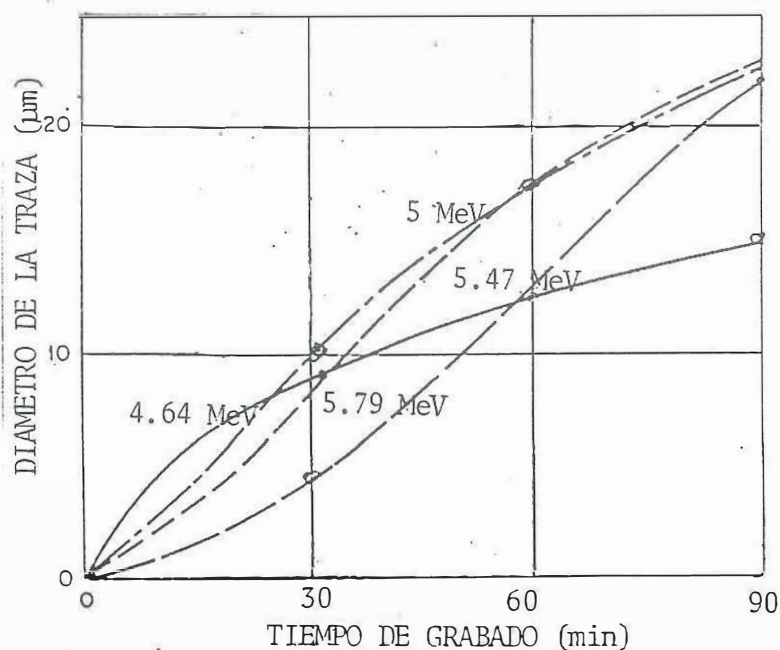


Figura 17. En la figura se muestra la respuesta del Lexano a partículas alfa de diferentes energías, para tiempos de grabado de 0 a 90 minutos.

Otro posible experimento que se presenta respecto a la energía de la partícula incidente es la pérdida de la formación, o de la traza en sí, debido a un desgaste químico mayor que el de la máxima profundidad de la traza formada por la radiación ionizante. Esto es, si se dan tiempos prolongados de grabado, se pueden perder las trazas formadas en la superficie y disminuir el número observado, o bien, aumentar debido a otras trazas formadas en otros niveles. En la figura 19, se muestra este fenómeno para celulosa y en la figura 20 para CR-39.

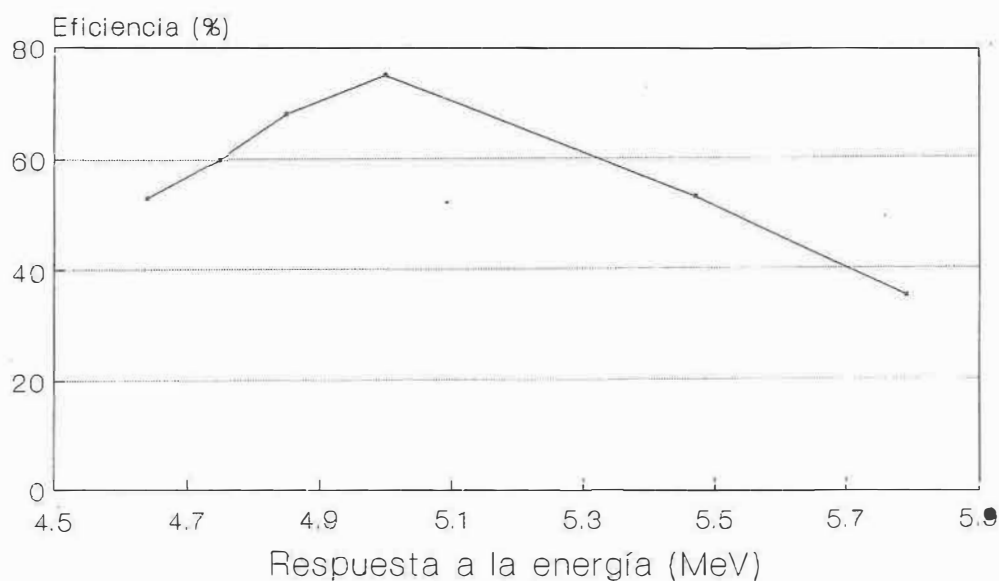


Figura 18. En la figura se muestra la eficiencia de detección del CR-39 para diferentes energías, con el mismo proceso de grabado en todos los casos.

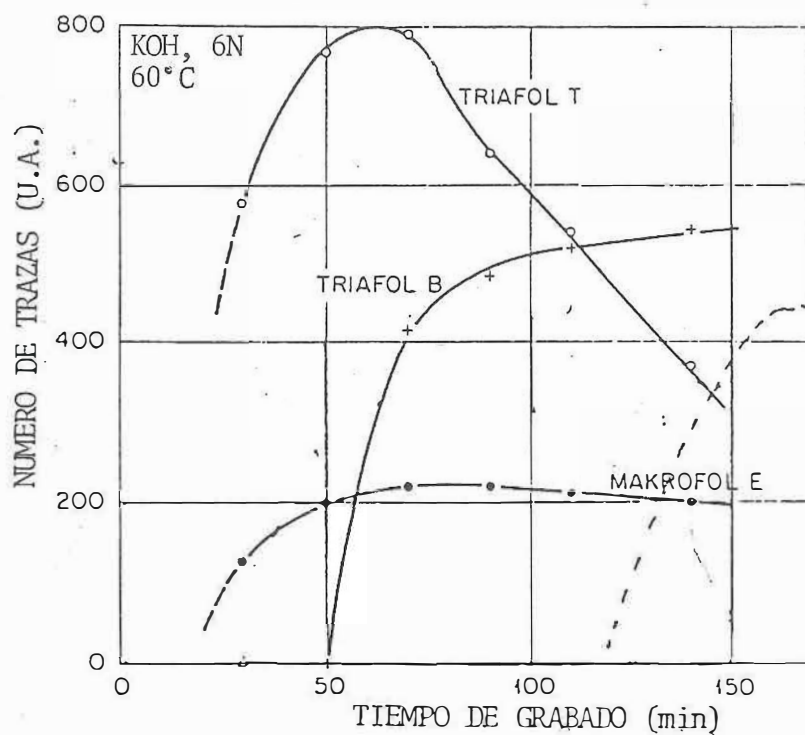


Figura 19. En la figura se muestra el número relativo de trazas visibles en varios materiales en función al tiempo de grabado químico.



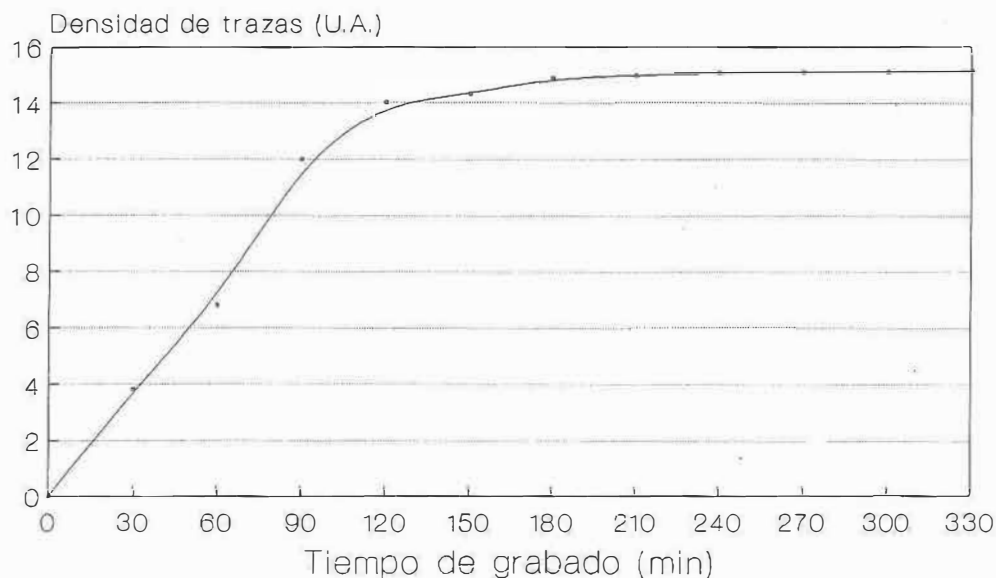


Figura 20. En la figura se muestra el número relativo de trazas visibles en CR-39 en función al tiempo de grabado químico.

### III.2.3 Respuesta a la temperatura.

De las variables antes mencionadas, la más importante y que más se tiene que controlar, es la temperatura de la solución de grabado, pues unos cuantos grados de variación en la solución, modifican grandemente la formación de trazas. En la figura 21, se muestra la respuesta de la velocidad de grabado o desgaste para CR-39 vs. la temperatura de la solución de grabado (KOH, 6N).

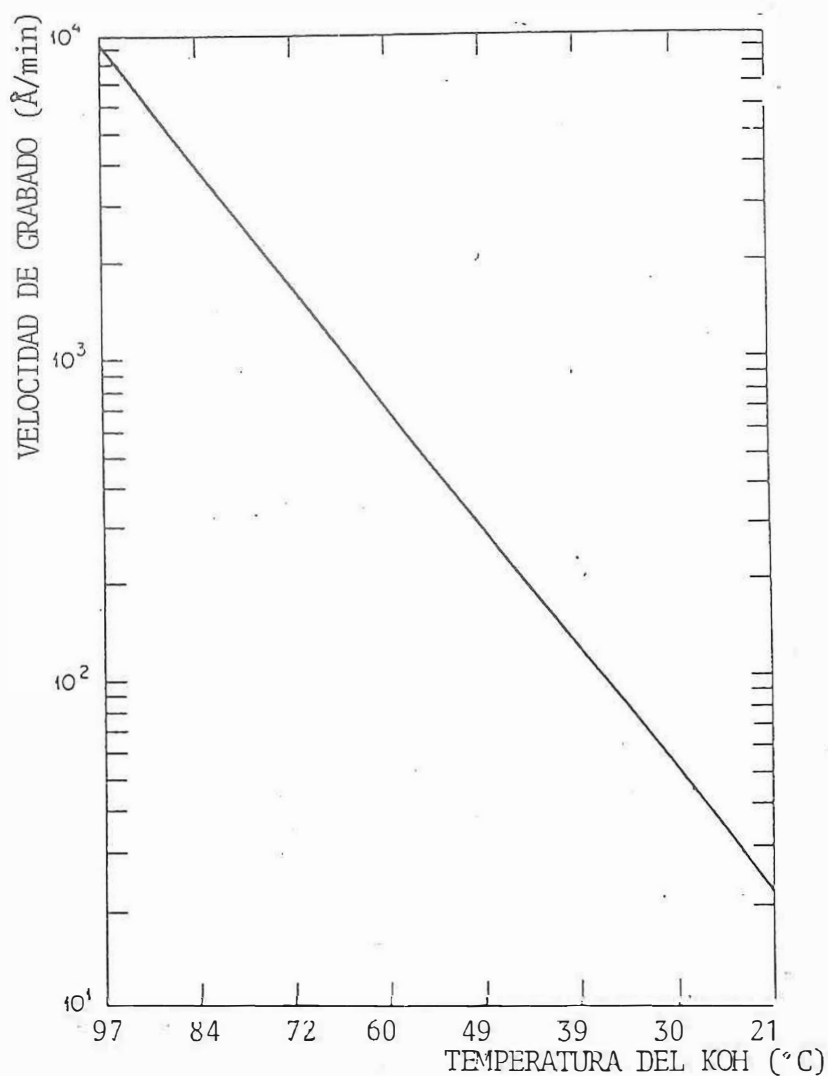


Figura 21. En la figura se muestra la respuesta de la velocidad de grabado vs. la temperatura de la solución (KOH, 6N).

Así, el sueño de tener un material con respuesta óptima para cada energía, alta sensibilidad y no requerir de condiciones especiales para el

grabado químico, queda sólo en sueños cuando se tienen que considerar todas las variables anteriores. En el área de materiales, se tiene que trabajar mucho más, pero desafortunadamente los grupos de investigación dedicados a la producción de nuevos materiales, tienen otros objetivos y las compañías privadas, no encuentran el mercado de los DTS atractivo.

Todos los materiales usados en la actualidad para investigación o mediciones, tienen aplicaciones comerciales muy importantes, como es el caso del CR-39, que se utiliza en óptica para hacer lentes y en la industria aeronáutica como ventanas transparentes en aviones o naves espaciales.

Por otro lado, el costo del material es muy barato, lo que lo hace muy atractivo como detector de radiación, pero poco atractivo para la producción.

En México, se intentó su producción como detector de radiación en 1981, pero no se logró tener la calidad requerida para investigación, como es la de un bajo fondo de trazas y uniformidad en la producción, problema que presentan la mayoría de las marcas comerciales todavía en la actualidad.

Aún para el mismo tipo de material detector producido por diferentes compañías, se tiene diferente respuesta a la misma fuente radiactiva, como se muestra en la figura 22. La eficiencia a partículas alfa de la misma energía (misma fuente radiactiva), pero para diferentes CR-39's varía desde 55% para uno, hasta 87% para otro, siempre con el mismo proceso químico de revelado.

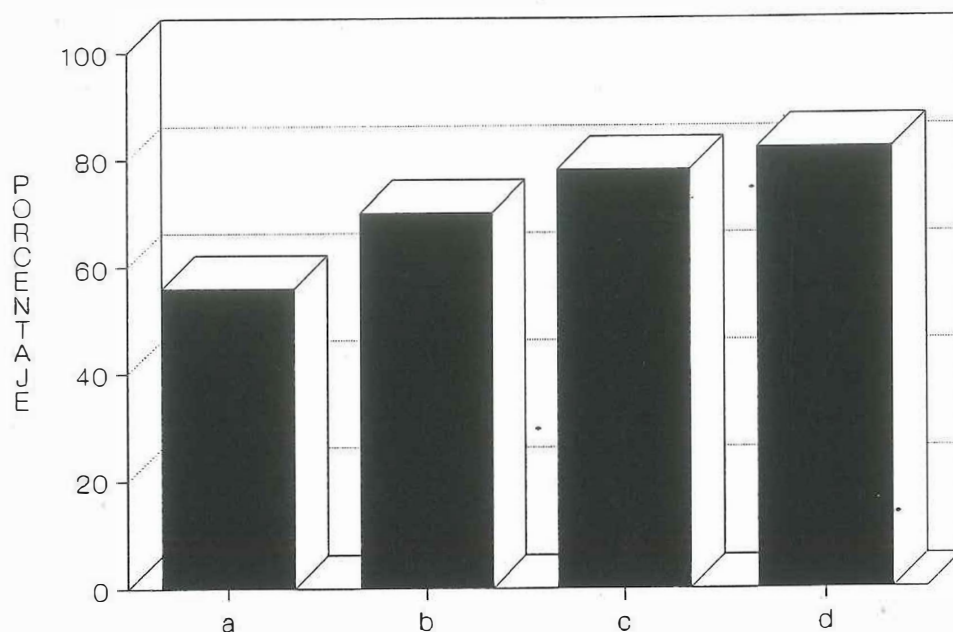


Figura 22. En la figura se muestra la respuesta de eficiencia diferentes CR-39. a) Pershore (normal). b) Fukuvi. c) Pershore (calidad especial). d) American Acrilics.

Se han intentado nuevos materiales como la quitina (celulosa natural) y otros materiales comerciales, pero la respuesta aún no es satisfactoria. Por otro lado, se puede perder uno mismo en el universo de materiales probables, por lo que si se quiere una respuesta inmediata, se tendrán que seguir usando los materiales más comunes para producir nuevos métodos y tecnologías. Por otro lado continuar con la búsqueda de nuevos materiales.

### III.3 Instrumentación.

Como se ha mencionado, el método de DTS se caracteriza por su simplicidad tecnológica.

La instrumentación requerida para cada caso es la siguiente: para los procesos químicos de pre-grabado y grabado químico, se requiere de un baño de agua a temperatura controlada con más, menos un grado de desviación de la temperatura central, que suele ser de 50°C, 60°C o 70°C. Esto se obtiene con casi cualquier sistema de baño maría (caliente). Para mantener la temperatura constante en la solución de grabado, se recomienda usar vasos de precipitados de teflón o vidrio dentro de la tina del baño de agua, usar agua destilada todo el tiempo, con una capa de aceite de alta densidad para minimizar la evaporación. Los vasos de precipitados, se deben cubrir con algún material plástico rígido, o bien con papel aluminizado, con el mismo propósito. La temperatura se monitorea en dos o más puntos, a) en el agua del baño, y b) en un vaso de precipitados conteniendo agua destilada dentro del baño, con esto se tiene la seguridad de que la solución química para revelado esté a la temperatura indicada. Siendo esto todo lo que se requiere para el revelado químico.

Ahora bien, si se quiere aumentar el tamaño de la traza previamente grabada químicamente, cuando la densidad de trazas es muy baja, en general para mediciones ambientales y que no se requiere conservar el diámetro original de la traza para otros estudios, el grabado electroquímico es recomendable.

El tamaño de la traza se incrementará de 10 a 30 veces, facilitando la lectura en un simple lector de microfichas, comúnmente usado en cualquier biblioteca.

Las características requeridas para el grabado electroquímico son: un generador de señal alterna, de preferencia senoidal, entre los 500 y 20,000 Hz, y que sea capaz de generar un campo eléctrico entre 15 KV y 50 KV en el material con un espesor de 1 cm. Esto producirá un rompimiento interno en el material detector, iniciándose un proceso de "arborescencia" a partir del cono de la traza químicamente grabada.

Este tipo de fuente de alto voltaje y alta frecuencia, ha sido desarrollada dentro del IFUNAM, llegándose a producir un prototipo con posible comercialización. El diseño y desarrollo se muestran en el artículo "Design and construction of an electrochemical etching power supply", publicado en la revista Nuclear Tracks and Radiation Measurements, Vol. 20, pp. 383-387 (1992), siendo ésto el producto de varios años de desarrollo y de investigación.

Este diseño es importante, pues actualmente sólo existen dos firmas comerciales que venden y fabrican por pedido fuentes para este propósito, una está en Hungría y la otra en Italia, pero ambas requieren de gran cantidad de corriente para su operación (aproximadamente 20 ó 30 amperes), haciéndolas voluminosas, pesadas y con ciertos riesgos debido al uso de corrientes elevadas, además de producir mucho calor por lo que requieren enfriamiento especial.

El instrumento producido en el IFUNAM, es pequeño (20 cm. x 10 cm. x 7 cm.), ligero (menos de 1 Kg) y maneja muy bajas corrientes. La innovación consistió en el uso de un material específico para la construcción del transformador de alto voltaje, con una eficiencia de casi 100 veces mayor que los comerciales actualmente. Este es un prototipo listo para su comercialización, siendo una realización importante en la producción tecnológica, dentro de los DTS. En la tabla VII semuestran las características de la fuente de voltaje.

Tabla VII. Características del generador de alto voltaje y alta frecuencia.

|                    |               |
|--------------------|---------------|
| Señal:             | senoidal      |
| Voltaje:           | 30 KV/cm.     |
| Frecuencia:        | 2000 Hz.      |
| Capacidad:         | 12 detectores |
| Corriente:         | < 10 mA.      |
| Corriente de fuga: | < 8 pA.       |

Para el grabado electroquímico (GEQ), se requiere de una cámara donde se le aplique el alto voltaje al detector. Esta cámara también fue diseñada por el autor de esta tesis, en una estancia en el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL, 1980).



Originalmente se tenía una cámara como la mostrada en la figura 23. Esta fue diseñada originalmente por el Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (J. Auxier *et al.* 1975), pero presenta varios problemas operativos, pues solo acepta 4 ó 6 detectores y se tiene que desmontar todo el sistema en caso de ruptura en el detector, además de la formación de burbujas de aire en la superficie del detector a grabar, produciéndose arcos eléctricos, o bien, desórdenes en la formación de las arborescencias. Este problema fue eliminado con el nuevo diseño, como se muestra en las figuras 24 y 25.

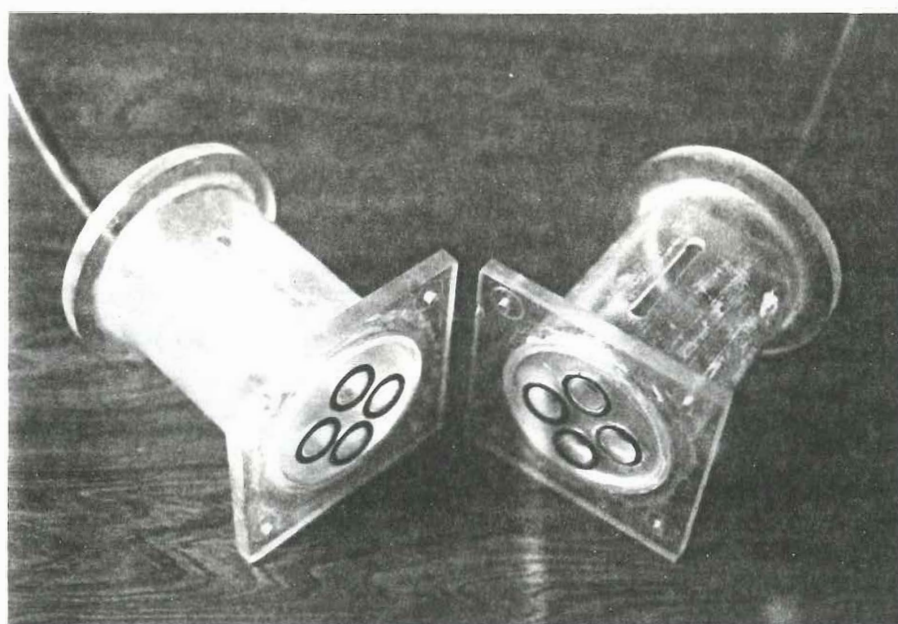


Figura 23. Primera cámara para el grabado electroquímico.

Esta modificación consistió en un ducto que contenga la solución de grabado y la ponga en contacto con la superficie del detector, a un ángulo de  $45^\circ$ , permitiendo que las burbujas de aire salgan a la superficie. Otra



innovación fue el que en la misma cámara se tenga la solución, y al girar la cámara  $180^{\circ}$ , la solución se ponga en contacto con el detector y los electrodos, permitiendo así el uso de la misma solución repetidas veces y haciéndose cada cámara independientemente de las otras. El diseño y construcción, tanto de la fuente de alto voltaje y cámara de grabado que forman parte de esta tesis, son producto de varios años de experimentación, hasta obtener estos prototipos, que han servido para estudios e investigaciones con detectores por trazas en sólidos. Siendo ésta toda la instrumentación requerida para la parte del grabado.

El siguiente paso que requiere instrumentación, es el conteo y análisis de las trazas grabadas. Esto se puede hacer por simple observación en un microscopio óptico. La instrumentación será un microscopio óptico con amplificación de 200X. El proceso es simple y sólo se requiere de tiempo y paciencia.

A través de los años y con las nuevas tecnologías, se han desarrollado una gran diversidad de métodos, siendo hasta hace muy poco un cuello de botella para la utilización de los DTS, pues todo el proceso es simple, pero el conteo automatizado requería de sistemas tecnológicos complejos y costosos.

En la tabla VIII, se da un esquema del desarrollo de la instrumentación para conteo y análisis de trazas nucleares en sólidos.

En esta parte de la instrumentación, también se ha intervenido con el diseño, construcción y calibración de varios métodos de conteo.

Tabla VIII. En esta tabla, se muestran los diferentes métodos de conteo empleados. Estas se pueden dividir en generaciones en base a la tecnología utilizada.

| PRIMERA<br>GENERACION          | SEGUNDA<br>GENERACION                 | TERCERA<br>GENERACION                      | CUARTA<br>GENERACION                                  |
|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Microscopio Optico<br>imagenes | Analisis de Imagen                    | Optoelectrónica                            | Procesamiento de                                      |
| Microscopio Electronico        | Vidimet                               | Microscopio Optico<br>más microcomputadora | Digitalizacion                                        |
| Contador de Chispa             | Interferometría laser                 | Contador de Bacterias                      | Digitalización de<br>imagenes mas<br>microcomputadora |
| Quantimetro                    | Difractor de Fraunhofer               | Pseudocoloración                           |                                                       |
| Microdensitometro              | Absorción de luz                      | Centellador                                |                                                       |
| Vidicon                        | Dispersión de luz                     | Analisis de imagenes<br>más computadora    |                                                       |
|                                | Detector de Barrera<br>Superficial    | Digitrack                                  |                                                       |
|                                | Contador de chispa<br>más cuantimetro | Inovión                                    |                                                       |
|                                | Lector de microfichas                 |                                            |                                                       |

#### Conteo por ruptura electrónica (Spark counter).

Cuando se tiene un material detector muy delgado, entre 10  $\mu\text{m}$  y 50  $\mu\text{m}$ , se logra la perforación del detector en el grabado químico, así un dispositivo simple y eficaz para el conteo es el contador por chisporroteo. En la figura 26, se muestra el sistema desarrollado en el IFUNAM como uno de los primeros trabajos del autor de esta tesis (Auxier *et al.* 1975).

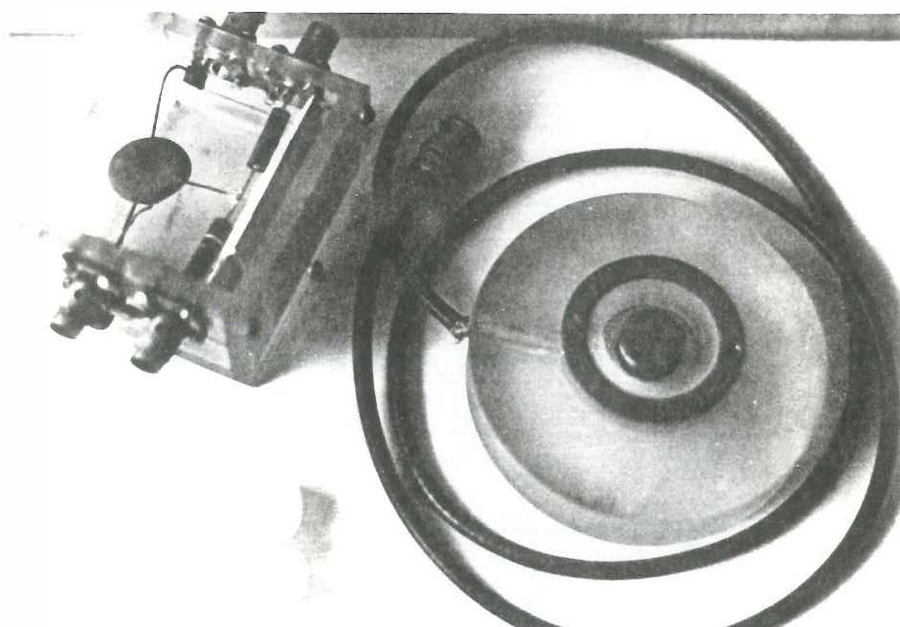


Figura 26. Sistema de conteo por chisporroteo.

Este método funciona perfectamente, pero el manejo de detectores de  $10\ \mu\text{m}$  de espesor es muy tedioso. Posteriormente se empezaron a utilizar materiales con  $500\ \mu\text{m}$  o  $600\ \mu\text{m}$  que son mucho más fáciles de operar.

De esta forma, se asoció al microscopio óptico una cámara de video y un monitor, facilitándose la medición y conteo.

Posteriormente y haciendo uso de un sistema como el mencionado anteriormente, se desarrolló el conteo semiautomático mediante un contador de colonias de bacterias, pudiendo hacer el conteo de trazas y la identificación de diámetros de las mismas semiautomáticamente (Griffith *et al.* 1984). En la



figura 27 se muestra la fotografía del sistema y en la figura 28 se muestra su calibración.



Figura 27. Sistema de conteo de trazas mediante un contador de colonias de bacterias.

Con la idea de automatizar el conteo, se utilizó un densitómetro (INAOE) asociado a una PC, teniendo por primera vez los datos digitalizados. El sistema se muestra en la figura 29 (Espinosa *et al.* 1986b).

Posteriormente la conversión de señal analógica a digital y el uso de una supercomputadora se desarrolló otro sistema de conteo con apoyo del grupo de investigación científica de IBM de México, se realizaron pruebas de

digitalización de imágenes, procesando los datos en una computadora IBM.

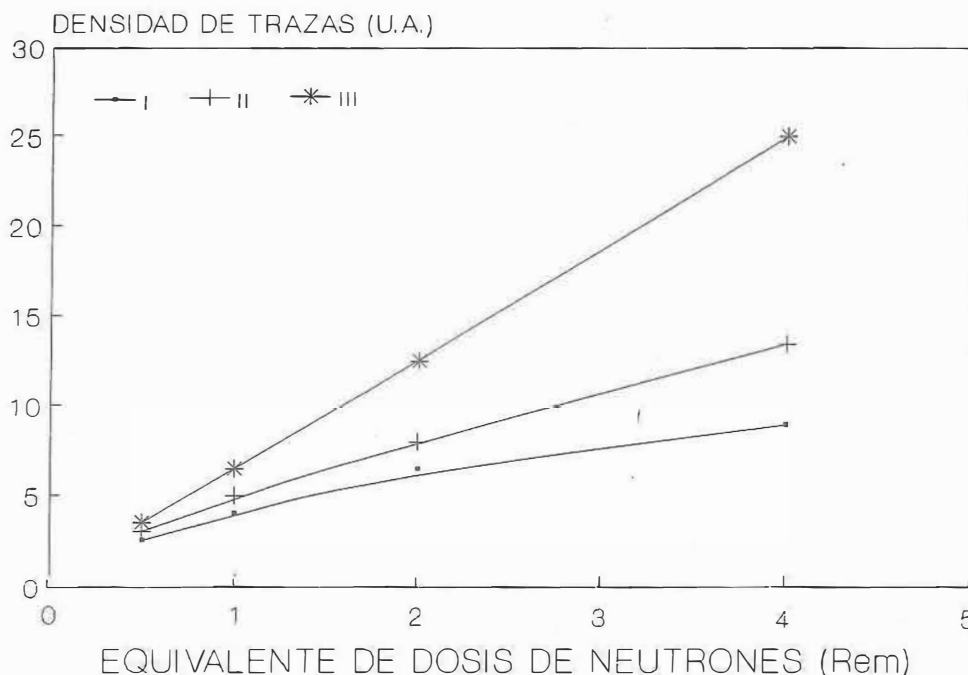


Figura 28. Calibración del sistema "Contador de Bacterias."

El uso del Inovión en el IFUNAM, dió como resultado, con la programación adecuada, un sistema de conteo e imágenes por tonos de gris, que se muestra en la figura 30. En la figura 31, se muestra la fotografía de una traza grabada electroquímicamente y digitalizada con el sistema Inovión. Más adelante, se trabajó con el proceso de imágenes (Viques *et al.* 1991).

Cada uno de estos métodos, tiene sus ventajas y sus desventajas en cuanto a la medición, pero hasta este punto, todos los sistemas automáticos eran demasiado caros o complejos, comparados con la simplicidad de los pasos previos del sistema de detección. Así era determinante encontrar un sistema de lectura tan simple como el de grabado. La digitalización de imágenes y los procesadores de PC actuales resuelven el problema de conteo. Con menos



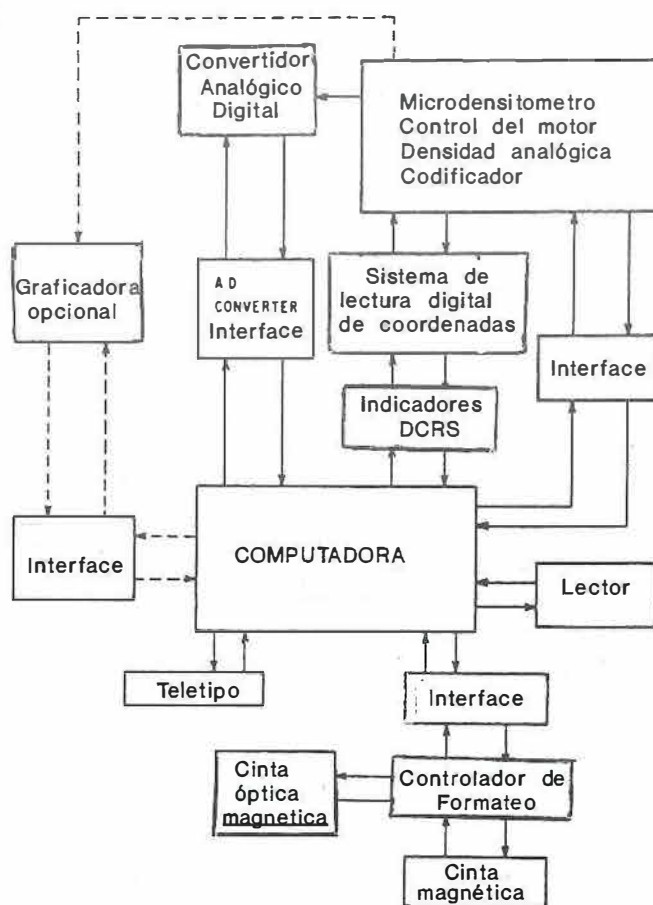


Figura 29. Sistema de conteo basado en un microdensitómetro.

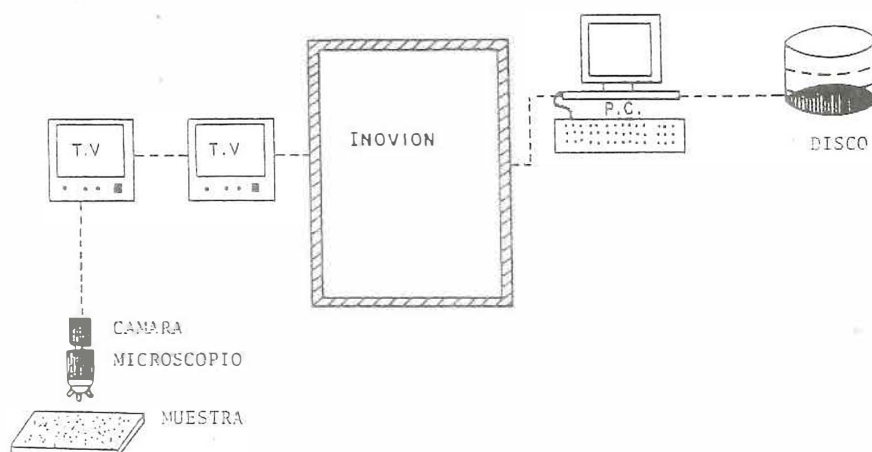


Figura 30. Sistema de conteo mediante el uso del Inovión.

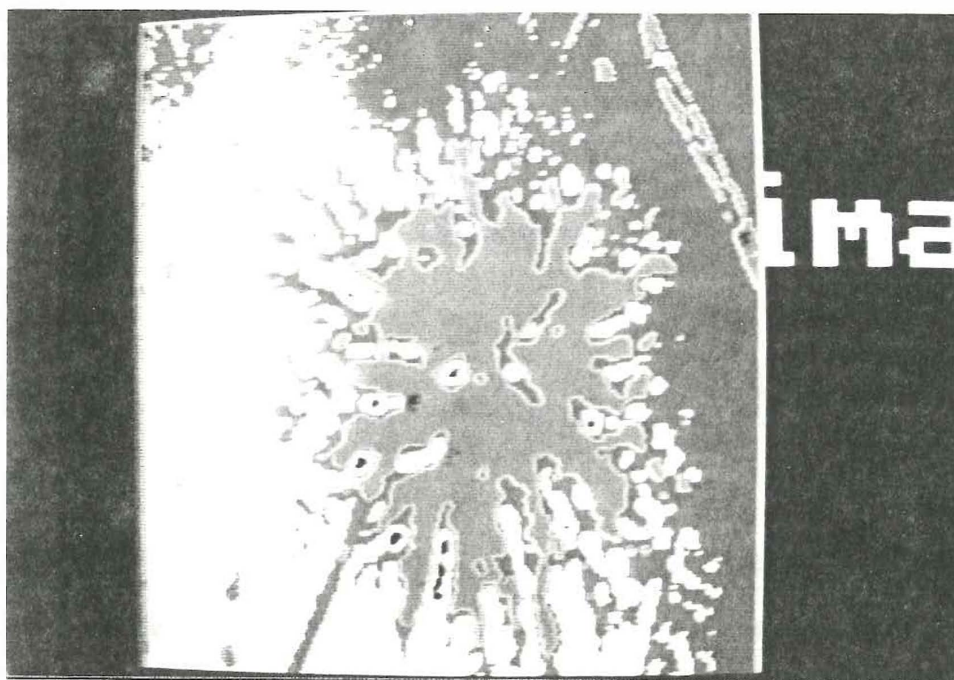


Figura 31. Imagen de una traza, haciendo uso del sistema Inovión.

de N\$ '3,000.00 se tienen tarjetas digitalizadoras (PC Visión Plus. Imaging Tech Inc, ORNL, 1993). En la figura 32, se muestra el sistema armado para este propósito por el autor en el Oak Ridge National Laboratory, durante su estancia sabática en 1993.

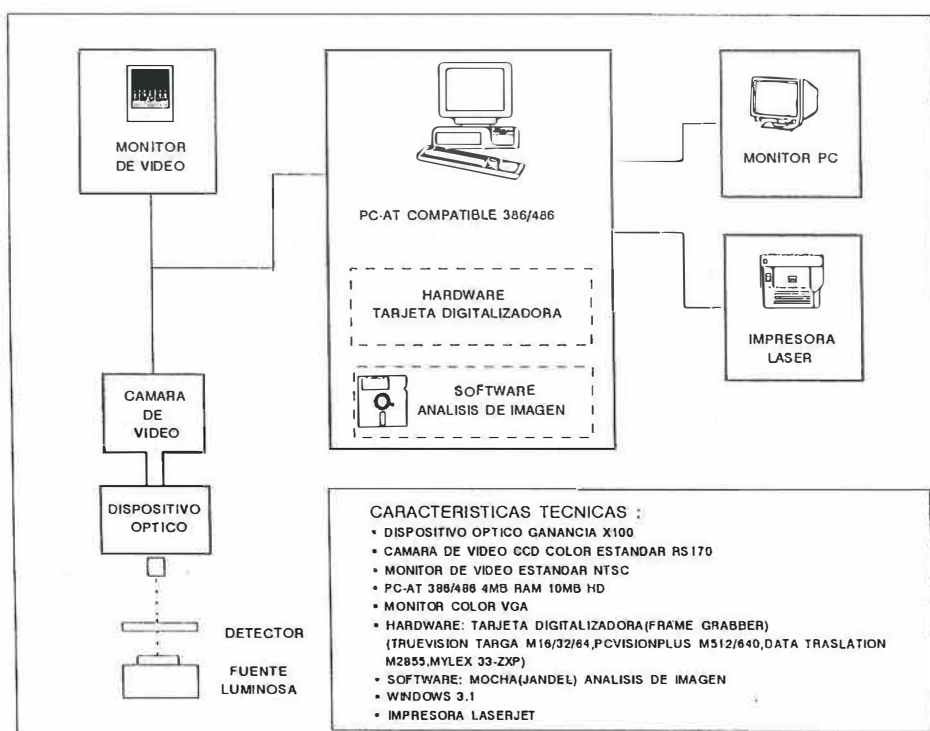


Figura 32. Diagrama a cuadros del sistema de conteo y análisis mediante digitalización de imágenes (tarjeta única).

Con este método se puede hacer conteo total de trazas, evaluar densidad de trazas, medir trayectorias de las trazas y conteo automático de los diferentes diámetros de las trazas en función a los ejes, a partir de trazas grabadas químicamente, con diámetros de sólo 10  $\mu\text{m}$ .

Nuevamente sólo una firma comercial o dos ofrecen sistemas de conteo automáticos, esto es, se cuenta automáticamente cada detector, por medio de código de barras se almacena la información particular, pudiéndose trabajar con estos datos en forma rutinaria o por selección, pudiendo colocar filas de 100 ó 200 detectores y se manejan automáticamente.

Para grandes cantidades de detectores (Sistemas Nacionales de Análisis), estas máquinas son apropiadas, pero para requerimientos más modestos, con una PC con tarjeta asociada a una cámara de video y lente óptico es suficiente. A nivel de investigación, el método de digitalización de imágenes es recomendado.

Podemos resumir las características de un buen sistema de conteo y análisis de trazas en la forma mostrada en la tabla I del capítulo II.

Como se puede observar, la instrumentación básica requerida para la digitalización, es común hasta para los más modestos laboratorios de investigación. El sistema de conteo se puede resolver con un microscopio óptico simplemente y/o con una PC y su tarjeta digitalizadora adecuada, lo que hace competitivo el método de DTS con otros métodos electrónicos de medición de radiación.

#### IV. RESULTADOS.

En este capítulo, se presenta la diversidad de aplicaciones que tienen los Detectores por Trazas en Sólidos (DTS) en diferentes campos, haciendo énfasis en dos aplicaciones específicas, una en la medición y evaluación de radón intramuros, y otra la determinación de los perfiles y distribución de contaminación de materiales radiactivos trasuránicos como el americio y el plutonio en suelos y sus estratos.

##### IV.1 Uso de detectores pasivos por trazas nucleares para la determinación de radón intramuros.

Si nos remontamos al siglo XVI, encontramos que en las montañas de Bohemia, donde existen grandes cantidades de minerales, fue conocida una enfermedad llamada "mal de la montaña", los habitantes de la región que adquirían esta enfermedad, llegaban a morir. Esto pudo ser una epidemia debida a los gases que se emanaban, y esa enfermedad bien pudo haber sido cáncer pulmonar. Pero no fue hasta 1900, cuando Ernst Don, descubrió lo que llamó "Radium Emanation Gas" (Emanaciones de gas del radio).

Posteriormente, en los años 40's, se asoció la posibilidad de que el cáncer pulmonar en mineros se debiera a ese gas, ya entonces llamado radón.

Para 1950, quedó claramente establecido que el radón es promotor de cáncer en mineros, y a la fecha se trata de identificar y correlacionar el riesgo de cáncer pulmonar con el radón existente en casas, edificios y en casi todo tipo de construcciones.

En la mayor parte de la tierra existen concentraciones de minerales de uranio, por lo que la mayoría de los materiales con este origen, como son los materiales de construcción, contienen cantidades un cuanto pequeñas, importantes de uranio y por lo tanto de radón, si recordamos la cadena de decaimiento del uranio (U-238).

En la figura 33, se muestra la serie de decaimiento del uranio (U-238), que por la emisión de partículas alfa o beta, llega a ser radón. Hasta el radio (Ra-226), los productos del decaimiento son sólo sólidos, pero al pasar al siguiente elemento, radón (Rn-222), éste se convierte en gaseoso, lo que provoca un problema de contaminación. Después de 3.82 días, este gas radón decae en polonio (Po-214), que se convierte nuevamente en sólido, y continúa decayendo hasta plomo (Pb-210), que tiene una vida media de 21 años, para llegar finalmente a plomo (Pb-206) que es un elemento estable.

Debido a las propiedades químicas del gas radón (gas noble), éste no interactúa químicamente con otros elementos, dándole al radón una gran facilidad de movilidad y penetración. De esta forma, se tienen exhalaciones del subsuelo, del material del suelo, de la arena, de la grava, del cemento, del yeso, y en general de los materiales de construcción, que escapa y se infiltra en las construcciones, por efecto de chimenea, quedando atrapado en

éstas, si no se tiene una buena ventilación.

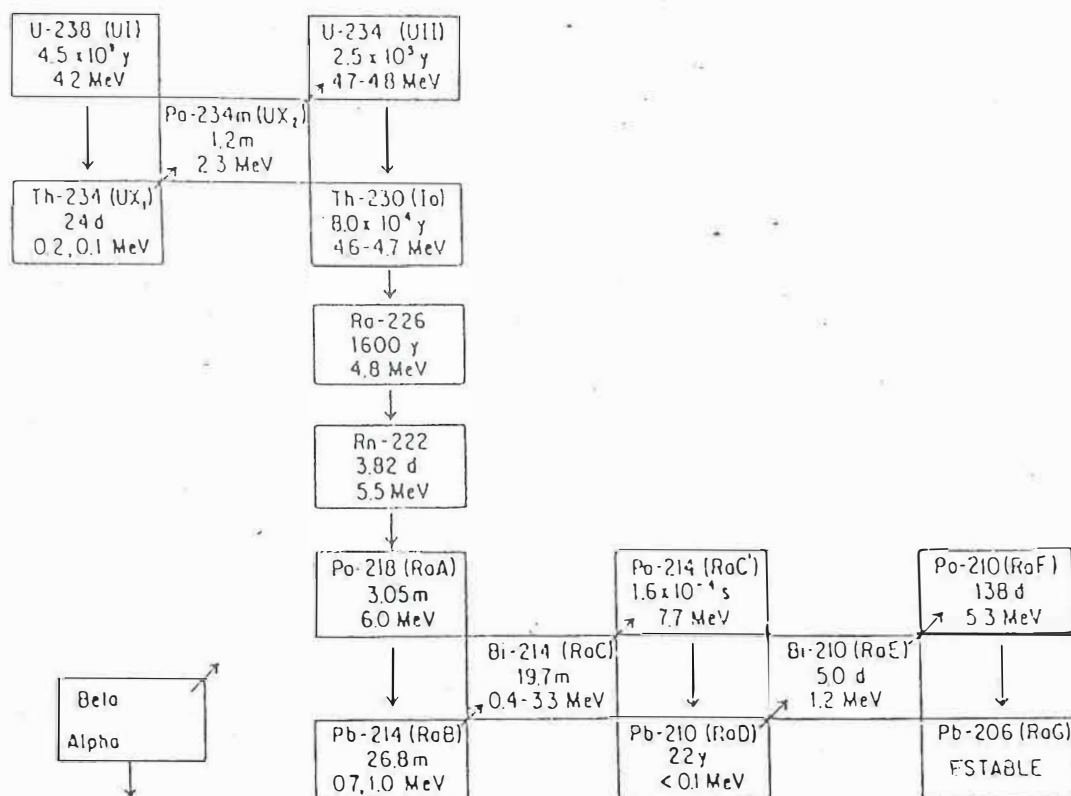


Figura 33. Serie de decaimiento del uranio (U-238).

Como se muestra en la figura 34, el 60% de la cantidad de radiación natural que recibe el humano, es debida al gas radón, además de que por ser un gas, puede ser inhalado y penetrar en los alveolos del pulmón, quedando las células en contacto directo con las partículas alfa.

De esta forma, encontramos que existe un riesgo de generación de cáncer pulmonar, debido a la permanencia por períodos largos de tiempo en edificios de poca ventilación o bien, en nuestros propios hogares.



## Fuentes de Radiación Natural para el Ser Humano

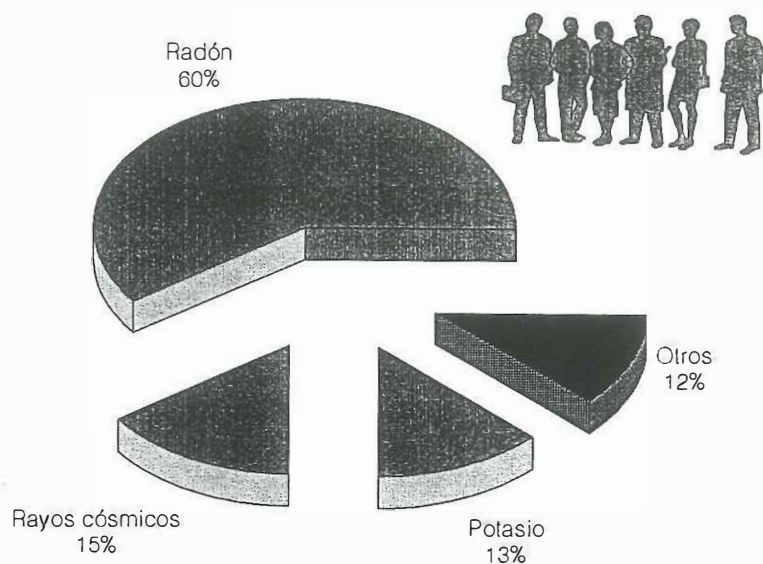


Figura 34. Dosis anual de radiación ambiental recibida por los humanos.

En la actualidad, se considera importante conocer el nivel de radón en las casas habitación y en los edificios públicos, como se mencionó al principio de este trabajo. En el mundo, un gran número de agencias y organismos, están trabajando para entender el problema del radón y su interacción con el ser humano.

Los DTS son una excelente opción para la medición de radón, por lo que

aquí describiremos un dispositivo que usa DTS para la medición y evaluación del radón intramuros. El diseño del dispositivo, la evaluación y selección del material, así como la instrumentación necesaria, han sido producto de los trabajos de investigación del autor, dentro del programa de Aplicaciones de la Dosimetría del IFUNAM.

#### IV.1.1 Selección del material detector.

De entre todos los materiales para la detección de gas radón, se seleccionó el CR-39, producido por la Pershore Moulding Ltd, UK. Esto fue en base a los estudios mostrados previamente, donde se encuentra que el CR-39 tiene la sensibilidad suficiente para poder determinar desde  $0.82 \text{ Bq/m}^3$ , en un tiempo de integración de 14 días. El conteo de fondo encontrado en este material es de  $30 \pm 5 \text{ trazas/cm}^2$  (Espinosa y Ramos. 1992).

Como este método es por integración, la sensibilidad dependerá del conteo de fondo.

**Tiempo de integración:** en el proceso se recomienda de 14 a 28 días de integración, de esta forma se pueden hacer de 3 a 6 mediciones por estación del año en cada lugar, lográndose una buena estadística, con una desviación considerando el fondo de 7.68% ( $7.6 \text{ valor fondo} + 0.08$  por la relación  $12.5 : 1$ ), estando por debajo del 10% considerado en este tipo de detectores pasivos.

Se seleccionó CR-39 de  $600 \mu\text{m}$  de espesor, por ser rígido y de fácil

manipulación, se puede cortar fácilmente con cualquier herramienta mecánica o con un simple cuchillo de corte de cartón (cutter). Los materiales con espesores entre 10 y 50  $\mu\text{m}$ , son mucho más difíciles de manipular, necesitándose de marcos para sostenerlos, por lo que no se recomiendan estos materiales para uso masivo. Pershore Moulding LTD, ofrece diferentes calidades de CR-39. Se encontró que el de 32 horas de moldeo es el más uniforme en cuanto a espesor. El número de trazas de fondo, es constante y bajo. Además, presenta una menor dispersión en los datos obtenidos ( $\pm 3\%$ ). Esto se muestra en la tabla IX y en la figura 35.

Se analizaron otros materiales y se encontró (1993), que la respuesta del CR-39 de la American Acrylics (USA) y el de Fukuvi (Japón), actualmente presentan características similares, como se muestra en la figura 36. Estos materiales surgieron comercialmente muy recientemente y por ejemplo, la American Acrylics, sólo vende el material bajo pedido específico, con producción especial para uso como detector.

Tabla IX. Respuesta de los CR-39 de la Pershore Moulding Ltd.

| Caraterísticas     | Espesor           | Eficiencia | Desviación |
|--------------------|-------------------|------------|------------|
| Normal             | 600 $\mu\text{m}$ | 57%        | 10%        |
| 32 horas de moldeo | 600 $\mu\text{m}$ | 100%       | 3%         |
| Especial           | 500 $\mu\text{m}$ | 109%       | 18%        |

Tabla X. Condiciones para el tratamiento del CR-39 (Perschore Moulding, 32 h de moldeo), para medición de radón intramuros.

| Proceso                                     | Solución Química | Concentración y Temperatura | Tiempo        |
|---------------------------------------------|------------------|-----------------------------|---------------|
| Pre-grabado                                 | KOH              | 6N, 60°C                    | 5 hrs         |
| Grabado Químico                             | KOH              | 6N, 70°C                    | de 5 a 25 hrs |
| Grabado Electroquímico<br>(30 KV/cm, 2 KHz) | KOH, NaCl        | 6N, Sat.<br>25°C            | 5 hrs         |

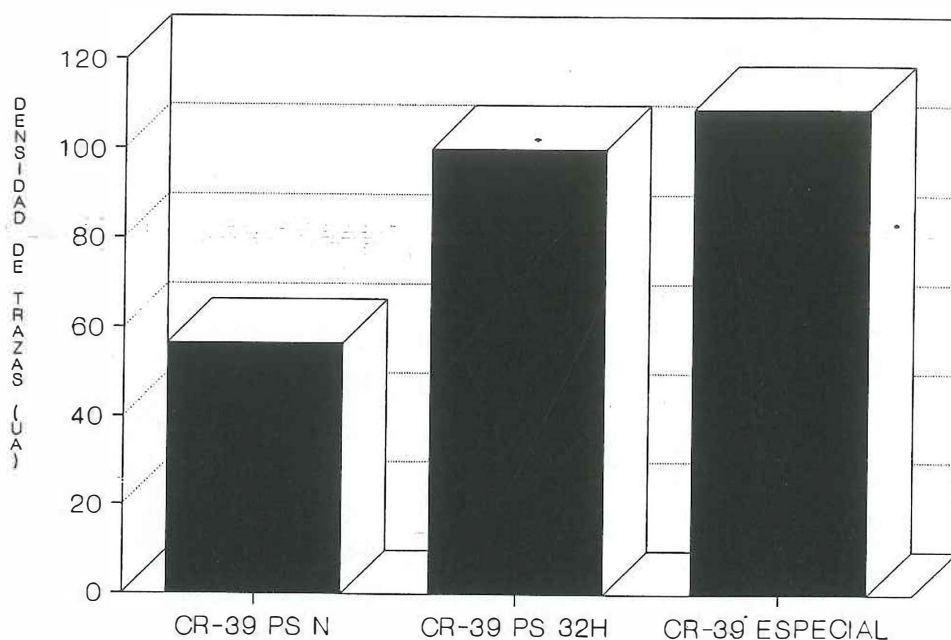


Figura 35. Respuesta de los diferentes tipos de CR-39 para una fuente de Am-241. (todos los materiales tuvieron el mismo tratamiento químico).

Como se puede ver en la tabla X, se ha tratado de tener una sola normalidad de la solución para todos los pasos químicos. Además, se ha diseñado un sistema en donde todos los detectores son sostenidos durante el tratamiento químico, dando esto gran facilidad al proceso y evitando posibles

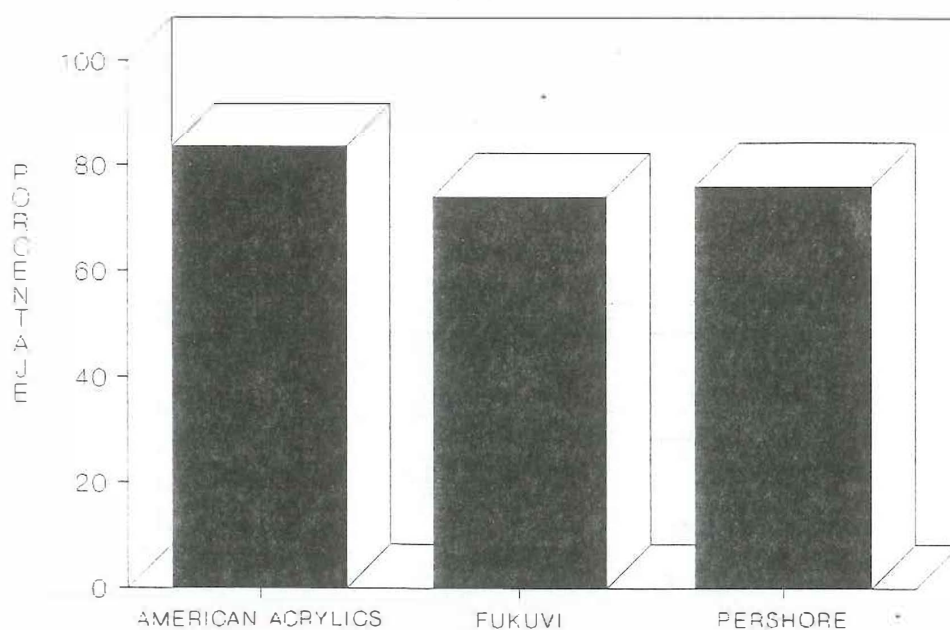


Figura 36. Eficiencia del CR-39 de diferentes productores (American Acrylics, Fukuvi y Pershore Moulding).

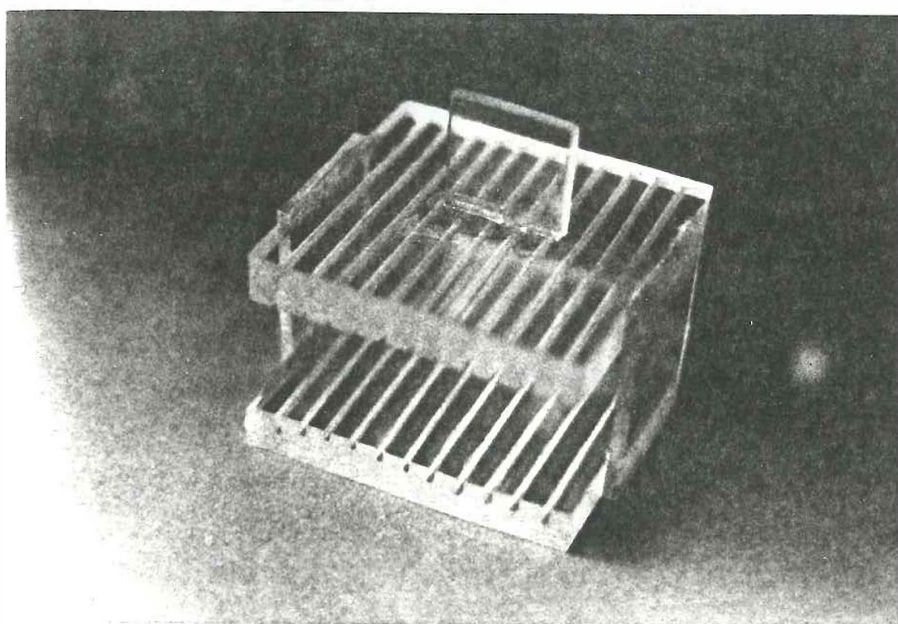


Figura 37. Dispositivo para efectuar el tratamiento químico.



errores. Hay que recordar que para la medición de radón, se tienen que procesar cientos de detectores. En la figura 37, se muestra una fotografía del dispositivo para sostener los detectores y en la figura 38 una fotografía de los detectores, mostrando el número de detector, para su seguimiento.

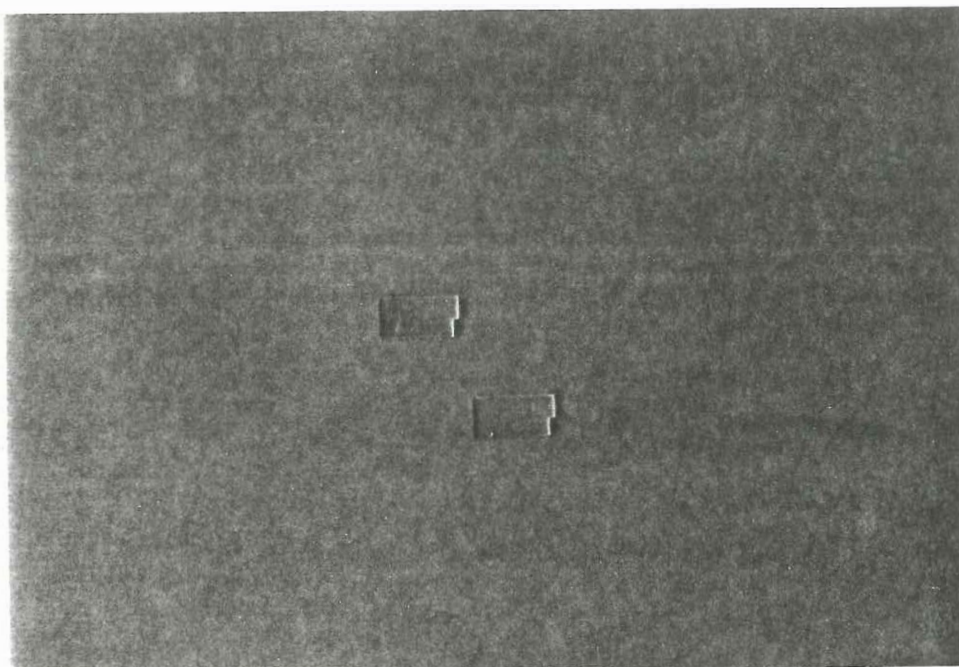


Figura 38. Detector de CR-39.

#### IV.1.2 Selección del volumen sensible del dispositivo para medir radón.

Se seleccionó un vaso de plástico comercial (Sigu Plástica, S.A.), para normalizar el volumen de aire alrededor del detector. Este tiene un volumen de 330 ml. También se pueden usar recipientes de un litro o algún otro volumen, pero debido al costo, disponibilidad y la apariencia, se ha encontrado que este tipo de vaso es el más atractivo.

Dentro de este vaso, se coloca el detector y una bolsa que contiene desecante, para mantener la humedad interior constante. Además, este vaso se tapa con un material permeable al radón, pero impermeable a otro tipo de polvos y aerosoles, asegurándonos así que sólo el gas radón puede penetrar al vaso. En este diseño se usó "plastic wrap cover" (plástico para envolver alimentos o regalos comercial). Este fue seleccionado por su buena permeabilidad, además de su fácil adquisición y costo (Espinosa *et al.* 1991a). La tabla XI, muestra la permeabilidad de varios materiales al paso del radón. El dispositivo completo de monitoreo, se muestra en la figura 39.

Este dispositivo, tiene un costo total de 47 nuevos centavos. Esto es, para aplicación masiva costaría menos de N\$ 0.50 por detector, haciéndolo muy atractivo comparado con otros métodos.

#### IV.1.3 Método de lectura.

El método más simple, es mediante un microscopio óptico, debido al tipo de trabajo y al número de detectores empleados. En el laboratorio, se han desarrollado otros métodos automatizados y se sigue trabajando actualmente con una tarjeta digitalizadora de imágenes, que debido a su bajo costo, podría ser la solución para el proceso de conteo.



Tabla XI. Respuesta de diferentes materiales al paso del radón.

| MATERIAL           | MARCA COMERCIAL | DENSIDAD<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | PERMEABILIDAD<br>(%) |
|--------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------|
| <b>METALES</b>     |                 |                                  |                      |
| Mailar aluminizado | Printek         | 1.286                            | 2                    |
| Aluminio (1)       | Reynolds Wrap   | 2.143                            | 31                   |
| Aluminio (2)       | Alupack         | 1.978                            | 33                   |
| <b>POLIMEROS</b>   |                 |                                  |                      |
| Unicel             | Packsa          | 0.049                            | 10                   |
| PVC                | Abadimex        | 0.133                            | 46                   |
| Celofan            | Impidsa         | 0.706                            | 55                   |
| Polietileno (1)    | Policel         | 0.976                            | 77                   |
| Egapac             | Quim. Borden SA | 1.188                            | 77                   |
| Polietileno (2)    | Sta. Clara      | 1.115                            | 96                   |
| Polietileno (3)    | Napredsa        | 0.833                            | 100                  |
| Filtro poroso      | Veco            | 0.039                            | 100                  |
| <b>PAPELES</b>     |                 |                                  |                      |
| Masking Tape       | Tuk             | 0.871                            | 40                   |
| Papel encerado     | Loreto          | 1.381                            | 42                   |
| Papel bond (1)     | Centauro        | 0.898                            | 80                   |
| Papel bond (2)     | Scribe          | 0.102                            | 81                   |
| Papel filtro       | Whatman         | 0.763                            | 83                   |
| Papel de copia     | Sajosa          | 0.625                            | 86                   |
| Papel aereo        | San Cristobal   | 1.167                            | 100                  |
| <b>FILTROS</b>     |                 |                                  |                      |
| Filtro de vidrio   | Pyrex           | 2.449                            | 7                    |
| Franela            | Romano          | 0.159                            | 97                   |

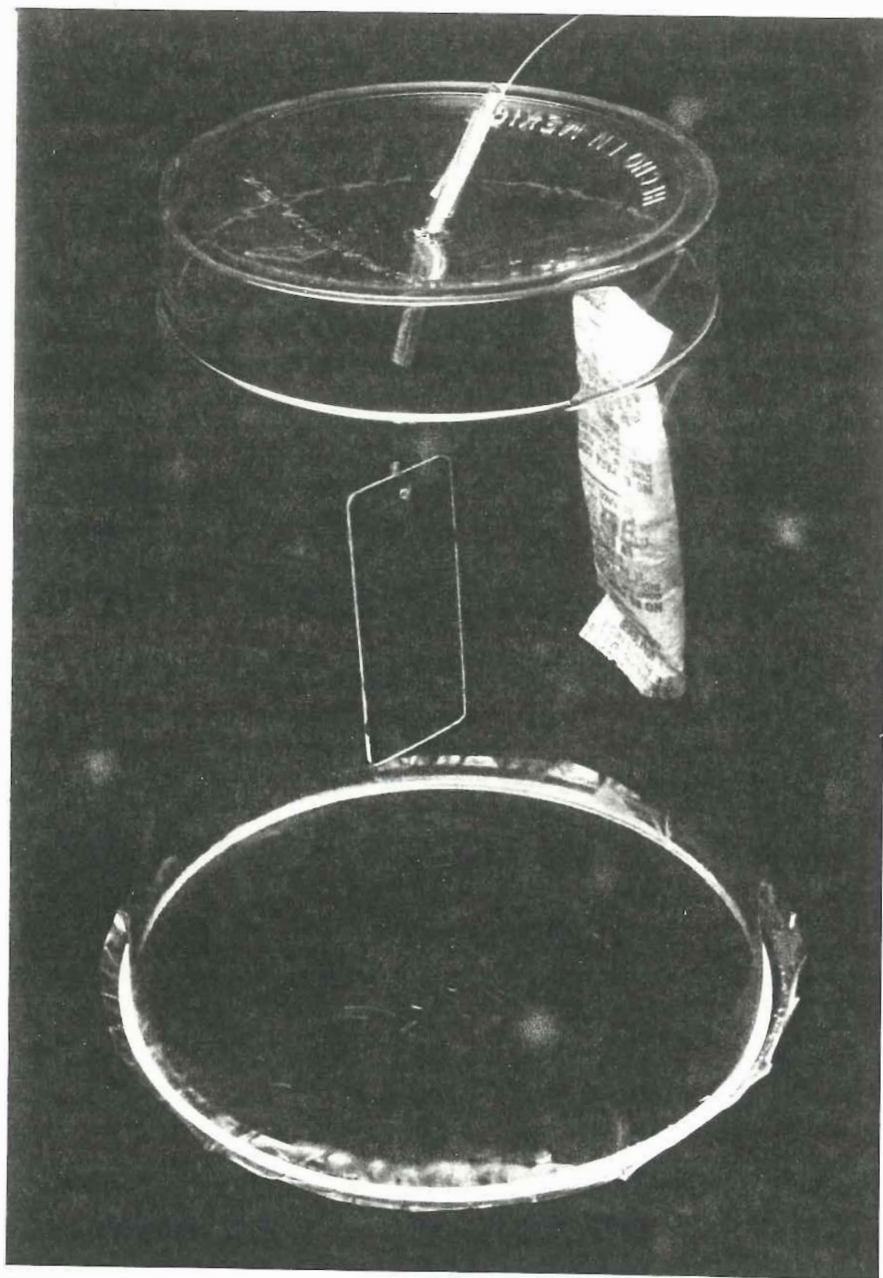


Figura 39. Dispositivo para monitoreo de radón intramuros.

El campo visual empleado es de  $10 \text{ mm}^2$ , contando 30 campos de  $0.33 \text{ mm}^2$ . Se determina el valor promedio e incertidumbre de la medición por medio de una distribución normal.

#### IV.1.4 Calibración.

El método de DTS, es un método de medición por comparación, por lo que se requiere de procedimientos de calibración y verificación. Se puede usar una cámara primaria para hacer la primer referencia, y posteriormente hacer evaluaciones de verificación con volúmenes conocidos. Para este efecto, se construyó una cámara con un volumen de  $500 \text{ dm}^3$  donde se deposita una cantidad conocida de radio (Ra-226). Los detectores se colocan en el interior con todo y dispositivo. Para evitar la dispersión del gas radón, se usa un sistema de doble puerta. En la figura 40 se muestra la respuesta del dispositivo en la cámara de verificación (IFUNAM), y en la figura 41 la respuesta del mismo dispositivo a la cámara de radón estandar del Oak Ridge National Laboratory (ORNL, USA).

La pendiente de la curva mostrada en la figura 40 es de 4.4, esto es, que por cada  $22.5 \text{ Bq/m}^3$ , tenemos  $100 \text{ trazas/cm}^2$ , y la pendiente encontrada en la cámara del ORNL es la misma, con una incertidumbre de los valores dentro del 10%.

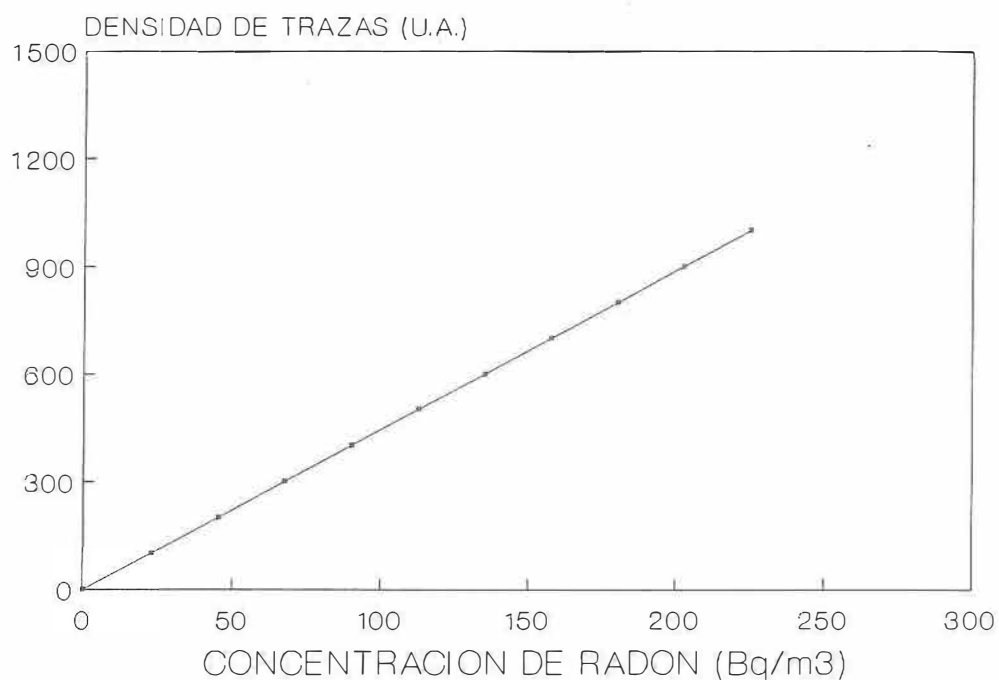


Figura 40 Respuesta de la cámara de calibración del IFUNAM.

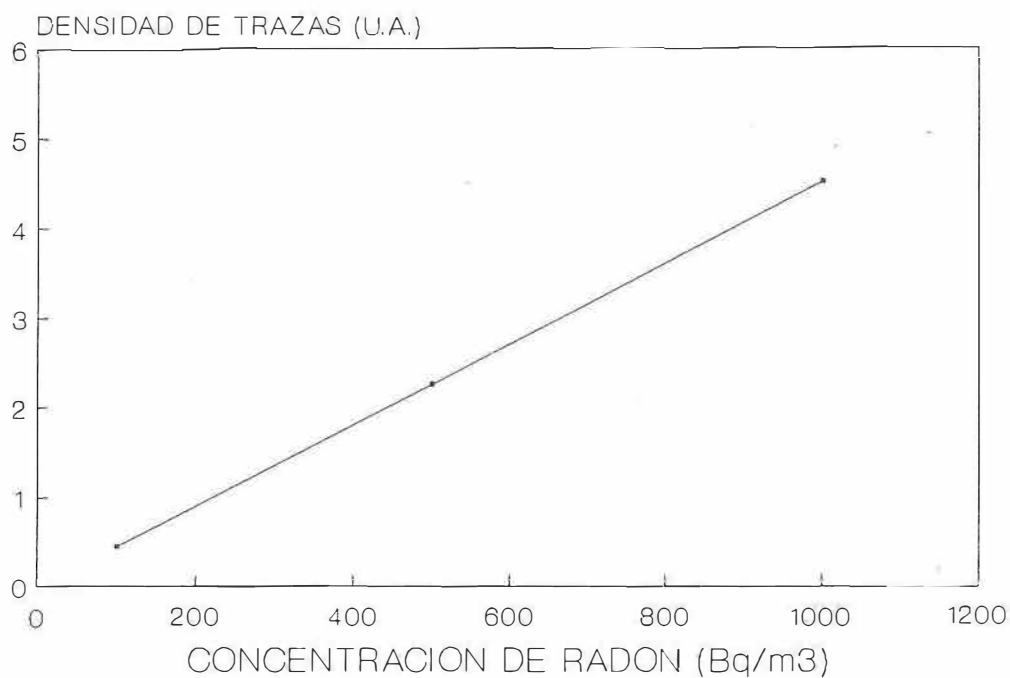


Figura 41- Respuesta de la cámara de calibración del ORNL, USA.

De esta forma, podríamos decir que los valores calculados y obtenidos para la cámara de verificación están correctos. Y así tomarla como referencia para próximas evaluaciones. Otro método que se sugiere, es el de tener un cuarto que se calibre con respecto a los datos anteriores, y de ser posible, permanezca en las mismas condiciones durante meses o años. En este caso tenemos un recinto que se ha estudiado y medido los últimos siete años, por lo que se conoce su contenido de radón, además de haberse verificado este valor con sistemas dinámicos, mostrando los datos en la tabla XII. También se monitorea con un monitor de radón marca Harwell, de esta forma, se tiene un excelente procedimiento de verificación, revisando la respuesta del dispositivo, del material, del proceso químico de grabado y el propio método de conteo. Especialmente si se tiene un cuarto de cemento donde la ventilación sea pobre o nula.

Tabla XII. Medición de salón A-22 del IFUNAM a lo largo de 5 años.

|                    |                                              |                   |
|--------------------|----------------------------------------------|-------------------|
| Edificio           | Acelerador Van der Graff de 2.2 MeV (IFUNAM) |                   |
| Período            | Mayo-85 a abril-90                           |                   |
| Actividad Máxima   | 85                                           | Bq/m <sup>3</sup> |
| Actividad Mínima   | 55                                           | Bq/m <sup>3</sup> |
| Actividad promedio | 60                                           | Bq/m <sup>3</sup> |

#### IV.1.5 Aspectos que se deben considerar.

1.- Analizar el material detector antes de usarse y verificar su espesor.

Este no debe de variar más de un 3%.

2.- El conteo de fondo no debe variar más de un 10% después del tratamiento de pre-grabado.

3.- La temperatura de las soluciones no debe variar más de  $3^{\circ}\text{C}$ , y nunca debe dejarse enfriar y luego recalentar, pues daña el proceso de grabado.

4.- Debe evitarse todo tipo de daños en el detector antes del ataque químico.

Todo esto nos da una excelente respuesta del dispositivo aquí propuesto.

Existen otros dispositivos, que se muestran en la figura 42 (Khan *et al.* 1993), pero la simpleza del sistema propuesto en este trabajo, así como su costo, toma ventaja con respecto a otros.

También como se mencionó anteriormente, en Estados Unidos y en Europa se tienen límites establecidos para el radón en interiores. ( $15 \text{ Bq/m}^3$ , límite aceptable y  $150 \text{ Bq/m}^3$  límite de acción, USEPA), y el Comité Internacional de Protección Radiológica (ICRP) recomienda ciertos límites también.

En México, es sabido que tenemos problemas con otros contaminantes como ozono, óxido de nitrógeno y plomo siendo en este momento una de las

---

Nota: Para mayor detalle sobre el dispositivo, se puede consultar la referencia, pues este trabajo es del dominio público en la literatura de circulación internacional.

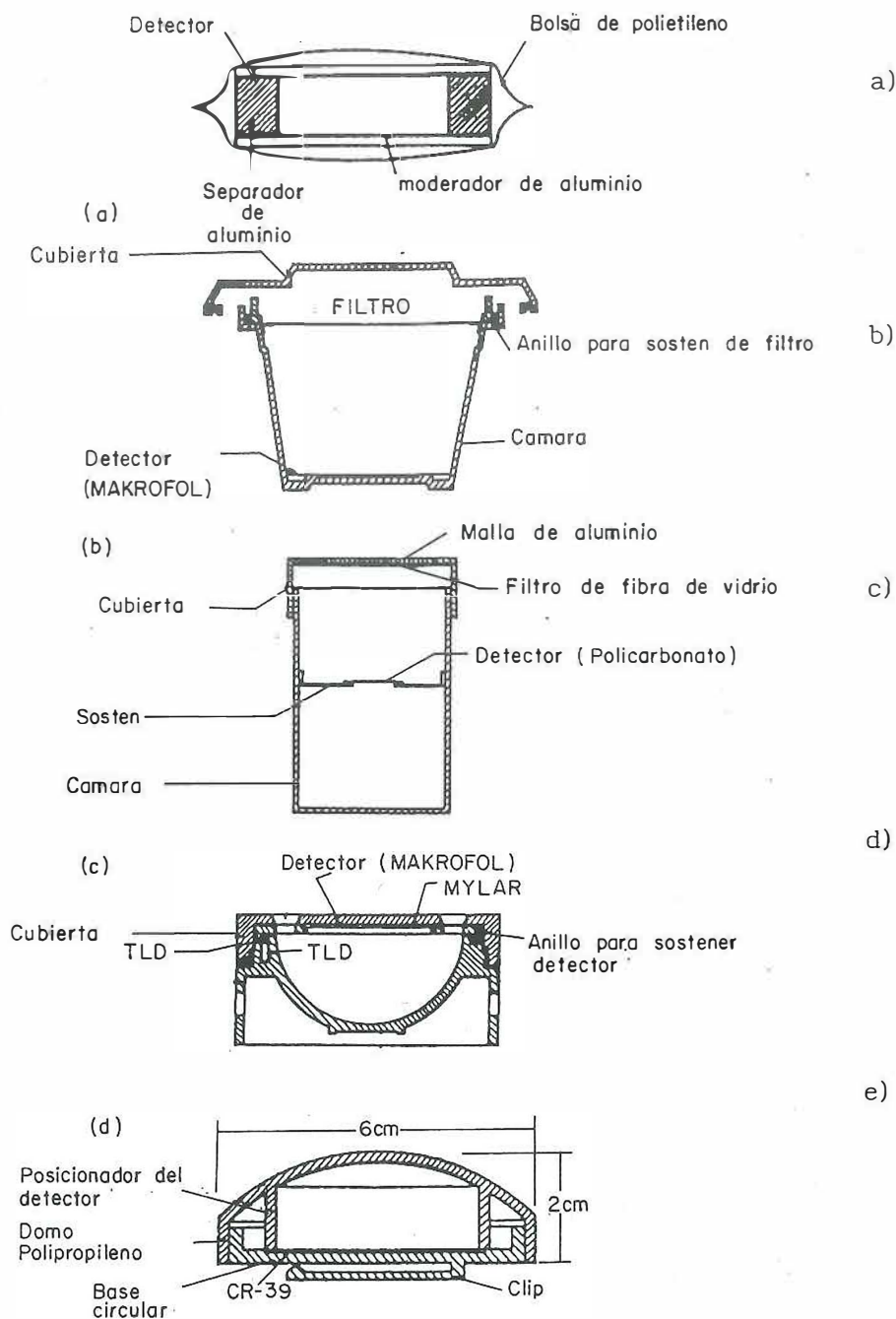


Figura 42. Diferentes tipos de detectores de radón: a) ENEA (Italia), b) Harwell (UK), c) Landauer (USA), d) Karlsruhe (Alemania), e) Piesch (Alemania).



ciudades más contaminadas del mundo. No se ha dado la posibilidad del estudio y análisis del radón intramuros, como en otros países. Si bien es cierto que somos un país tropical, no en toda la extensión de la República Mexicana se tienen las mismas características climatológicas ni de ventilación. Por otro lado, las construcciones en México usan mampostería, concreto, tabiques, yeso, siendo prototipos de generadores de radón.

En Nuevo México y Arizona (USA), se han reportado niveles de hasta 6,000 Bq/m<sup>3</sup> (Kearfott. 1989), debido a las características del suelo. No veo la razón de por qué no en Chihuahua, Coahuila, Nuevo León o Sonora no se pueda presentar el mismo fenómeno.

El cáncer de pulmón y otras patologías se presentan con altos índices, en ciertas regiones del país. Los contaminantes químicos, biológicos y el tabaquismo, entre otros, contribuyen para producir estos efectos en la salud pública. Pero no debemos olvidarnos del radón como agente que puede modificar el proceso de desarrollo de las células.

#### **IV.1.6 Recomendaciones.**

a) Hacer verificaciones del sistema de detección (dispositivo, detector, grabado y lectura) con la frecuencia adecuada para minimizar la posibilidad de error en las mediciones.

b) Verificar en cada grupo de detectores el número de trazas de fondo y

el mínimo nivel detectable.

c) Verificar la sensibilidad y linealidad del sistema.

d) Verificar la reproducibilidad (control de calidad).

e) Verificar la respuesta en condiciones de campo, y medir otros factores como la temperatura, humedad, partículas suspendidas en el aire.

f) Intercomparación de métodos de medición y calibración con estándares primarios.

g) Verificación de mediciones con otros métodos (carbón activado, dinámico, Electret, centelleo, espectrometría gamma, etcétera)

h) Análisis de casos específicos (altas concentraciones de radón), y seguimiento de casos de posible daño por radón.

i) Establecer los límites de concentración de radón para México y las medidas de seguridad.

j) Preparación de personal en Física de la Salud y Seguridad Radiológica Ambiental.

k) Analizar y realizar un estudio comparativo de los efectos en la salud debido a los contaminantes ambientales.

Como se vió, los DTS se utilizan en la medición de radón con gran éxito. Una novedosa y prometedora aplicación, es el uso de los DTS en la medición y determinación de contaminantes radiactivos en superficies y en los diferentes estratos de la tierra.

#### IV.2 Distribución y caracterización de contaminantes transuránicos:

Las contaminaciones por partículas alfa en general, son difíciles de detectar en superficies o en capas cercanas a la superficie en el piso o suelo, siendo éste un riesgo para trabajadores en el área nuclear y para el público en general. Los procesos de descontaminación de áreas y aseguramiento de materias donde existen partículas alfa, es muchas veces muy costoso y complicado.

Por sus características, los DTS presentan una excelente opción para este tipo de mediciones, ya sea en paredes, pisos, techos, superficies irregulares, cuarteaduras y contenedores, donde los otros sistemas presentan dificultad de acceso.

Los niveles mínimos de medición que se logran con los DTS, actualmente son suficientes para cumplir con los requisitos del ANSI, teniendo además la característica de archivar la información, mapear en escalas muy pequeñas, reconocer partículas pesadas y no producir desechos radiactivos, ni presentar en problema de transporte de material contaminado para su análisis, pues las mediciones se pueden hacer *in situ*, con la consiguiente disminución del

costo. Un ejemplo es la medición de contaminantes en áreas de pruebas nucleares, donde el análisis por espectrometría u otro sistema electrónico, tiene un costo de \$350 dólares americanos por muestra, y haciendo uso de los DTS se redujo este costo a \$10 dólares americanos.

En esta novedosa aplicación, se seleccionó como material detector el CR-39 por su sensibilidad, pudiendo llegar a medir  $3.67 \text{ Bq/m}^3$  por  $\text{cm}^2$ , que cumple con la norma ANSI-N328-197 para contaminación por alfa, su reproducibilidad y estabilidad de respuesta. En este caso, la linealidad se realizó para partículas alfa de americio (Am-241) y plutonio (Pu-239). La respuesta se muestra en las figuras 43 y 44, en donde el proceso químico se normalizó con el empleado para la energía del radón, optimizando el diámetro de las trazas entre 4.1 MeV y 5.7 MeV para un solo paso de grabado químico, obteniendo trazas entre  $60 \mu\text{m}$  y  $90 \mu\text{m}$ , para poder ser leídas mediante un lector de microfichas, o bien, por medio del proceso de digitalización de imagen haciendo uso de la tarjeta PC Vision Plus (Imaging Tech. Inc.), descrita anteriormente.

Como se puede observar, con ligeras modificaciones se obtuvo un método mediante DTS para determinación de contaminantes en superficies.

La tabla XIII muestra los resultados de medición de contaminantes alfa en diferentes superficies y un valor comparativo con otro método de medición.

Se seleccionó una zona de un canal de un reactor fuera de operación y se evaluó la cantidad y la distribución remanente de contaminación alfa.

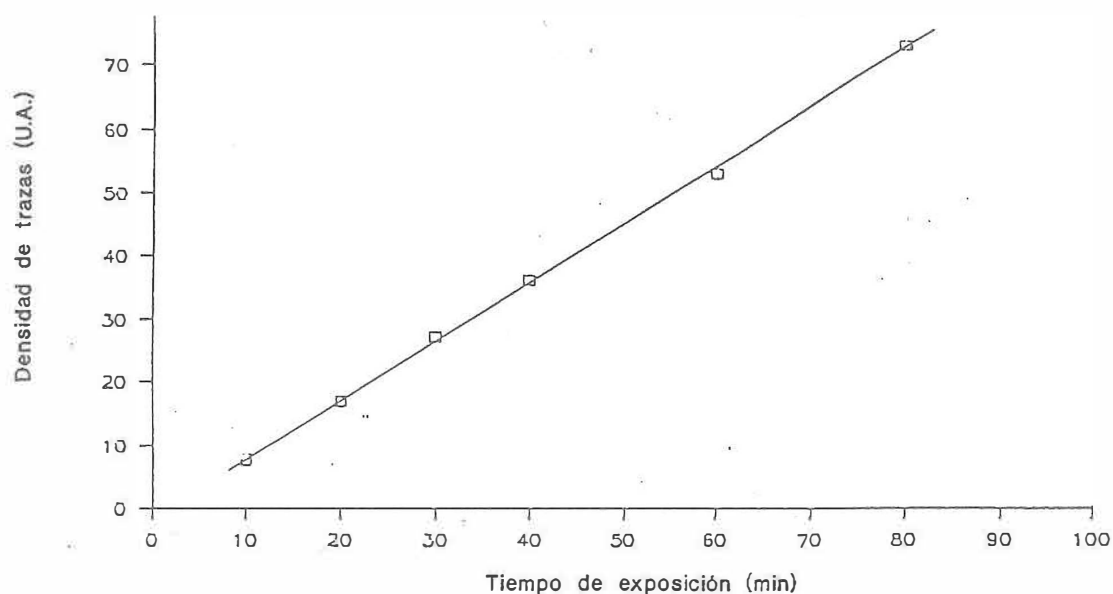


Figura 43. Respuesta del CR-39 a partículas alfa de Am-241.

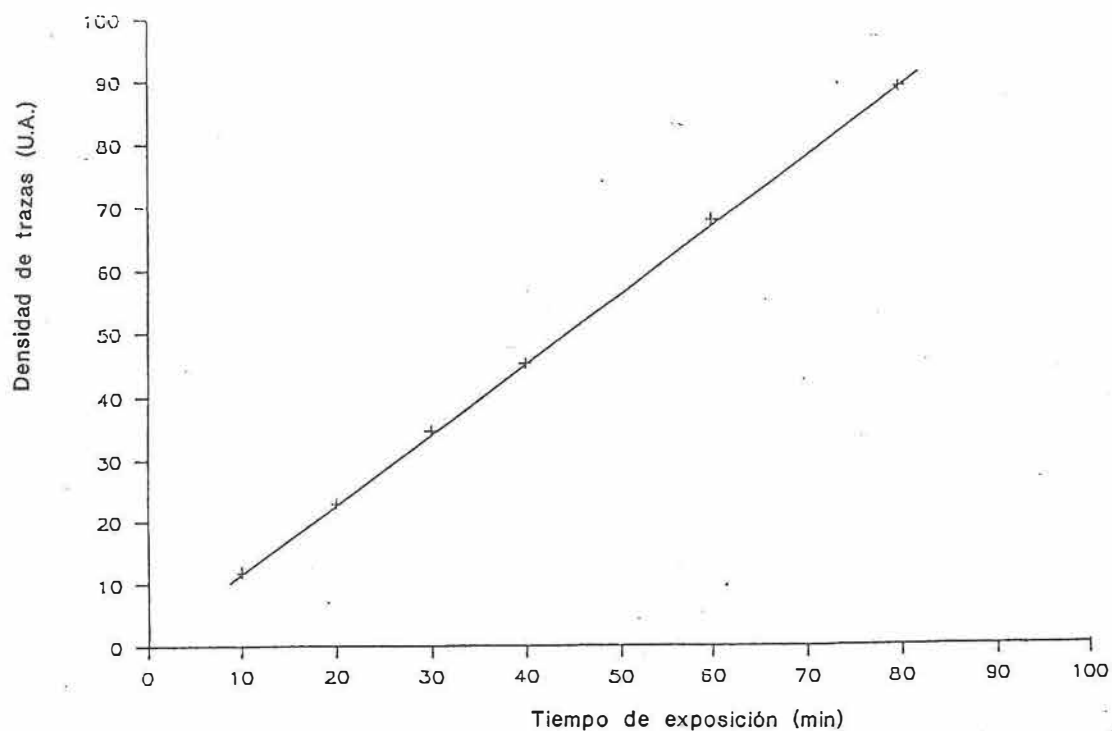


Figura 44. Respuesta del CR-39 a partículas alfa del Pu-239.

Haciendo la intercomparación con otro sistema de detector proporcional de ventana amplia.

Tabla XIII. Medición de superficies contaminadas con partículas alfa.

| Lugar de medición              | Lectura (Bq/100 cm <sup>2</sup> ) |                     |
|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
|                                | Detector Proporcional             | Detector por Trazas |
| Superficie de acero inoxidable | 5.7                               | 5.6                 |
| Superficie de concreto         | 12.2                              | 10.9                |
| Caja de guantes interior       | 57.3                              | 63.0                |
| Mesa de trabajo de madera      | 30.0                              | 47.0                |

#### IV.2.1 Mapeo de sitios mediante DTS.

Como se puede observar en la tabla XIV, las medidas obtenidas mediante DTS son mayores, esto es debido a que el detector proporcional (electrónico) tiene una punta de 70 cm<sup>2</sup> de área, y no es capaz de medir el total de la contaminación debido a lo inaccesible de los puntos.

Para confirmar esta teoría, se realizaron mediciones con tres sistemas diferentes en el piso de vinil de una instalación nuclear ahora cerrada, teniéndose los resultados mostrados en la tabla XV.

Tabla XIV. Comparación de medidas de contaminación alfa en diferentes puntos de una instalación.

| Lugar de medición         | Lectura (Bq/100 cm <sup>2</sup> ) |                     |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------|
|                           | Detector Proporcional             | Detector por Trazas |
| Piso debajo de la tubería | 7.3                               | 26.1                |
| Esquina de una pared      | 12.0                              | 35.0                |
| Esquina libre             | 14.0                              | 11.8                |
| Paso del canal de acero   | 4.0                               | 10.0                |

Tabla XV. Mediciones de áreas contaminadas mediante diferentes métodos de detección.

| Método de medición                                   | Lectura (Bq/100 cm <sup>2</sup> ) |                            |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
|                                                      | Lugar                             | Actividad en la superficie |
| Detector Proporcional Eberline (70 cm <sup>2</sup> ) | Edificio del Reactor              | 55.0                       |
| Detector de Centelleo Bicron (50 cm <sup>2</sup> )   | Edificio del Reactor              | 63.0                       |
| Detector por Trazas (25 cm <sup>2</sup> )            | Edificio del Reactor              | 58.0                       |

En este caso, es interesante destacar que en los DTS se quedó grabada la figura de la distribución de la contaminación, (marcas en las uniones de las losetas de vinil), como se muestra en la figura 45.



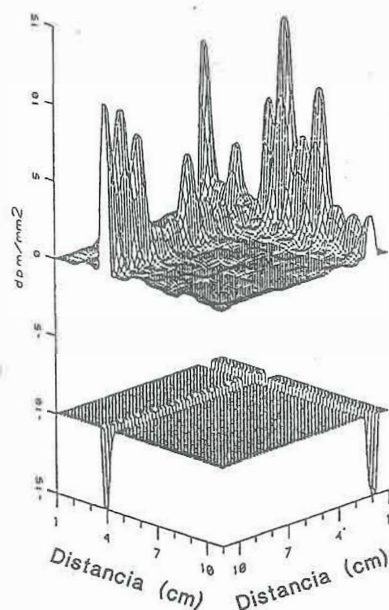


Figura 45. Distribución de la contaminación radiactiva en la unión de las losetas del piso

#### IV.2.2 Determinación de perfiles de contaminación.

Haciendo uso de los DTS, se diseñó un dispositivo en forma de estaca, conteniendo en su interior detectores por trazas, distribuidos a lo largo de la estaca, y de tal forma colocados que al introducir la estaca metálica en el piso, los detectores queden en contacto o a 1 mm. de distancia del material de los estratos de la tierra o área a evaluar. En la figura 46, se muestra un diagrama del diseño propuesto (1993). cabe decir que las primeras mediciones se realizaron con diseños prototipos de acero.

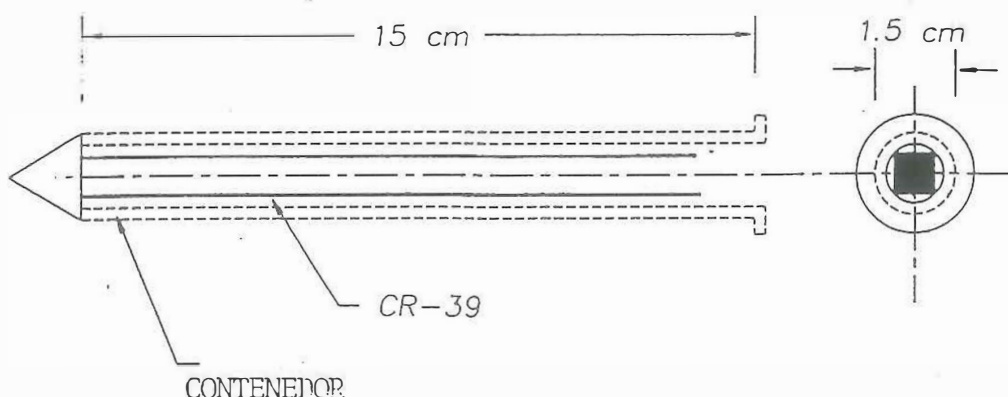


Figura 46. Diseño de la estaca para medición de perfiles de contaminantes a profundidad

La respuesta del sistema propuesto es excelente, mostrándonos los perfiles de distribución de los contaminantes, como se muestra en las figuras 47 y 48.

Como podemos observar, se obtiene una respuesta muy clara de donde se encuentra la máxima concentración de material radiactivo y su distribución a profundidad. La idea de la estaca funcionó, y actualmente se desarrolló un modelo que puede variar su longitud entre los 15 cm. y los 40 cm. de profundidad. El sistema se está comercializando.

#### IV.2.3 Material seleccionado y proceso químico.

Se seleccionó CR-39 por su buena respuesta, facilidad de manejo y resistencia a las ralladuras debidas al contacto con arenas y gravas.

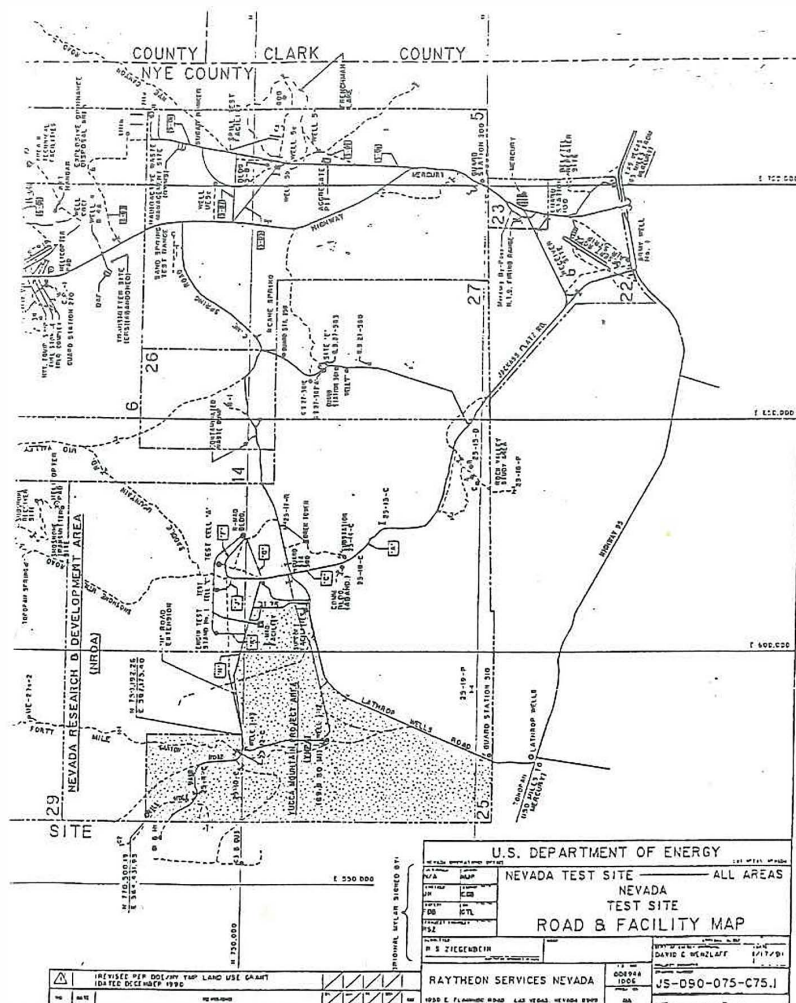


Figura 47. Mapa de localización de los DTS en el lugar.

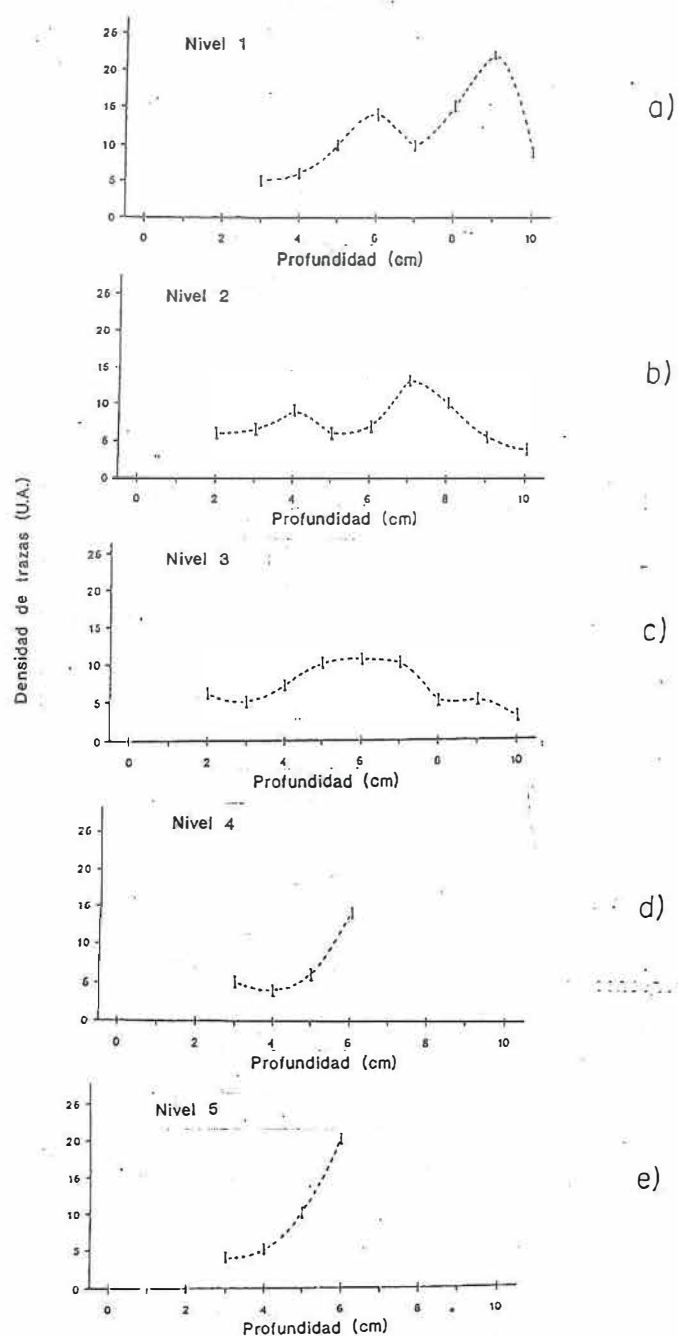


Figura 48. Perfiles de contaminación.

En el Oak Ridge National Laboratory (ORNL), se inició la investigación con LR-115 (celulosa), pero se cambió a CR-39 (1993).

En este caso, se usó CR-39 de la Fukuvi (japonés), con un espesor de 500  $\mu\text{m}$ . Se optimizó la respuesta para un paso de grabado químico, en KOH, 6N, a 70 C durante 16 horas, obteniéndose trazas de entre 25  $\mu\text{m}$  y 40  $\mu\text{m}$  de diámetro. El sistema de conteo fue mediante microscopio óptico y sistema de digitalización de imágenes (ORNL).

Las figuras 49 y 50, muestran las fotografías de las trazas formadas por plutonio (Pu-239) y de las trazas formadas por concentraciones de plutonio (Pu-239) y americio (Am-241).

Finalmente, en las figuras 51 y 52, se muestra la respuesta del CR-39 al americio (Am-241) de una fuente calibrada y la respuesta del mismo detector a tierra preparada con materiales y cantidades de material radiactivo.

Mediante el sistema de conteo por digitalización de imágenes, se obtuvo la distribución del diámetro de las trazas formadas por el americio (Am-241) que presenta tres energías. El sistema tiene la capacidad de discriminar entre ellas, como se muestra en la figura 53, siendo esta posibilidad de los DTS's como se ha mencionado anteriormente la de realizar determinación de energías (Espinosa *et al.* 1984a).

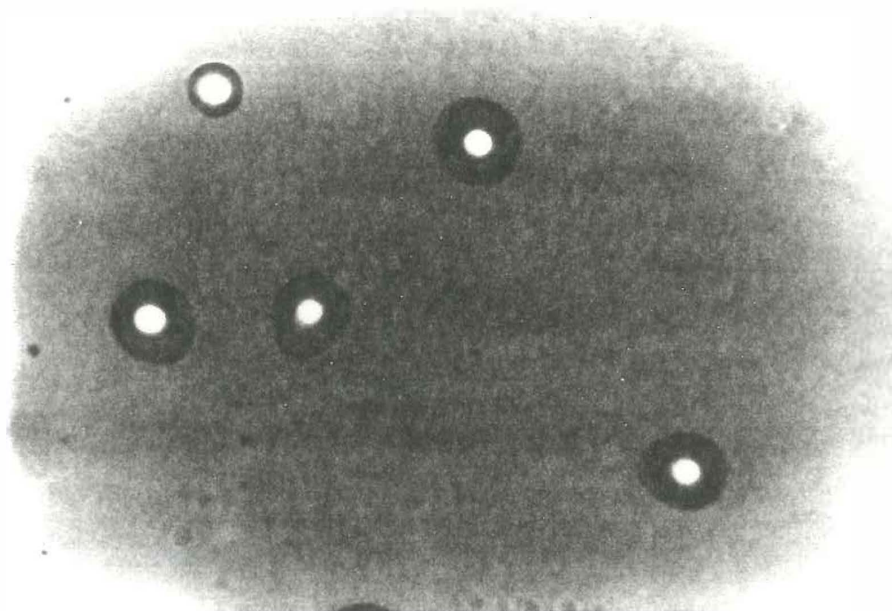


Figura 49. Trazas nucleares de Pu-239.

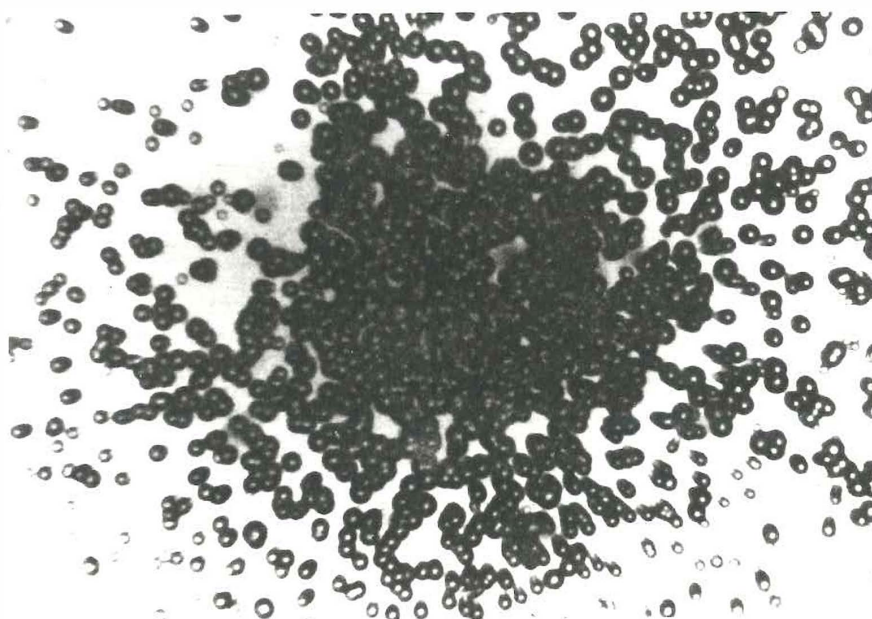


Figura 50. Trazas formadas por concentraciones de Pu-239 y Am-241.

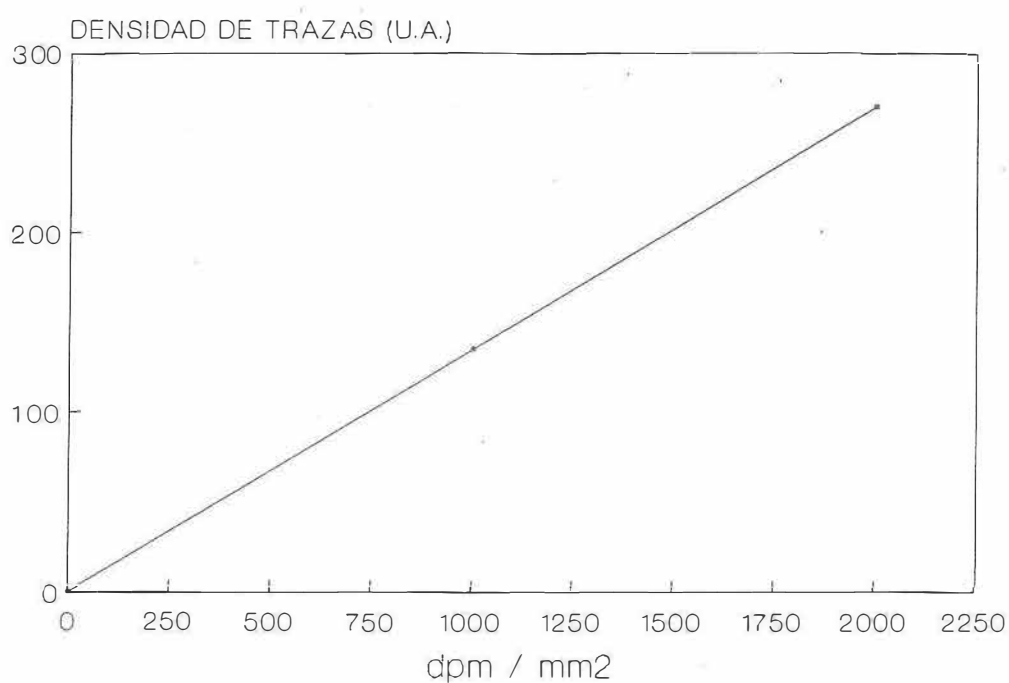


Figura 51. Respuesta del CR-39 al americio (Am-241).

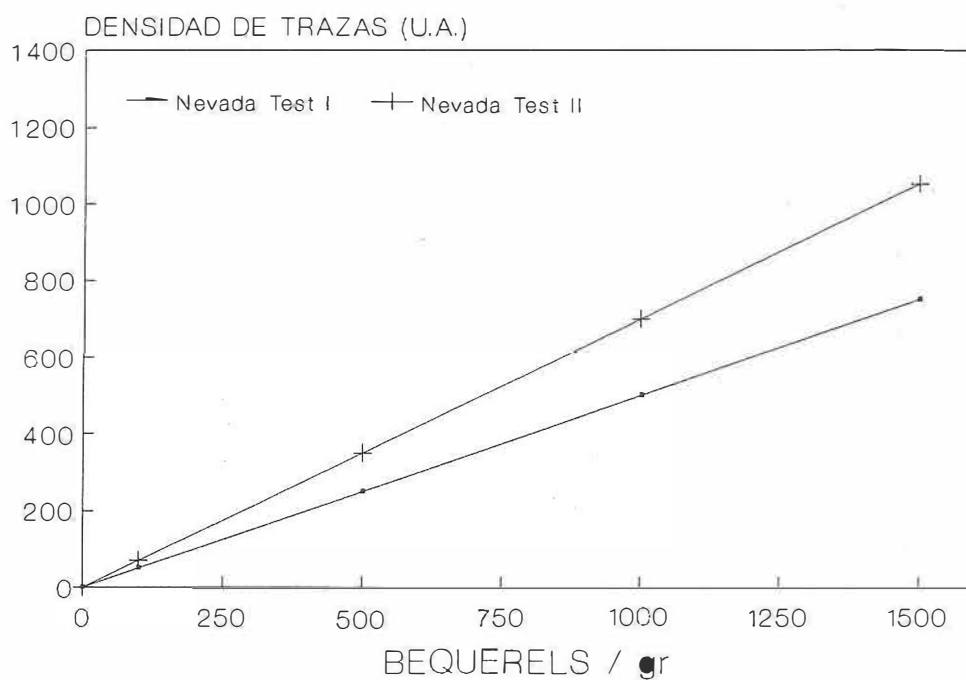


Figura 52. Respuesta del CR-39 a materiales preparados con diferentes contaminantes.



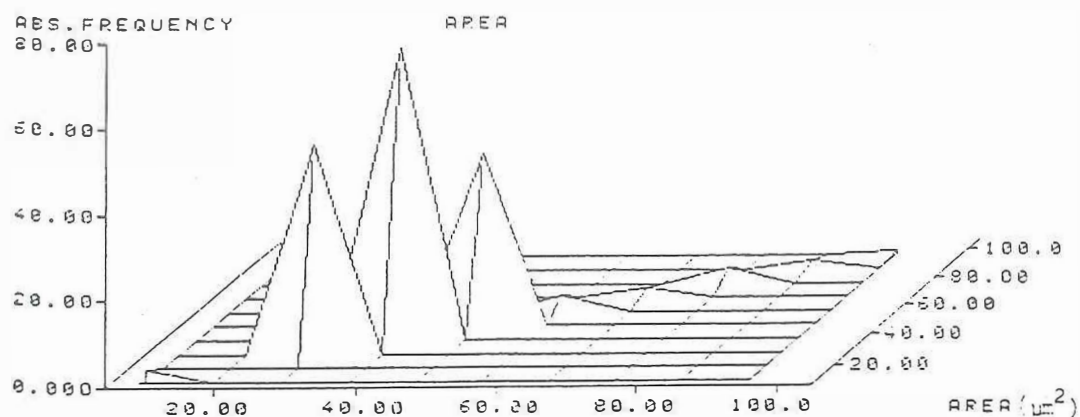


Figura 53. Distribución de frecuencias de áreas de tres diferentes energías de partículas alfa. (Abu-Jarad *et al.* 1991).

De esta forma, podemos sintetizar las posibilidades de este proceso de conteo automatizado:

- a) Conteo del número de trazas formadas.
- b) Determinación del área de cada una de las trazas.
- c) Determinación de diámetro de las trazas.
- d) Estadística y distribución del tamaño de las trazas.
- e) Manejo automático de datos.

f) Cálculo de exposición a la radiación, y conversión a unidades para las diferentes aplicaciones.

## V. APLICACIONES.

Como parte final de este trabajo, trataremos de figurar el futuro de los DTS. Para hacer esto, se mirará retrospectivamente a los números de publicaciones en este tema. En la década de los sesentas, en 1960 se publicó un artículo, en 1965 se tienen aproximadamente 15 artículos, y para 1970, casi 50 artículos, 1975 casi 100 artículos, y a partir de 1976 se formalizó la reunión internacional de detectores por trazas en sólidos, teniéndose más de 120 artículos. Para el año de 1979, 130 artículos fueron publicados, más algunos otros en otras revistas menos especializadas, y la controversia sobre los DTS encontró su máximo punto. Hubo escritos muy formales, donde se publicó que la formación de trazas era incontrolada y el sistema nunca funcionaría como medidor de partículas nucleares.

Pero el entusiasmo, la dedicación y la firme determinación de algunos grupos, logró que para los ochentas, la detección por trazas en sólidos se considerara un éxito, tanto para los científicos involucrados en materiales, como para la gente en las áreas de dosimetría, física nuclear y física de la salud.

Así en 1981, el número de trabajos presentados y publicados fue de casi 200. A partir de ese momento, los beneficios de los DTS se dejaron de

discutir y en el campo experimental se encontraron aplicaciones básicas para los DTS.

En 1983, por primera vez se calificaron y se mandaron a arbitrar los trabajos presentados en la reunión internacional, elevando así la calidad de los artículos, dando un mayor realce académico al trabajo realizado, y por primera vez, se presentaron los trabajos de detección por trazas en sólidos fuera de Europa.

La creación de la Sociedad Internacional de la Comunidad de Detectores por Trazas en Sólidos, y la publicación de más de 250 artículos (135 en la revista Nuclear Tracks y 117 en otras revistas como Health Physics, Radiation Protection Dosimetry, Radiation Effects, entre otras). En 1983, fue un paso muy importante para la consolidación de este método de medición de la radiación ionizante.

Para 1985, el número de participantes fue superior a los 200, con la representación de 40 países. Paralelo a este crecimiento, el uso de polímeros como material detector creció en casi tres veces en relación al año anterior.

En la figura 54 se muestra el número de trabajos publicados en base a los congresos internacionales, que han sido el eje de las actividades en el campo de los DTS.

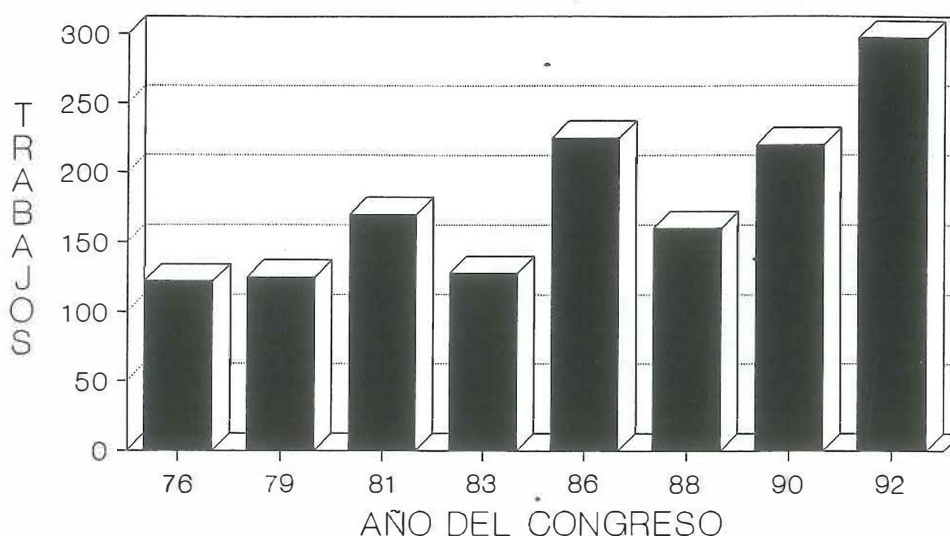


Figura 54. Número de trabajos presentados en los más recientes congresos internacionales.

En la figura 55, se muestran la proporción de participantes contra el número de países que enviaron representantes a las reuniones de los últimos 16 años.

En los últimos 4 años, se han organizado reuniones tanto locales como internacionales, en tópicos y aplicaciones específicas de los DTS en los campos de rayos cósmicos, radón, dosimetría de neutrones, autoradiografía, filtros para aplicaciones industriales, contaminación y descontaminación, ciencias de la tierra e hidrología y problemas ambientales y epidemiológicos.

En la figura 56, se muestra la forma como ha variado el número de artículos publicados en temas como el radón, neutrones y materiales.

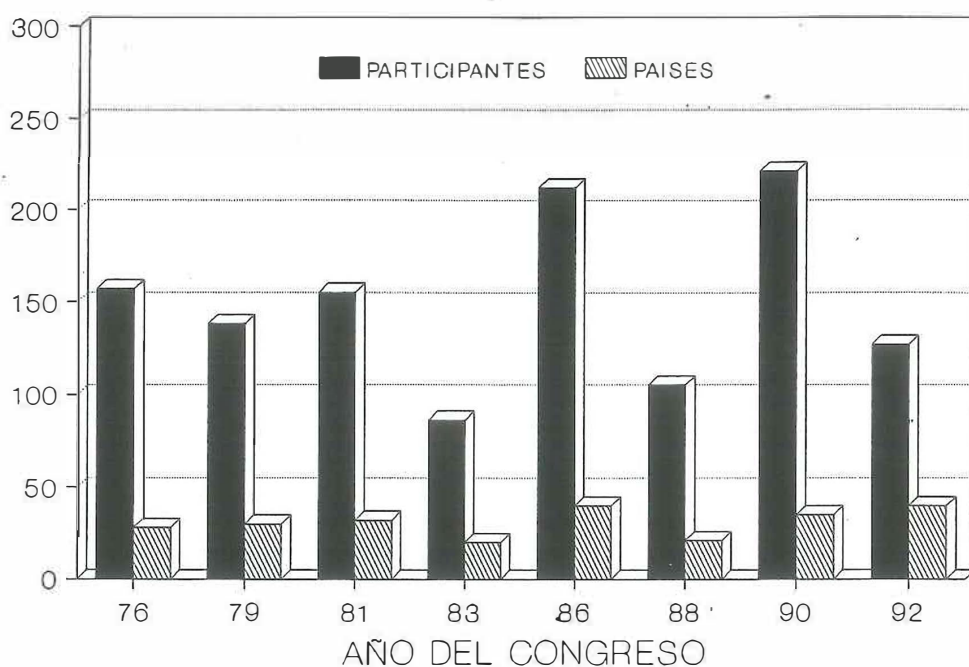


Figura 55. Número de participantes y países en los últimos congresos.

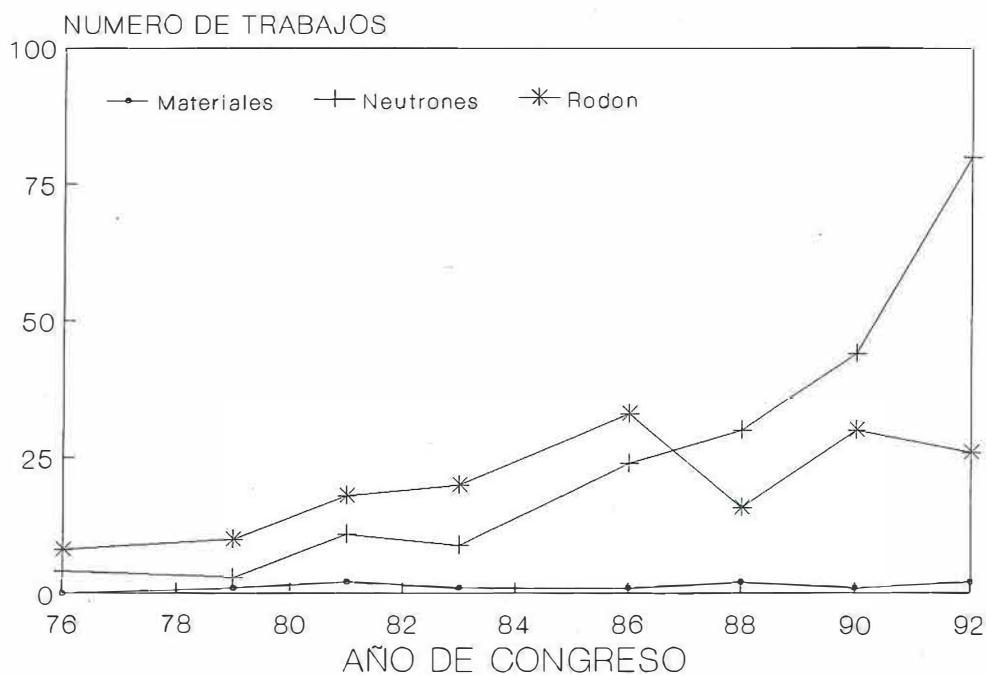


Figura 56. Número de trabajos presentados por temas en los últimos congresos internacionales. a) Radón. b) Neutrones. c) Materiales.

Como se mencionó en capítulos previos, el porcentaje de publicaciones respecto al tema de trazas nucleares y sus aplicaciones se incrementa día con día, esto se observa cuando se hace la revisión bibliográfica sobre medición de radiación.

La comunidad internacional en el tema de trazas, aunque pequeña comparada con otras áreas, está activa produciendo, y sobre todo, cada día se cuenta con más grupos interesados, viéndose que el futuro de los DTS es prometedor.

Hay que hacer notar la importancia del estudio y el mejor conocimiento en los aspectos fundamentales en la formación de trazas. Es necesario investigar para el desarrollo y producción de nuevos materiales detectores, con características óptimas para la detección de partículas ionizantes y el desarrollo de la instrumentación adecuada para que el método de DTS se vuelva un sistema de uso común y se comercialice, como los otros métodos ya establecidos.

Es interesante hacer destacar que en este año de 1993, se produjo el primer prototipo para obtener un proceso "cerrado" en el grabado de los detectores. Esto es, un dispositivo donde se laven, graben, descontaminen y queden listos los detectores para ser contados o analizados sin que se tengan que manipular manualmente cada uno de los detectores.

Respecto al sistema de lectura, con los últimos adelantos en el proceso



de digitalización de imágenes asociado a una PC, la respuesta en el sistema de conteo se ve muy cerca.

La idea total, será poner los DTS al alcance de cualquier grupo de investigación, y que el propio método de DTS sea competitivo respecto a otros métodos de medición de radiación ionizante.

#### V.1 Los DTS en los diferentes campos de la ciencia.

En la bibliografía reciente, encontramos que los DTS son una herramienta muy empleada en diferentes campos de la ciencia y la tecnología, como:

##### 1.- Ciencias de la tierra y del espacio.

- a) Fecheo mediante trazas (Geocronología, Geofísica y Arqueología).
- b) Partículas alfa producto de *recoils*.
- c) Rayos cósmicos.
- d) Vientos solares.
- e) Materiales extraterrestres.

##### 2.- Ciencia y tecnología nuclear.

- a) Física nuclear.
- b) Fotofisión.
- c) Decaimiento de núcleos con alto spin.
- d) Mapeo de elementos y análisis isotrópico.

##### 3.- Dosimetría de la radiación.

- a) Neutrones y fragmentos de fisión.

b) Aceleradores de alta energía.

c) Reacciones  $(n,\alpha)$ .

#### 4.- Tecnología.

a) Membranas porosas y filtros.

b) Contadores de virus y bacterias.

c) Superfluidos.

d) Superconductores.

e) Metalurgia.

f) Gemología.

g) Trazadores líquidos.

#### 4.- Tecnología nuclear.

a) Autoradiografía.

b) Radiobiología.

c) Reactores.

d) Exploración de Uranio.

#### 5.- Tecnología de estado sólido.

a) Estructura interna de sólidos.

b) Radiografía con neutrones.

c) Iones pesados y protones en la materia.

Después de este largo listado, podemos concluir que las posibilidades de los DTS son múltiples y muy variadas, además de que cada día se encuentran más aplicaciones en campos diversos, haciendo de este método de medición un tema interesante con grandes posibilidades de desarrollo.

## V. CONCLUSIONES.

Los DTS son una nueva opción como detectores de radiación ionizante, que usan materiales de estado sólido como el medio de detección. Quedando abierta la posibilidad de investigación en nuevos materiales.

Desde la aparición de los DTS sus aplicaciones han sido muy variadas y en gran cantidad de campos de la ciencia. Además de que cada día se encuentran nuevas aplicaciones. De esta forma el desarrollo experimental se ha adelantado a la teoría.

En el capítulo II se resumen muchos años de investigación, sintetizando los resultados a la fecha; en la optimización de los parámetros de formación de trazas y en la selección de materiales como DTS, dando una base para nuevas investigaciones.

La investigación experimental y los resultados obtenidos y descritos en los capítulos III y IV, dan lugar a sistemas de medición y aplicaciones específicas como son la medición y evaluación de radón a nivel ambiental y la determinación de contaminantes trasuránicos. Lo más importante de todo esto, es que el análisis y medición de radón y contaminantes radiológicos ambientales son la base fundamental para investigaciones en otras áreas, como

es el caso en "Salud Pública" con los estudios e investigaciones sobre "Cáncer Pulmonar", "Leucemia", "Glándula Tiroides" y estudios "Epidemiológicos".

Como consecuencia de este trabajo, se cuenta con un sistema de detección para radón, haciendo posible la iniciación de otros estudios en base a estas mediciones.

Si se considera tan solo el estudio del radón y sus efectos; recientemente, en el 5to. simposio internacional "The Natural Radiation Environment", de las once sesiones realizadas, nueve fueron referentes a radón, su evaluación, control y mitigación. Entre 1992 y 1993, se realizaron más de 20 reuniones internacionales sobre el radón, con asistencia de organismos mundiales.

La Comunidad Europea, organizó la conferencia "Radón-2000" en 1992, con la presencia de:

#### ORGANIZADORES

National Radiological Protection Board.  
 Department of the Environment.  
 Department of Health.  
 Welsh Office.  
 Scottish Office.  
 Northern Ireland Office.  
 Health and Safety Executive

#### ASOCIADOS

Commission of the European Communities.  
 World Health Organization.  
 Building research Establishment.  
 Health Education Authority.

Association of District Councils.  
 Association of Country Councils.  
 Associations of Metropolitan Authorities.  
 Convention of Scottish Local Authorities.  
 Institution of Environmental Health Officers.  
 Royal Environmental Health Institution of Scotland.  
 The Law Society of Scotland.  
 Confederation of British Industry.  
 Trades Union Congress.  
 Royal Institute of British Architects.  
 Royal Institution of Chartered Surveyors.  
 National Association of Estate Agents.  
 Building Employers' Confederation.  
 Federation of Master Builders.  
 Friends of the Earth.  
 The Society for radiological Protection.  
 British Institute of Radiology.  
 Institute of Physical Sciences in Medicine.  
 National federation of Housing Associations.  
 Associations of British Insurance.

Esto nos da una idea de la importancia del tema. Por otra parte, la Agencia de Protección Radiológica de los Estados Unidos de America (US EPA), ha realizado desde 1988 una búsqueda y medición nacional de niveles de radón en casas, edificios públicos y bases militares.

Entre la Comunidad Europea y la Agencia de Protección Ambiental (EPA), han invertido billones de dólares en el tema, y actualmente siguen trabajando para el control y mitigación de esos niveles. También el EPA ha producido y distribuido un manual para la población en general respecto al radón en casas, riesgos radiológicos y su control. (En USA, el EPA considera de 30,000 a 50,000 muertes anuales por causas de radón natural).

En 1989, se promulgó un reglamento y se limitó a  $15 \text{ Bq/m}^3$  (0.4 pCi/l) la

concentración de radón en interiores, considerando cualquier cantidad mayor como un *Riesgo Radiológico Potencial* para el público en general. Aspecto que está cimbrando a todas las compañías de seguros.

El Comité Internacional de Protección Radiológica (ICRP), máximo organismo internacional en aspectos radiológicos, está trabajando en las recomendaciones apropiadas sobre exposición a radón en casas, pues no se tiene ninguna legislación sobre riesgos radiológicos por vivir en casas con más de  $15 \text{ Bq/m}^3$  de concentraciones de radón.

En 1993 el US EPA ha aceptado a los DTS como un método válido para la medición de radón intramuros y de fuentes externas, quedando en estudio su legislación.

Finalmente, en lo referente a contaminantes radiológicos trasuránicos, su distribución, evaluación, procesos de remediación y limpieza; existen "ciertas regiones" con grandes problemas y en donde los detectores plásticos (DTS) son la alternativa. Considerando las contribuciones más importantes: la formación de profesionistas especializados en este campo, la creación de la infraestructura necesaria para la investigación y aplicación de los DTS y muy concretamente un sistema completo para la medición y evaluación de radón intramuros, un sistema para la detección de materiales trasuránicos y contaminantes radiológicos superficiales y un sistema de análisis por medio de digitalización de imágenes que nos ayudará para el mejor conocimiento de la formación de trazas.

## LITERATURA CITADA

- Abu-Jarad, F., M.A. Islam and A. Que. 1991. Usage of an interactive image analysis system for studying various parameters of etched tracks in CR-39 and Makrofol E. Nucl. Tracks Radiat. Meas. 19, 133-137.
- Auxier, J., K. Becker and R.D. Johnson. 1975. ORNL. Reporte interno.
- Baum, J.W. 1970. Comparison on distance and energy-restricted linear energy transfer for heavy particles with 0.25 to 1000 MeV/amu. Proc. Second Symp. on Microdosimetry, 20-24 Oct., Ispro, Italy, 653-666, Brussels: Euratom.
- Bean, C.P., M.V. Doyle and G. Entine. 1970. Etching of submicron pores in irradiated mica. J. Appl. Phys. 41, 1454-1459.
- Benton, E.V. 1967. Charged particle tracks in polymers No.4: Criterion for track-registration. USNRDL-TR-67-80; U.S. Nav. Rad. Def. Lab., San Francisco, Calif.
- Benton, E.V. and R.P. Hanke. 1969. Sensitivity Enhancement of Lexan Nuclear Track detector. Nucl. Instr. Methods, 70, 183-184.
- Benton, E.V. 1970. On latent track formation in organic nuclear charged particle track detectors. Rad. Effects 2, 273-280.
- Blanford, G.E. Jr., R.M. Walker and J.P. Wefel. 1970. Calibration of plastic track detectors for use in cosmic ray experiments. Rad. Effects 5, 41-45.
- Borau, J., A. Gonzalez, G. Espinosa and J.I. Golzarri. 1994. Measuremets of radon Levels Inside Mexican Caves. Nucl. Tracks and Radiat. Meas. (Enviado para su publicación).
- Bovey, F.A. 1958. The effects of ionizing radiation on natural and synthetic high polymers. New York: Wiley-Intersciences.
- Blanford, G.E. Jr., R.M. Walker and J.P. Wefel. 1970. Enhancement of track etching by a spark discharge. Rad. Effects, 3, 263-266.
- Castaño, V.M., G. Espinosa. 1990. Studies on the Fractal Structure of the Dielectric Breakdown in Polymers Sheets. Material Letters, 9, No.10, p.365-368.



- Castillo, F., I. Gamboa, G. Espinosa, G. Somogyi, A. Tapia. 1984. Homogeneity and Fissure Determination on Uranium Bars with SSNTD. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. 8, p.487-489
- Crannell, H., C.J. Crannell, F.J. Kline and L. Battist. 1969. Particle track enhancement in cellulose nitrate by application of an electric field. Science, 166, 606-607.
- Crawford, W.T., W. DeSorbo and J.S. Humphrey. 1968. Enhancement of track etching rates in charged particle-irradiated plastics by a photo-oxidation effect. Nature 220, 1313-1314.
- Charlesby, A. 1960. Atomic radiation and polymers. London: Pergamon Press.
- DeSorbo, W. and J.S. Humphrey. 1970. Effects upon track etching rates in charged particle irradiated polycarbonate film. Rad. Effects. 3, 281-282.
- Diaz, T., G. Espinosa, A. Moreno, I. Gamboa, J.I. Golzarri. 1984. Analysis of Different Mexican Polymers as Solid State Nuclear Track Detectors. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. 8, p.133-137
- Durrani, S.A. and R.K. Bull. 1987. Solid State Nuclear Track Detectors, principles, methods and applications. Oxford: Pergamon Press.
- Espinosa, G., A. Moreno. 1979. Alpha Detection by SSNTD'S. Solid State Nuclear Track Detectors. Proceedings of the 10th International Conference. Lyon (France). p. 777-794
- Espinosa, G., R.V. Griffith. 1981a. Evaluation fo a Commercial Semi-Automatic System for Counting Tracks in Solid State Nuclear Detectors used for Personnel Dosimetry. This work was performed under the auspices of the U.S. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory under contract No. W-7405-Eng-48 PNL-SA-9950.U.S.Dept. of Energy by Bettelle Memorial Institute. p.88-96.
- Espinosa, G., R.V. Griffith. 1981b. Diseño de una cámara para grabado electroquímico en SSNTD. Trabajo presentado en el XXIV Congreso Nacional de Física, SMF.
- Espinosa, G., A. Moreno, J.I. Golzarri. 1981a. Uranium Determination in Water using Solid State Nuclear Detectors. Nuclear Tracks. Methods, Instruments and Applications. 1, p.591-595.
- Espinosa, G., J.I. Golzarri, L. Tommasino, F. Raponi, F. 1981b. Electrochemical Etching Registration Efficiency and Formation Time. Nuclear Tracks, Methods, Instruments and Applications. 1, p.241-244
- Espinosa, G., A. Moreno, J.I. Golzarri, R.V. Griffith. 1982. Personnel Neutron Dosimetry by Combined Method of Decoration and Electrochemical Etching. PNL-SA-10-714. Prepared for the U.S.Department of Energy by Bettelle Memorial Institute. p.217-225

- Espinosa, G., L. Tommasino, R. Griffith, I. Gamboa, I. Jacobson, J.I. Golzarri. 1984a. Uranium Alpha Spectroscopy and Angular Dependence for SSNTD. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. 8, p. 433-435.
- Espinosa, G., R.V. Griffith, A. Moreno, J.I. Golzarri. 1984b. The Status Personnel Neutron Dosimetry in Mexico. *PNL-SA-12352* Prepared for the U.S.Department of Energy (USA) Under Contract DE-AC06-76RLD. 1830 (June 1984) p.3-5
- Espinosa, G., J.I. Golzarri, I. Gamboa, I. Jacobson. 1986a. Natural Radiactivity in Mexican Building Materials by SSNTD. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. 12, p.767-770.
- Espinosa, G., J.I. Golzarri, I. Gamboa, L. Tommasino, R. Griffith. 1986b. Digital Image Counting System for Nuclear Track Detectors. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. 12, p.235-239.
- Espinosa, G., I. Gamboa, and J.I. Golzarri. 1987. El CR-39 como dosimetro de muy altas dosis de radiación gamma. XXX Congreso Nacional de Investigación en Física, Mérida, Yuc.
- Espinosa, G., I. Gamboa, J.I. Golzarri. 1988. CR-39 Gamma Response. Trabajo presentado en el 14th International Conference on Solid State Nuclear Track Detectors, Pakistan.
- Espinosa, G., 1990. Radon Monitoring in Radioprotection (México). Radon Monitoring in Radioprotection, Environmental Radioactivity and Earth Sciences, p. 397-400. ICTP, Trieste, Italy. Ed. World Scientific. Publishing Ltd.
- Espinosa, G., R.B. Gammage. 1990. Radon Levels Inside Residences in Mexico City. Radiation Protection Dosimetry, 34, p. 183-185.
- Espinosa, G., V.M. Castaño. 1990. Fractal Analysis of SSNTD Detectors and Materials. Radiation Protection Dosimetry, 34, p. 29-30.
- Espinosa, G., V.M. Castaño. 1991. High Voltage Effects in SSNTD Materials and its Consequences on the Fractality. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 19, p. 149-150.
- Espinosa, G., V.M. Castaño, J.I. Golzarri. 1991a. Permeability of Some Materials to Radon Gas. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 19, p. 307-308.
- Espinosa, G., J.I. Golzarri, A. Cortés. 1991b. Radon Measurements of Groundwater in Mexico. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 19, p. 305-306.
- Espinosa, G. 1991. Past, Present and Future of Materials, Methodology and Instrumentation in Particle Tracks in Solids. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 19, p. 843-846.

- Espinosa, G.** and S. Ramos. 1992. Indoor Radon Measurement Methodology by Solid State Nuclear Track Detectors. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 161, p. 307-312.
- Espinosa, G.**, F. Fernandez and V.M. Castaño. 1992. Design and Construction of an Electrochemical Etching Power Supply. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 20, p. 383-387.
- Espinosa, G.** and R.B. Gammage. 1993.. Measurements Methodology for Indoor Radon Using Passive Track Detectors. *Applied Radiation and Isotopes*. 44, 719-723.
- Espinosa, G.** 1994. Development of the Instrumentation for Counting and Analysis of Particle Tracks in Solids. *Nucl. Tracks and Radiat. Meas.* (Enviado para su publicación).
- Espinosa, G.**, J.I. Golzarri and R.B. Gammage. 1994a. Comparative Studies of Polymer Materials as Radon Protection Coating. *Nucl. Tracks and Radiat. Meas.* (Enviado para su publicación).
- Espinosa, G.**, A. Martinez and J.I. Golzarri. 1994b. Shrimp Shells as Nuclear Track Detectors. *Nucl. Tracks and Radiat. Meas.* (Enviado para su publicación).
- Espinosa, G.**, V. Rodriguez, J.I. Golzarri and V.M. Castaño. 1994c. Nuclear Tracks in Sinterized Gemstones. *Nucl. Tracks and Radiat. Meas.* (Enviado para su publicación).
- Espinosa, G.** and R.J. Silva. 1994. Determination of Alpha Contaminated Soil Profiles Using Nuclear Track Detectors. *J. of Radioanal. and Nuclear Chem.* (Enviado para su publicación)
- Espinosa, G.**, R.B. Gammage, K.E. Meyer. 1994d. Response of Different Polycarbonates Materials to Alpha Particles. *Applied Radiation and Isotopes* (Enviado para su publicación).
- Espinosa, G.** and R.B. Gammage. 1994. Radon Levels Survey at the Underground Transportation Metro System in Mexico City. *Radiation Protection Dosimetry* (Enviado para su publicación).
- Fain, J., M. Monnin and M. Mountret. 1971. Heavy ion effects in polymers. *Thirth Symposium on Radiation Chemistry, Tihany, Hungary, 10-15 May.*
- Fain, J., M. Monnin and M. Mountret. 1972. Spatial energy-density distributions around ion paths in polymers. *Proc. 8th Int. Conf. on Nuclear Photography and Solid State Nuclear Track Detectors, Bucharest, Rumania.* 1, 34-72.
- Fain, J., M. Monnin and M. Mountret. 1974. Spatial energy distribution around heavy ion paths. *Rad. Research*, 57, 379-389.

- Fleischer, R.L., P.B. Price and R.M. Walker. 1965. The ion explosion spike mechanism for formation of charged particle tracks in solids. *J. Appl. Phys.* 36, 3645-3652.
- Fleischer, R.L., P.B. Price, R.M. Walker and E.L. Hubbard. 1967. Criterion for registration in dielectric track detection. *Phys. Rev.* 156, 353-355.
- Fleischer, R.L., P.B. Price and R.T. Woods. 1969. Nuclear particle track identification in inorganic solids. *Phys. Rev.* 88, 563-567.
- Fleischer, R.L. and H.R. Hart Jr. 1972. Fission track dating: techniques and problems. in *Proceedings Burg Wartenstein Conference on Calibration Hominoid Evolution*, W.W. Bishop, J.A. Miller and S. Cole (eds.), 135-170, Edinburgh: Scottish Academic Press.
- Fleischer, R.L., P.B. Price and R.M. Walker. 1975. *Nuclear Tracks in Solids, principles and applications*. Berkeley: University of California Press.
- Fleischer, R.L. 1980. G.E. Research and Development Co. Comunicación Personal.
- Gamboa, I., **G. Espinosa**, A. Moreno, J.I. Golzarri, F. Castillo. 1984a. Uranium Determination in Minerak Rocks by SSNTD. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*. 8, p.443-445.
- Gamboa, I., I. Jacobson, J.I. Golzarri, **G. Espinosa**. 1984b. Uranium Contents Determination in Commercial Drinkable Milk. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*. 8, p.461-463.
- Gammage, R.B. and P.V. Wheeler. 1993. Testing CR-39 for surface alpha contamination monitoring. *Helath Phys.* 65, 209-213.
- Griffith, R.V., T.A. McMahon and **G. Espinosa**. 1984. A commercial bacterial colony counter for semiautomatic track counting. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 8, 215-218.
- Guel, S., A. Moreno, L. Barriet, **G. Espinosa**, J.I. Golzarri. 1984. Nuclear Tracks Pseudocoloring by Illumination Wavefront Angle Variation. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*. 8, p.219-222.
- Hannay, N.B. ed. 1959. *Semiconductors*. New York: Reinhold Press.
- Heckman, H.H., B.L. Perkins, W.G. Simon, F.M. Smith and W. Barkas. 1960. Ranges and energy loss processes of heavy ions in emulsions. *Phys. Rev.* 117, 544-556.
- Jacobson, I., I. Gamboa, **G. Espinosa**, A. Moreno. 1984. Uranium Determination in Dental Ceramics. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*. 8, p.465-467.



- Katz, R. and E.J. Kobetich. 1968. Formation of etchable tracks in dielectrics. *Phys. Rev.* 170, 401-405.
- Kearfott, K.J. 1989. Preliminary Experiences with Rn-222 Gas in Arizona Homes. *Health Physics*, 56, 169-179.
- Khan, H.A., R. Brandt, N.A. Khan and K. Jamil. 1984. Critical angles of etching of CR-39 track detectors. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 35, 111-116.
- Khan, H.A., I.E. Qureshi and M. Tufail. 1993. Passive Dosimetry of Radon and its Doughters using SSNTD. *Radiat. Protec. Dos.* 46, 149-170.
- Kobertich, E.J. and R. Katz. 1968. Energy deposition by electron beams and delta rays. *Phys. Rev.* 170, 391-396.
- Lindhard, J. and M. Schareff. 1961. Energy dissipation by ions in the keV region. *Phys. Rev.* 124, 128-130.
- Lindhard, J. and P.V. Thomsen. 1962. Sharing of energy dissipation between electronic and atomic motion. in *Radiation Dammage in Solids*, 1, 66-76, Vienna: Int. Atomic Energy Agency.
- Maurette, M. 1970. Track formation mechanisms in minerals. *Rad. Effects*, 3, 149-154.
- Mayer, K.E., R.B. Gammage, C.S. Dudney, I.M. Angelin, **G. Espinosa**, R.V. Wheeler and M. Salasky. 1993. Procedures for utilization of alpha track detectors for characterization of gross alpha emission indoor surfaces. Report to DOE, under contract DE-AC05-84OR 21 400, with Martin Marietta Energy Systems Inc.
- Mayer, K.E., R.B. Gammage, **G. Espinosa**, R.V. Wheeler, M. Salasky. 1994. Mapping of Indoors Surface Alpha Contamination Using Lantrak Alpha Track Detectors. *Radiation Protection Dosimetry* (Enviado para su publicación).
- Monnin, M. 1970. Mechanism of the formation of tracks in polymers. *Rad. Effects*. 5, 69-73.
- Paretzke, H.G. 1973. Comparison of track structure calculations with experimental results. 4th Symp. on Microdosimetry, Verbania Pollanza, Italy, 24-28 Sept.
- Paretzke, H.G., E.V. Benton and R.P. Henke. 1973. On particle track evolution in dielectric track detectors and charge identification through track radius measurement. *Nucl. Instr. Methods*, 108, 73-80.
- Price, P.B. and R.M. Walker. 1962. Electron microscope observation of etched tracks from spallation recoils in mica. *Phys. Rev. Letters* 8, 217-219.

- Price, P.B., R.L. Fleischer, D.D. Peterson C. O'Ceallaigh, D. O'Sullivan and A. Thompson. 1967. Identification of isotopes of energetic particles with dielectric track detectors. *Phys. Rev.* 164, 1618-1620.
- Price, P.B., R.L. Fleischer, D.D. Peterson, C. O'Ceallaigh and A. Thompson. 1968. Plastic track detectors for identifying cosmic rays. *Can. J. Phys.* 46, S1149-S1153.
- Raya, R. 1985. Optimización del espectro de energías de los fragmentos de fisión del Cf-252 con detectores de trazas en estado sólido. Tesis para obtener el título de Físico (Dirección: G. Espinosa) FCUNAM.
- Segovia, N. 1978. Trazas nucleares en vidrio. México: FCUNAM. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Física).
- Seitz, M.G. 1972. Heavy ion irradiation studies in terrestrial materials. Ph.D. Thesis, Washington University.
- Sigsbee, R.A. and R.H. Wilson. 1973. Electron irradiation dilation in SiO<sub>2</sub>. *Appl. Phys. Letters*, 23, 541-542.
- Sohrabi, M. (1978). ORNL. Tesis Doctoral.
- Sohrabi, M. and K.M. Shirazi. 1984. Optimization of etchants for electrochemical etching of tracks in polycarbonate neutron personnel dosimeters. *Nucl. tracks Radiat. Meas.* 8, 117-120.
- Somogyi, G. 1966. A new possibility for determination of energy distributions of charged particles in solid state track detectors", *Nucl. Inst. Methods*, 42, 312-314.
- Somogyi, G., I. Hunyadi, A.F. Hafez and G. Espinosa. 1984. A new possibility for high-resolution spectroscopy of nuclear particles entering CR-39 at selected DIP angles. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 8, 163-166.
- Tommasino, L., G. Zapparoli, P. Spiezia, R.V. Griffith and G. Espinosa. 1984. Different etching process of damage track detectors for personnel neutron dosimetry. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 8, 335-339.
- Vargas, C. 1982. Detección de neutrones rápidos por trázaz en polycarbonato. Tesis para obtener el título de Físico (Dirección: G. Espinosa) FCUNAM.
- Varley, J.H.O. 1954a. A mechanism for the displacement of ions in an ionic lattice. *Nature* 174, 886-887.
- Varley, J.H.O. 1954b. New interpretation of irradiation-induced phenomena in alkali halides. *J. Nucl. Energy*, 1, 130-143.
- Viques, S., G. Espinosa and V.M. Castaño. 1991. Image processing analysis of chemical tracks. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 19, 271-272.

Young, D.A. 1958. Etching of radiation damage in lithium fluoride. *Nature*, 182, 375-377.



## APENDICE A.- ASPECTOS BASICOS

### A.1 Mecanismos de formación.

#### A.1.1 Depósito de energía en sólidos

##### A.1.1.1 Efecto en cristales y vidrio.

##### A.1.1.2 Efectos en polímeros.

#### A.1.2 Mecanismos en la producción de trazas:

### A.2 Aspectos básicos en el grabado de la traza formada por las partículas ionizantes.

#### A.2.1 Formación geométrica de la traza grabada.

#### A.2.2 Geometría de la traza grabada para $V_t$ variable.

## A.1 MECANISMOS DE FORMACION.

"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".

Aún cuando las trazas se han formado en los materiales desde el principio de la creación, no fue hasta fin de los 50's y principios de los 60's cuando se tuvo un conocimiento científico de ellas. Young (1958), anuncia la posibilidad de formación de trazas de partículas nucleares en halogenuros alcalinos. Posteriormente Price y Walker (1962a) observaron mediante un microscopio electrónico de transmisión que el diámetro de la región con daño intenso era de aproximadamente 50 Å para mica expuesta a fragmentos de fisión.

Las trazas producidas por las partículas son huellas estables formadas por "centros de tensión" que responden al ataque químico, estando estos centros de tensión formados básicamente por desplazamientos atómicos, más que por defectos electrónicos (Fleisher *et al.* 1965). También se ha demostrado que no se encuentran trazas en los materiales que son buenos conductores.

### A.1.1 Depósito de energía en sólidos

Si un átomo de número atómico (Z), se mueve a través de un sólido, éste

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:

$$Z^* = Z [1 - \exp(-130 \beta / Z^{2/3})] \quad (1)$$

donde:

$\beta$  = velocidad  $v$  del ión respecto a la velocidad de la luz.

$Z^*$  = carga del ión adquirida.

$Z$  = número atómico del átomo original.

Al moverse el ión en el sólido se pueden producir colisiones básicamente de dos tipos dependiendo de la velocidad. Para altas velocidades donde  $Z^* \approx Z$ ; la interacción dominante es "fuerza eléctrica" entre el ión y los electrones del átomo del sólido. El efecto de esta fuerza puede ser: (1) la excitación de los electrones a niveles de energía mayores, o (2) la pérdida o expulsión de ellos. En polímeros, esta sobre excitación 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.

La ionización y excitación primaria ocurrirá en las vecindades de la

trayectoria del ión, produciéndose también una ionización y excitación secundaria a una distancia mayor del centro de la traza.

Para el caso más simple, la velocidad del ión se considerará mucho más grande que la velocidad del electrón original; de esta forma el electrón se considerará en reposo originalmente y la energía cedida al electrón inversamente proporcional al cuadrado del parámetro de impacto ( $b$ ) ( $b$  = distancia entre el electrón desplazado y la trayectoria del ión).

Por lo que la mayoría de los electrones desplazados se moverán sólo a distancias mayores que corresponderán al límite de la energía cinética del electrón de  $2 mv^2 / (1 - \beta^2)$ , donde  $m$  es la masa del electrón. En la figura 57, se muestra la distribución espacial de la energía depositada por los rayos delta alrededor de traza producida por la partícula en un sólido. Estos cálculos fueron realizados por Katz y Kobetich (1968) para la estructura cristalina del cuarzo.

El segundo caso es para los iones que al bajar su velocidad a través del sólido, ésta es comparable con la velocidad de los electrones orbitales o menor, donde las "colisiones atómicas" se consideran dominantes respecto a la pérdida de energía misma. Lindhard y Scharff (1961) y Lindhard y Thomsen (1962), consideran que el daño producido por la colisión atómica consiste en el desplazamiento del átomo, teniéndose como resultado vacancias.

Así una pregunta importante se debe resolver para el cálculo del daño a través de la trayectoria de la partícula en un cierto material es: el daño

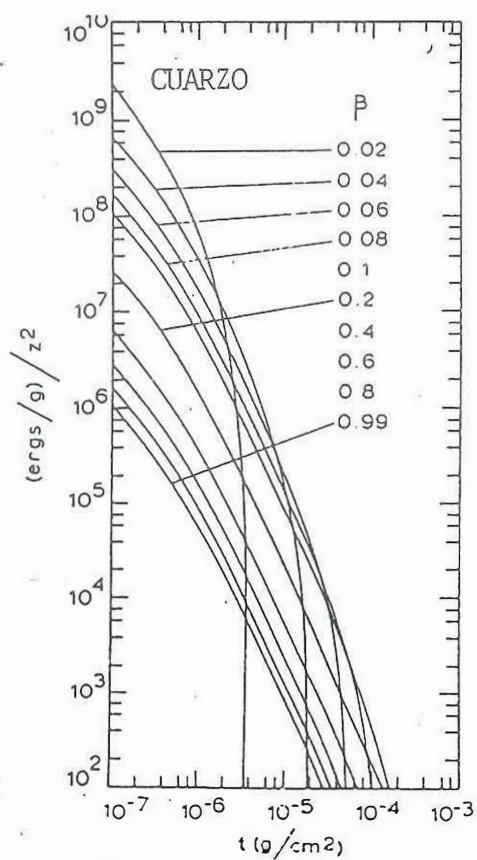


Figura 57. Distribución espacial de la energía depositada por los rayos delta alrededor de traza producida por la partícula en un sólido.

resulta de la ionización primaria y excitación debida a la partícula cargada o por el efecto secundario de los rayos delta. Para contestar esta pregunta, se deben considerar separadamente la respuesta en sólidos inorgánicos y la respuesta en polímeros, como se verá a continuación.

#### A.1.1.1 Efecto en cristales y vidrio.

De acuerdo a Fleischer (1967), se tiene que el caso más simple son los sólidos inorgánicos, pues son prácticamente insensibles a la interacción con electrones, en contraste con los polímeros, los cuales presentan daño severo a los  $10^9$  erg/gr (Bovey, 1958; Charlesby, 1960).

Experiencias de Sigsbee y Wilson (1973), han demostrado que aproximadamente a los  $10^{14}$  ergs/gr, vidrios con silicio presentan positivamente daño. Posteriormente Maurette (1970) y Seitz (1972), llegan a la conclusión que la ionización primaria es la principal responsable del efecto de la formación de la traza y que los efectos secundarios de los rayos delta son poco importantes.

#### A.1.1.2 Efectos en polímeros.

Para el caso de polímeros, el efecto de los rayos delta no puede ser despreciado. Los trabajos de Bean *et al.* (1970) y DeSorbo y Humphrey (1970) muestran que para fragmentos de fisión en policarbonato, la huella se extiende 96 Å y de acuerdo a los calculos de Kobetich y Katz (1968), Baum (1969) y Fain *et al* (1974) se puede tener un daño en polímeros hasta una distancia de 200 Å, por lo que debe de considerarse tanto la radiación primaria como la secundaria para la formación de la traza. También es importante el considerar la excitación producida, que puede iniciar un rompimiento en la cadena polimérica, reduciendo el peso molecular (Bovey,

1958), siendo conocido que la razón de grabado químico en un polímero aumenta cuando se disminuye el promedio del peso molecular.

### A.1.2 MECANISMOS EN LA PRODUCCION DE LA TRAZA.

Como se menciona anteriormente, es claro que hay que distinguir los mecanismos para la formación de trazas, ya sea en polímeros o bien en sólidos inorgánicos. En estos segundos se puede despreciar el efecto de los rayos delta, simplificando el entendimiento del proceso.

Un modelo para entender la formación de huellas nucleares en sólidos, considerando como efecto fundamental un desplazamiento atómico en el material usado como detector, es el llamado "punta de explosión iónica" (Fleischer *et al.* 1965). Este se refiere fundamentalmente a la formación de una orientación inestable electrostática a lo largo del patrón de ionización de la partícula, produciéndose una repulsión de los iones, desde sus sitios originales hacia sus posiciones intersticiales. En la figura 58, se muestra este proceso.

Seguido de la producción de iones primarios, se produce una "formación" de iones intersticiales y de sitios vacantes en la red, producto de las fuerzas coulombianas, disminuyendo el relajamiento elástico, expandiendo el "esfuerzo" en el material hacia los lados de la trayectoria de la partícula nuclear. Este esfuerzo se puede observar directamente mediante un microscopio electrónico de transmisión.



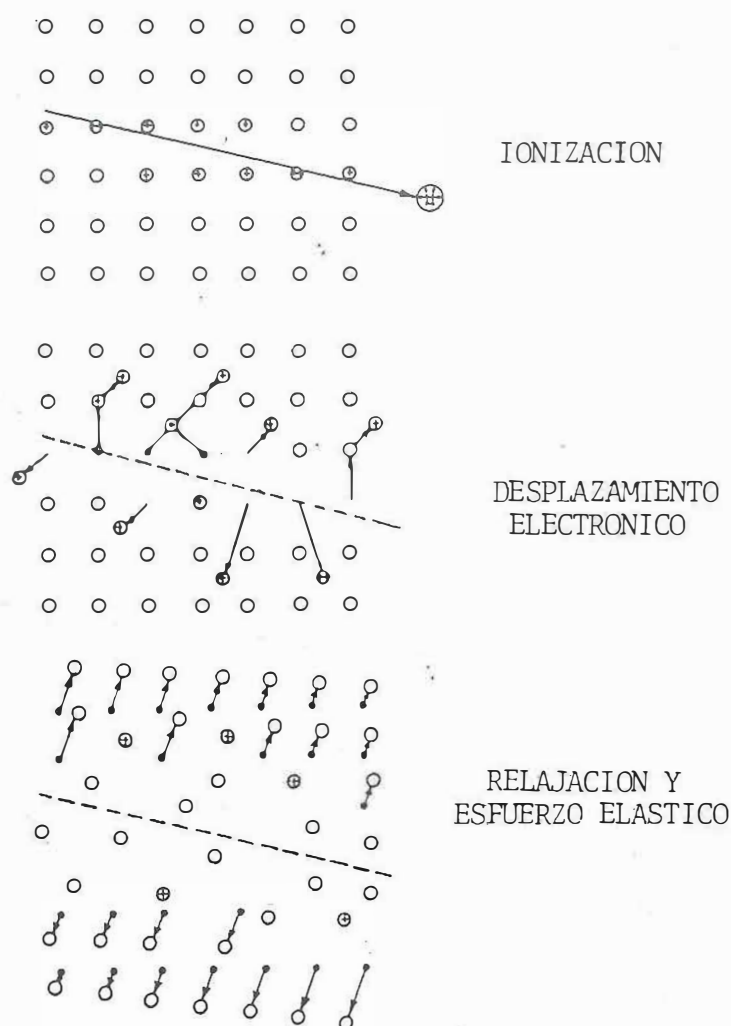


Figura 58 El mecanismo de punta de explosión iónica para la formación de trazas en sólidos inorgánicos.

La idea de inestabilidad de la red resulta de la creación de un ión adjunto, como señal de existe otro similar ya existente, produciéndose un par vacancia - ion intersticial en alogenuros alcalinos (Varley, 1954a,b). Young

(1958) menciona la posibilidad de formación de trazas el fluoruro de litio, como un proceso múltiple de la idea de Varley. Posteriormente otros autores investigaron sobre el tema y encontraron la misma respuesta respaldando el criterio de "punta de explosión iónica".

Este modelo presenta básicamente dos restricciones referentes a la concentración y a la movilidad de los acarreadores, caracterizándose la formación de trazas en semiconductores de baja conductividad o en aislantes. El primer requisito se refiere al suministro de electrones en la vecindad de la trayectoria ionizada por la partícula. Pues si electrones de otras regiones remplazaran en cantidad suficiente los que fueron desplazados antes que se ionice el átomo, no habrá formación de traza. Esto es que deben tener una movilidad electrónica de  $10^{-13}$  segundos o menor. Si la densidad para electrones libres es  $n_n$  y el número de ionizaciones por átomo es  $n_a$ , el radio de la región a ser drenada es:

$$n_a = \pi r^2 a_0 n_n \quad (2)$$

y el tiempo para la difusión de los electrones a una distancia  $r$  es:  $r^2/D$ , donde la constante de difusión está dada por la relación de Einstein:

$$D = \mu_n K T / e \quad (3)$$

donde  $\mu_n$  es la movilidad de los electrones. Así las trazas sólo se formarán si:

$$n_n < e n_a / \pi A_0 \mu_n k T t \quad (4)$$

para tiempos de difusión de aproximadamente  $10^{-13}$  segundos (tiempo de vibración de la red), caso típico para semiconductores aislantes, la formación de trazas es posible.

El segundo requisito será la movilidad de las vacancias o agujeros, debido a que la región ionizada a lo largo de la traza, es fundamentalmente una región de alta concentración de vacancias, pudiéndose mover éstos en cualquier dirección, evitando así la formación de las trazas.

Para la producción de trazas será necesario que cuando menos la mitad de las vacancias se difundan en radio  $r_0$ , así la movilidad  $\mu_p$  deberá ser menor que  $r_0^2 e / 4 t K T$  para que se logren las trazas. En semiconductores con movilidad mayor de  $150 \text{ cm}^2/\text{V seg}$  (Hannay, 1959) no se ha encontrado evidencia de trazas. Un valor apropiado de  $\mu_p$  será debajo de los  $10 \text{ cm}^2/\text{V seg}$ , por lo que la movilidad de las vacancias es un factor relevante para encontrar materiales como posibles detectores.

En el modelo de "punta de explosión iónica", la ionización primaria y la excitación, son las cantidades a conocer para encontrar la intensidad del daño.

Varios modelos tratan de predecir la velocidad de formación de la traza en polímeros, en función de la energía del ión. Kobetich y Katz (1968) y Katz y Kobetich (1968), suponen que la pérdida de energía por electrones

secundarios, en la vecindad de la trayectoria de la partícula, es crítica para la formación de la traza. Para ciertos polímeros, ellos identificaron la "dosis crítica" (energía por unidad de volumen de un cierto material ( $E_v$ )) que altera significativamente las propiedades del material expuesto a la radiación ionizante. Ellos se basaron en datos experimentales encontrados trazas de 15Å, 17Å y 19Å de diámetro, para dosis de  $2.8 \times 10^8$  ergs/gr,  $7.5 \times 10^8$  ergs/gr y  $3.5 \times 10^9$  ergs/gr; para nitrato de celulosa, Lexano (policarbonato) y mica (moscovita), respectivamente. Datos similares han sido reportados por Baum (1970) y Paretzke (1973). Posteriormente se han seguido discutiendo por varios autores, si el efecto de formación es fundamentalmente debido a la ionización primaria o a la secundaria, esto no parece ser un caso trivial pues no hay una clara evidencia.

Benton en 1967, sugirió el modelo de pérdida de energía restringida, el cual considera que sólo parte de la energía cedida podrá producir rayos delta, también sugiere que esta energía cedida, deberá ser menor a los 100 eV. Posteriormente (1970) modifica este valor a los 350 eV. (Nota: los 350 eV se refieren a la energía cedida para producir el desplazamiento suficiente, pero no demasiado para formar la traza).

La mayor discrepancia se encuentra para Lexano, en donde no se deberían registrar trazas de partículas alfa de acuerdo a lo anterior. Monnin (1970) y Fain *et al* (1971, 1972, 1974) realizaron esfuerzos muy prometedores para entender la teoría de la distribución de energía en la formación de trazas en materiales, encontrando que la pérdida de energía en ionización primaria es aproximadamente el 40% del total para 1 MeV/amu y para energías mayores este

valor de pérdida de energía por ionización primaria se reduce progresivamente para 10 MeV Y 100 MeV.

Haciendo una conclusión final en este apéndice, repetiremos algunas palabras de Fleisher: "El principal y más inmediato problema científico en el campo de las trazas nucleares, son preguntas de física del estado sólido: ¿Cómo se forman las trazas?, ¿Qué proceso atómico tiene lugar fundamentalmente? y ¿Cuál es la configuración última a lo largo de la traza formada y alrededor de ésta?. Curiosamente, amén que estos problemas permanece como uno de los menos estudiados, se presenta un gran interés en la aplicación de las trazas, en un número ilimitado de campos".

De todos los modelos teóricos que se han propuesto hasta el momento, el modelo de ionización primaria y excitación (punta de explosión iónica) es adecuado para los detectores inorgánicos. Para los detectores plásticos, algunos otros estudios deberán ser hechos para entender el proceso de formación de trazas, pero como en otros muchos casos, los datos experimentales esperan para ser entendidos, teorías y modelos más adecuados. La tabla XVI, muestra una relación de los modelos de formación de trazas y su comentario.

Como se aprecia en la figura 3, estas huellas o trazas pueden ser de forma muy variada, dependiendo del ángulo de incidencia, el tipo de partícula, su energía y el método de revelado químico. Por lo que hacer el análisis de la geometría de la traza grabada es importante.

#### A.2.1 Formación geométrica de la traza grabada.

Cuando se considera que la radiación ionizante logra dejar una huella, de su paso en el interior del sólido, por alguno de los efectos descritos anteriormente. La formación de la traza mediante el grabado químico, consiste en la disolución química del material, a lo largo 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 60 (Fleischer *et al.* 1975), se muestran estos parámetros, para el caso de que  $V_t$  y  $V_g$  sean constantes.

Y como se ve, 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:  $L = (V_t - V_g) t$ , donde  $t$  es el tiempo de grabado químico.

Formándose un ángulo entre el eje de la trayectoria y la pared del cono, de tal forma:

$$\text{Sen } \theta = \frac{D/2}{[(D/2)^2 + (L)^2]^{1/2}}$$



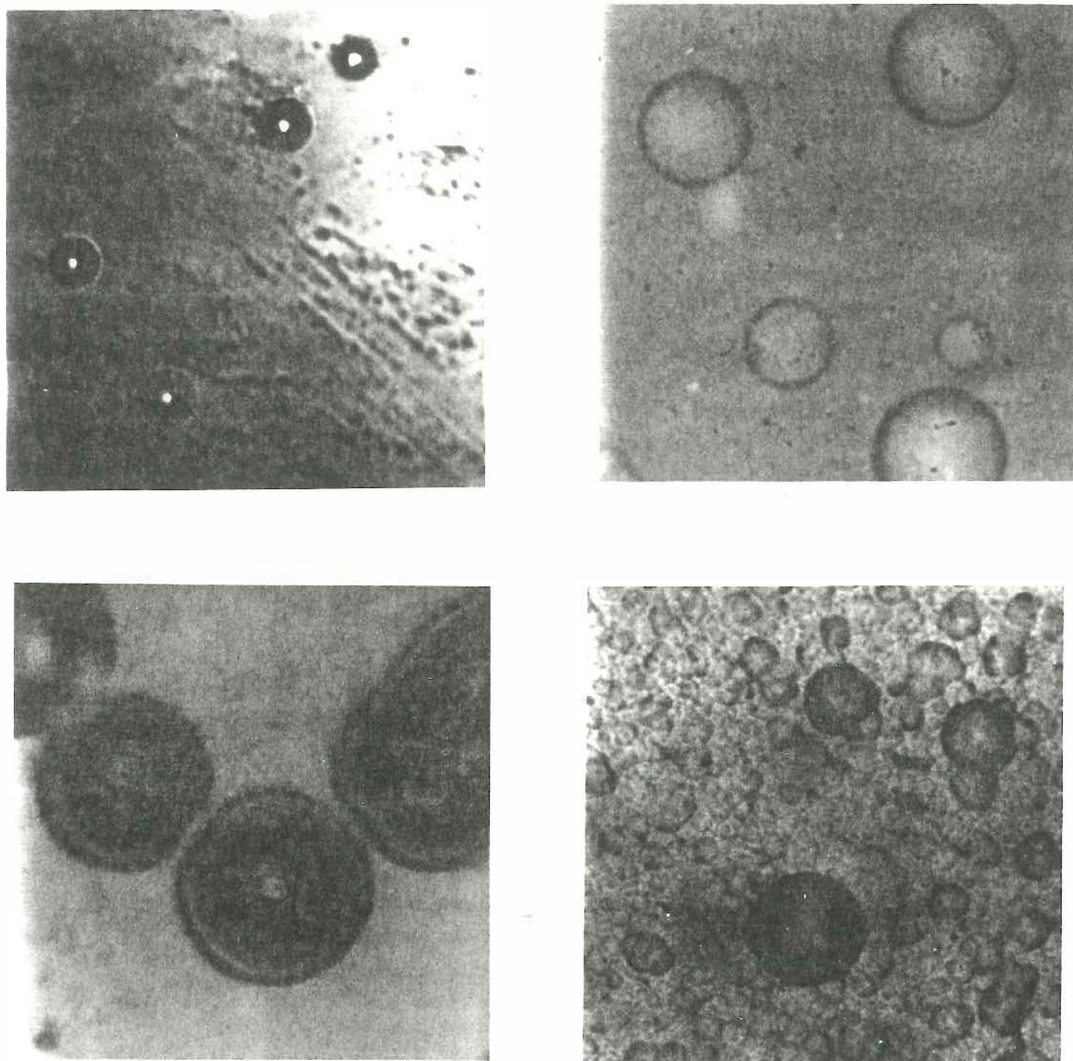


Figura 59. Se muestran trazas nucleares producidas por partículas ionizantes en diferentes materiales grabados químicamente.



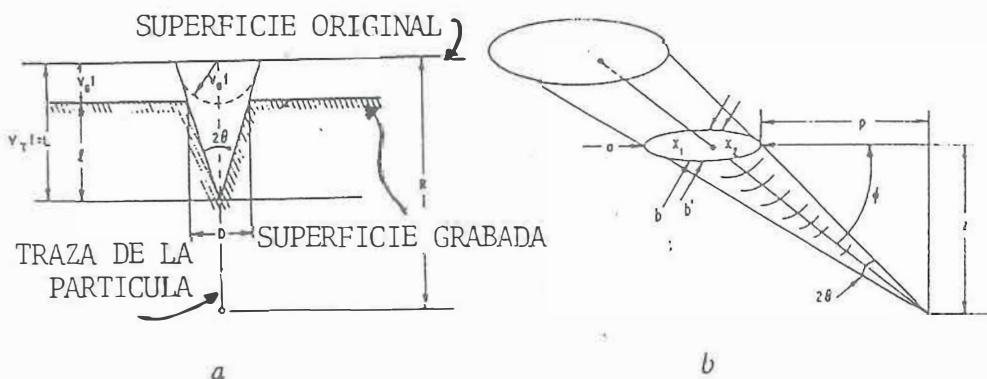


Figura 60. Geometría de la traza con  $V_t$  y  $V_g$  constantes.

Quedando los parámetros de la formación de la traza en función de los parámetros medibles en la propia traza:

$$V_{gt} = (D/2)(D/2 L + ((D/2)^2 + (L^2/L))^{1/2}$$

$$V_{gt} = (D/2)(\operatorname{tg} \theta + \sec \theta)$$

$$V_{tt} = ((D/2)^2 L^2)^{1/2} \cdot (D/2 L + ((D/2)^2 + L^2/L))$$

$$V_{tt} = D \csc \theta (\operatorname{tg} \theta + \sec \theta)/2$$

Siendo éstos los cálculos para los parámetros de desgaste, de diámetro y

de longitud de la traza, pero como se mencionó esto es válido sólo para el caso de que  $V_g$  y  $V_t$  sean constantes y el material sea isotrópico; condiciones que por lo general no se cumplen ni en los materiales usados como detectores, ni en el proceso del revelado químico de la traza.

#### A.2.2. Geometría de la traza para $V_t$ variable.

En el caso que se tenga  $V_t$  variable a lo largo de la trayectoria de la partícula, la geometría de la traza se complica, estando en general el valor de  $V_t$  en función de la razón de ionización, esto es que para cada partícula y energía dada se tendrá una geometría específica de la traza (Somogyi, 1966; Price *et al.* 1967; 1968; Blanford *et al.* 1970).

Para este caso se considerará ( $V_t$ ) función de ( $y$ ).

Si ( $y$ ) es un parámetro a lo largo de la formación de la traza y el diámetro ( $D$ ) se relacionará como función de ( $x$ ) y ambas como función del tiempo de grabado ( $t$ ). Así el problema queda en función de evaluar o medir (si es posible) ( $L$ ), ( $D$ ) con ( $x_t$ ), ( $y_t$ ). De esta forma inferir  $V_t$  ( $y$ ), que permite a su vez la identificación de la partícula incidente.

El valor de ( $L$ ) puede ser calculado por:

$$L = \int_0^L dy/V_t(y)$$

A este modelo se le llamó "modelo de la lancha de motor" (motor boat

analogy), por su analogía con el movimiento de una lancha y su huella dejada en el agua. La figura 61, muestra los parámetros de este modelo. En 1969, Fleischer y posteriormente Paretzke en 1973, calcularon el perfil de las trazas y finalmente Huygens definió la mayoría de los puntos del perfil de la traza con el modelo siguiente:

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

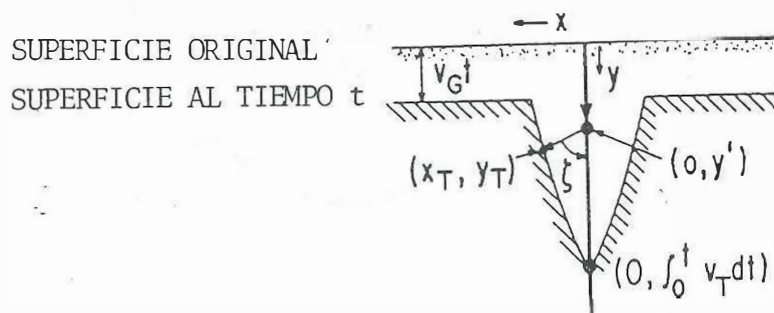


Fig. 61. Geometría de la traza variando  $V_t$ .

En donde 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, termina el modelo de formación de  $(0,y')$  hasta  $(X_t, y_t)$ , quedando una expresión que se puede escribir como:

$$Yt = y' + V_g^2/V_t (y') [t - \int_0^{y'} dy/V_t (y)]$$

Siendo válida para cualquier  $y'$  o tiempo  $t$ . (Fleischer *et al.* 1969).

Basándose en esta ecuación, Fleischer calculó la secuencia de grabado para fragmentos de fisión en obsidiana, suponiendo  $V_g = 0.58 \mu\text{m}/\text{seg}$ ,  $V_t = 1.36 - 0.0657 y' \mu\text{m}/\text{seg}$  y  $R = 12 \mu\text{m}$ , esto se muestra en la figura 62.

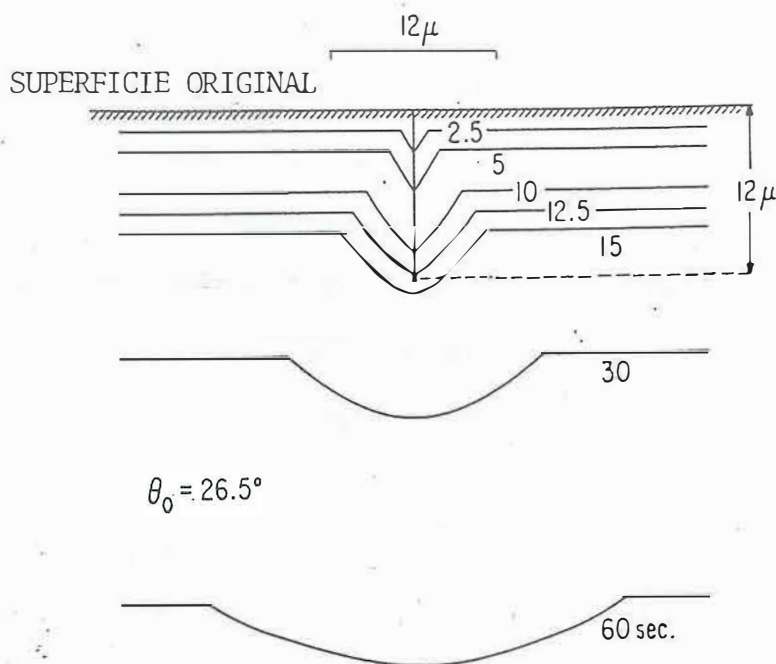


Figura 62. Cálculo de la secuencia de la formación de trazas en obsidiana, para fragmentos de fisión. (Fleischer *et al.* 1969).

Nuevamente el problema se vuelve más complejo si se considera  $V_g$  también no isotrópico, teniendo así las variables  $V_g$ ,  $V_t$  en medios no isotrópicos, dependencia de la energía y su distribución y dependencia de la movilidad de vacancias en el material.

Un método experimental para conocer las características de la traza grabada, es mediante la réplica, esto es hacer un vaciado, generalmente de oro o un material similar, de la traza formada, y mediante microscopía electrónica, hacer las mediciones de D y L, para ciertas condiciones dadas de solvente, energía y material entre otras.

Existen otros parámetros a considerar para el grabado de una traza, como el ángulo de incidencia de la traza. Generalmente se considera la partícula a  $90^\circ$ , o sea perpendicular al material, pero experimentalmente se tiene que radiación incidente puede venir en cualquier ángulo y existen actualmente claras evidencias de la dependencia angular para la formación de la traza (Espinosa *et al.* 1984a). Esta dependencia angular está relacionada directamente con la eficiencia del grabado de la traza, pues no en todos los cálculos se puede considerar un ángulo de  $90^\circ$ .

Existen modelos que consideran esta dependencia angular para predecir la formación de la traza y su grabado, pero desafortunadamente estos modelos no describen lo que ocurre experimentalmente en la mayoría de los materiales y sobre todo en los polímeros.

En 1972, Fleisher y Hart (1972)<sup>1</sup>, encontraron experimentalmente dos casos típicos para el valor de la eficiencia, en función al ángulo de incidencia. Así se considera la eficiencia ( $\eta$ ):

---

Nota: Este modelo sólo es válido para tiempos de grabado muy cortos.

$$\eta = \frac{\text{Número de trazas reveladas en la superficie}}{\text{Número de trazas que impactaron en la superficie}}$$

Caso 1.- Trazas aleatorias en todo el volumen, pero sólo considerando las que presentan un ángulo  $\theta$  de incidencia constante (trazas para un ángulo determinado).

Para esta condición tenemos que:

$$\eta = \cos^2 \theta$$

Caso 2:- Trazas orientadas de una fuente radiactiva externa y delgada.

$$\eta = 1 - \sin \theta$$

Finalmente, este valor de eficiencia será alterado por las condiciones del disolvente químico, como son concentración, temperatura, tiempo de grabado y pre-tratamiento químico.

Para polímeros como el CR-39, se logra tener eficiencias hasta de un 90% para partículas incidentes a  $90^\circ$  y condiciones de grabado específicas. Como se menciona en el capítulo II.

Finalmente, se mencionarán algunos otros aspectos que hay que considerar para el grabado de las trazas: a) efectos ambientales, efectos térmicos, efectos de tensión mecánica, efectos químicos y de pre-tratamiento, efectos de campos eléctricos, efectos de la irradiación misma y efectos a la luz y efecto en el manejo y almacenamiento del material detector, además de las características de cada hoja de material producido, especialmente en polímeros donde el espesor, las impurezas, las diferencias del material para las diferentes profundidades en el espesor, por lo que se debe estudiar, analizar y medir para cada caso en particular. Así al conocer su respuesta, poder normalizar todos los parámetros para obtener resultados congruentes y confiables.

Es importante recalcar que respecto a los modelos teóricos del efecto fundamental provocado en los materiales semiconductores por la radiación ionizante, se cuenta con los modelos antes descritos, y como se ve, estas referencias no son de años recientes. Por la complejidad del tema, no ha habido ningún avance reciente de relevancia tal que desvanezca lo aquí descrito. Un grupo de investigadores en colaboración México-Australia, están trabajando en un modelo que describe el fenómeno físico, pero no se ha tenido acceso a la información completa hasta este momento.





\* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \* - \*

*Corolario:*

*"Ahora que estoy escribiendo este trabajo, me  
doy cuenta de todo el camino recorrido".*

*G. Espinosa*