

UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE  
INGENIERIA



FACULTAD DE CIENCIAS

"DATACION DE OBSIDIANAS POR EL METODO DE HUELLAS  
DE FISION ESPONTANEA DEL URANIO 238"

POR:

*MANUEL ENRIQUE BROCCA POBES*

T E S I S

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
LICENCIADO EN FISICA

L I M A -- P E R U

1994

## INDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I	
MECANISMOS DE FORMACION DE TRAZAS DE PARTICULAS CARGADAS EN SOLIDOS.....	4
I.1 Caracteristicas de las trazas.....	5
I.1.1 Estado de tension y reactividad quimica de las trazas .....	5
I.2 Tipos de materiales donde se forman las trazas	6
I.3 Geometria de las trazas.....	7
I.4 Energia cedida necesaria para la formación de trazas	8
I.5 Modelo de pico de Explosion Ionica.....	10
I.5.1 Criterios para la formacion de trazas	10
I.6 Evaluacion del radio de Tension.....	14
CAPITULO II	
METODO DEL REVELADO QUIMICO...	18
II.1 Geometria de las trazas para $V_t$ constante.	19
II.1.1 Incidencia normal.....	20
II.1.2 Incidencia oblicua .....	23
II.2 Eficiencia del ataque quimico.....	27

## CAPITULO III

### DATAACION POR HUELLAS DE FISION

34

III.1	Decaimiento radiactivo .....	34
III.2	Ecuación de edad en huellas de fisión ....	35
III.3	Alteración de la edad en huellas de fisión.	41
III.3.1	Decaimiento de las trazas.....	41
III.3.1.a	Temperaturas típicas de Annelaing para trazas de fisión en varios materiales.....	45
III.3.1.b	Temperatura de cierre "Closing Temperatures"	46
III.4	Metodo de corrección de edades.....	55
III.4.1	Metodo de corrección por tamaño de las trazas	55
III.4.2	Metodo de Plateu.....	56
III.5	tecnica experimental.....	60
III.5.1	Metodo poblacional.....	60
III.5.2	Metodo del detector externo.....	61
III.5.3	Procedimiento experimental.....	63
III.5.3.1	Identificación de trazas.....	64
III.5.3.1.a	Identificación de trazas en vidrios	65
III.5.3.2	Irradiación de las muestras.....	67

## CAPITULO IV

### TRABAJO EXPERIMENTAL

OBTENCION DE LOS PARAMETROS DE TIEMPO DE ATAQUE QUIMICO CONCENTRACION DEL ACIDO FLUORHIDRICO (HF) Y TEMPERATURA DE REACCION.....	70
IV.1 Montaje de la muestra.....	70

IV.2	Lijado de la muestra.....	71
IV.3	Pulimentado de la muestra.....	71
IV.4	Ataque químico de la muestra (etching).....	72
IV.5	Características obtenidas de la gráfica....	76
IV.6	Resultados y conclusiones. Datación de la obsidiana	77

APENDICE A..... 83

Condiciones de etching para minerales

APENDICE B..... 85

Calculo para la obtencion de los ejes mayor (D) y menor (d) de la elipse y el desplazamiento de su centro ( $\Delta r$ )

APENDICE C..... 91

Características del recocido de las trazas

APENDICE D..... 93

Calculo de errores

BIBLIOGRAFIA..... 95

## INTRODUCCION

### DATAACION POR EL METODO DE HUELLAS DE FISION

Cuando las partículas cargadas viajan a través de un medio solido, estos dejan un camino de daños, como resultado de la transferencia de energía de la partícula a los átomos del medio. Tales daños fueron vistos por primera vez, Por Silk y Barnes a través de un microscopio electrónico ( con aumentos de 50,000X) (1959) durante el estudio de solidos irradiados. Price And Walker (1962) descubrieron que estos daños, a los cuales se le denominaron trazas, pueden ser agrandadas y hechos visibles bajo un microscopio óptico utilizando agentes químicos que reaccionan mas rápidamente con la región dañada

Las trazas (aprox. 10 micrones) son realizados por los fragmentos de fisión del uranio como resultados de su gran masa y la gran cantidad de energía liberado en este proceso (aprox 200Mev). Price y Walker descubrieron trazas de fisión en muestras de micas y demostraron que las trazas de los minerales naturales son debido principalmente a la fisión del uranio 238 y propuso que la densidad de tales trazas podrían ser utilizados para datar las muestras de micas (Biotita ,Phologopite, Muscovita y Lepidolite) en las que se encontraron densidades por encima de  $3 \times 10^4$  trazas/cm<sup>2</sup>.

El método de dataacion por huellas de fisión es ahora usado ampliamente para datar una enorme variedad de minerales y vidrios (naturales y sintéticos). Esto es aplicable a muestras

relativamente jóvenes que no hayan sido recalentadas desde su formación y es, por lo tanto, de gran interés al arqueólogo como también al geólogo; Esta técnica es también bastante útil pues proporciona bastante información de la antigüedad y formación de la roca, debido, a que la preservación de las trazas, es dependiente del tiempo y cada mineral tiene una temperatura característica, para la cual sus trazas desaparecen.

El método de datación por huellas de fisión utiliza principalmente la ecuación:

$$t = \frac{1}{\lambda_{d_B}} \cdot \text{LN} \left[ \frac{\lambda_{d_B}}{\lambda_{f_B}} \cdot \frac{N_5^+}{N_B^+} \frac{\rho_s}{\rho_i} \cdot \sigma \cdot \phi + 1 \right]$$

en donde los parámetros densidad de trazas fósiles ( $\rho_s$ ), inducidas ( $\rho_i$ ) y flujo de neutrones térmicos ( $\phi$ ) son hallados experimentalmente para obtener finalmente la edad ( $t$ ) de la muestra.

La obtención de los parámetros no se podría obtener si no se conociese como es una traza, cuya diferenciación con respecto a una falla del material, solo se logra con paciencia, practica y conocimiento de la forma que tienen las trazas en cada tipo de material.

El propósito del siguiente trabajo es dar a conocer el método de datación por huellas de fisión y a su vez llegar de una manera sencilla y comprensible a todos aquellos interesados en esta línea de investigación. Para esto hemos visto conveniente presentar en el capítulo I todas las características de las

trazas encontradas experimentalmente así como también un modelo que las explique claramente. En el capítulo II nos referimos al método del revelado químico y su eficiencia que permite agrandar las trazas, facilitando su observación en un microscopio óptico así como la geometría de las trazas. Posteriormente en el capítulo III, tocamos el tema de la datación misma en el cual se incluye la derivación de la ecuación de edad y los problemas que alteran la edad de la muestra, aquí también se muestran los métodos de corrección de edad y algunas técnicas y procedimientos experimentales más recomendables. Finalmente en el capítulo IV damos los resultados de la datación de tres muestras de vidrios volcánico (obsidiana) y su comparación con las edades encontradas en el laboratorio Joseph Fourier en Francia

Esperamos pues que este trabajo oriente a todos aquellos que estén interesados en esta línea de investigación y que no conocen nada al respecto.

## CAPITULO I

### MECANISMO DE FORMACION DE TRAZAS DE PARTICULAS CARGADAS EN SOLIDOS

Las partículas cargadas masivas individuales, tales como los fragmentos de fisión, producen desperfectos lineales o trazas de daños en muchos sólidos. Estas líneas de daños o trazas se han encontrado en películas delgadas o en muestras sólidas. La estructura física de las trazas son claramente distintas en cada caso. Varios modelos han sido propuestos para la formación de trazas en películas delgadas, y todas dependen de las condiciones de la superficie. Por otro lado las trazas de partículas cargadas en sólidos son de mayor interés debido a sus diversas utilidades tales como detectores de estado sólido de partículas nucleares, datación de material geológico y antropológico[1], detectores de trazas de rayos cósmicos y muchas otras aplicaciones.

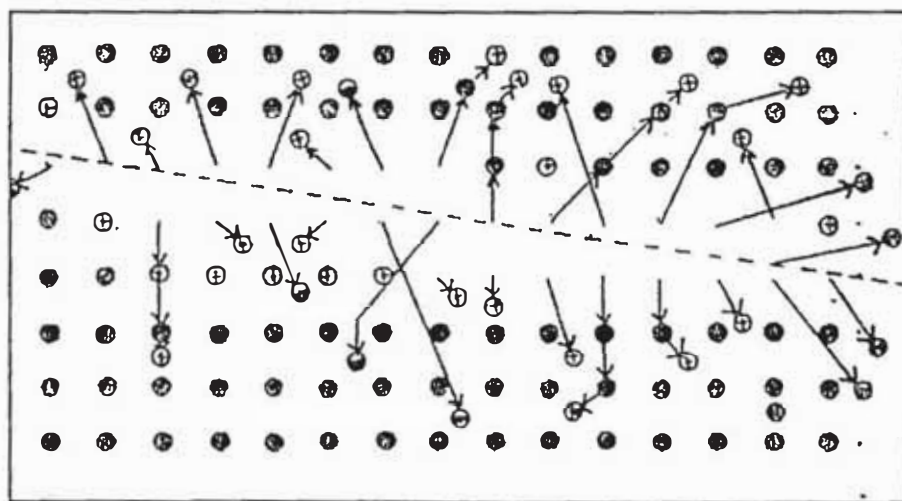


Figura I.1

Un fragmento de fisión cuando atraviesa el sólido deja una zona altamente ionizada, como resultado, los átomos son desplazados de sus posiciones, via repulsion coulombiana, dejando una zona de daño o traza



Entre todos los modelos existentes hemos escogido el modelo "Ion Explosion Spike" debido a su gran acogida y a la manera sencilla y clara que explica las distintas evidencias experimentales de formación de las trazas.

La figura I.1 muestra esquemáticamente como se forma un huella debido a un fragmento de fisión del uranio

A continuación daremos una serie de características de las trazas encontradas experimentalmente:

## I.1 CARACTERISTICAS DE LAS TRAZAS

### I.1.1.-Estado de Tensión y Reactividad Química De Las Trazas:

Cada uno de los tres métodos existentes para la revelación de las trazas indican que ellas están compuesta por una zona tensada y de material activamente químico. La evidencia de esta observación es

I.1.1.1- Las trazas han sido observadas en un indeterminado numero de materiales con un microscopio electrónico[2], las cuales aparecen como líneas oscuras de difracción, cuyo comportamiento indica que la región alrededor de la traza esta tensado[2].

I.1.1.2.-El método mayormente usado para la revelación de las trazas (introducción de la muestra en un agente químico apropiado) indica que el agente químico disuelve o ataca mas rápidamente el material por donde ha pasado una partícula cargada que por el resto del material.

I.1.1.3 Las trazas han sido revelados por precipitación a lo largo de la zona dañada con cloruro de plata, cuyo resultado es consistente con la existencia de una región de elevada energía libre, la cual provee un lugar de nucleación para la precipitación.[3]

## I.2.-TIPOS DE MATERIALES DONDE SE FORMAN LAS TRAZAS

Las trazas se forman en todo tipo de materiales aislantes tales como los vidrios y los polímeros , pero no se han observados en los buenos conductores. La tabla I.1 indica esta observación.

Aquellos materiales con mas de 2000  $\Omega$ -cm son capaces de grabar y almacenar trazas; los materiales con resistividad menor aparentemente no tienen esta capacidad ( la resistividad por si misma no es un criterio único).

TABLA I.1  
RELACION DE PROPIEDADES DE ALMACENAMIENTO DE  
TRAZAS DE ALGUNOS MATERIALES EN FUNCION  
DE SU RESISTIVIDAD

	CLASE	MATERIALES	RESISTIVIDAD ( $\Omega$ -cm)
SE FORMAN	AISLANTES	MINERALES SILICATADOS , VIDRIOS AISLANTES POLIMEROS	$10^6 - 10^{20}$
	AISLANTES POBRES	DISULFURO DE MOLIBDENO	3000 - 25000
	SEMICONDUCTORES	VIDRIO VANADIO	2000 - 20000
NO SE FORMAN	SEMICONDUCTORES	SILICIO GERMANIO	10 - 2000
	METALES	TUNGNSTENO, ZINC COBRE, PLATI NO ALUMINIO ORO	$10^{-6} - 10^{-4}$

I.3.- GEOMETRIA DE LAS TRAZAS:

Las trazas deben de ser continuas sobre un intervalo macroscópico. Si ellas fueran discontinuas sobre una escala óptica, las trazas grabadas serían de forma irregular y complejas, lo cual es contrario a lo encontrado. En algunos materiales tales como las micas, se sabe que las trazas deben ser continuas sobre una escala atómica. En micas el ácido

fluorhídrico no ataca los planos basales, por lo tanto la longitud completa de la traza no debiera ser revelada si existiese discontinuidades en la zona de daño.

Sin embargo un grabado incompleto puede ocurrir si la mica es calentada, pues esto produciría un reordenamiento dentro de la zona de daño aislando secciones de la traza original y por lo tanto evita la completa penetración del ácido, esta última observación nos indica que un calentamiento ligero produce un acortamiento en el diámetro promedio de la traza sin afectar apreciablemente su densidad, y un calentamiento prolongado y alto convierte a la traza ópticamente inobservable después del revelado químico (una observación en un microscopio electrónico revelaría una nube discontinua de daños).

El diámetro de la zona de daño no se conoce con exactitud, pero no es mayor que  $50\text{\AA}$  para materiales que contienen trazas por fragmentos de fisión

#### I.4.-ENERGIA CEDIDA NECESARIA PARA LA FORMACION DE TRAZAS

Se ha establecido que las trazas son formadas por partículas cuya pérdida de energía por unidad de longitud excede un valor crítico  $(dE/dx)_c$  que es una cantidad característica del material irradiado. Por ejemplo los valores  $(dE/dx)_c$  para micas Lexan y celulosas fueron medidos irradiándolos con varios iones pesados de energías específicas usando un acelerador de partículas.

TABLA I.2  
SECUENCIA DE SENSIBILIDAD DE VARIOS MATERIALES

MATERIAL	RAZON CRITICA DE ENERGIA CEDIDA
OLIVINO HYPERSTHENE ..... ZIRCON LABORADORITA	20 MEV/MG/CM <sup>2</sup> .....
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> VIDRIO SODA LIME GLASS VIDRIO TEKTITA ORTHOCLASE CUARZO ..... MICA	15 MEV/MG/CM <sup>2</sup> ..... 13 MEV/MG/CM <sup>2</sup>
RESINA POLIESTER RESINA BISFENOL-λ- POLYCARBONATO (LEXAN)	4 MEV/MG/CM <sup>2</sup>
NITRATO DE CELULOSA	2 MEV/MG/CM <sup>2</sup>

Los rangos de sensibilidad conocidas de los plásticos (detectores de partículas alfas y deuterones); fueron encontrados irradiando distintos tipos de materiales con iones argón y calculando el  $dE/dX$  crítico (energía por unidad de longitud necesaria para formar trazas). En la tabla I.2 podemos apreciar que todos aquellos materiales con  $(dE/dX)_c$  mayor que 15 MeV/mg/cm<sup>2</sup> no registran los iones argón; aquellos con  $(dE/dX)_c$  mayor que 2 MeV/mg/cm<sup>2</sup> no registran las partículas alfas. Las líneas sólidas en la tabla I.2 separa grupos de sensibilidades distintas y bien establecido .

THE ION EXPLOSION SPIKE MODEL

Un fragmento de fisión energético, moviéndose a través de un sólido encuentra una colección de iones y electrones. Tales fragmentos ceden su energía de la siguiente manera:

- La mayor porción es gastada en excitar y acelerar electrones,
- Una poca cantidad será invertida en interacciones inelásticas con iones .

Debido a estas colisiones, pueden ocurrir desplazamientos atómicos tanto en conductores como en aislantes, pero no son la causa de la formación de las huellas, pues, estas aparecen con mayor frecuencia al final del recorrido de la partícula cargada, donde usualmente las huellas no son registradas. Se debe recalcar que no se desea establecer que dichos desplazamientos nunca ocurran, sino que no son una causa usual para la formación de huellas en sólidos.

I.5.1.CRITERIOS PARA LA FORMACION DE HUELLAS

En este modelo se consideran 4 condiciones importantes:

I.5.1.1.- La fuerzas de repulsión coulumbiana dentro de la región ionizada debe de ser suficientemente grande para vencer las fuerzas de enlace de la red, (la fuerza de tensión electrostática es mayor que la fuerza de tensión mecánica de la red). Si dos iones en un material de constante dieléctrica  $\epsilon$  y espaciamento

atómico promedio "  $a_0$ " ha recibido una ionización promedio de "n" cargas "e", la fuerza entre ellos es :

$$\frac{n^2 \cdot e^2}{\epsilon \cdot a_0^2} \quad (\text{I.1})$$

luego la fuerza local, por unidad de área o stress electrostático sera :

$$\frac{n^2 \cdot e^2}{\epsilon \cdot a_0^4} = \sigma_e \quad (\text{I.2})$$

como la fuerza de tensión mecánica teórica de constante de Young "E" es aproximadamente "E/10"[4], observamos que el stress electrostático deberá ser mayor que el mecánico, es decir:

$$\frac{n^2 \cdot e^2}{\epsilon a_0^4} > \frac{E}{10} \quad (\text{I.3})$$

o en todo caso :

$$n^2 > R \quad \text{donde} \quad R = \frac{E \cdot \epsilon \cdot a_0^4}{10 \cdot e^2} \quad (\text{I.4})$$

aquí R es llamado el radio de tensión y se usa para calcular la sensibilidad relativa de los materiales capaces de retener huellas. Esta relación nos indica que las huellas o trazas deberían formarse con mayor facilidad en materiales de tensión mecánica, constante dieléctrica y espaciamiento interatómico

pequeños.

I.5.1.2.- El segundo criterio establece que para que exista trazas atómicamente continuas se requiere al menos de una ionización por plano atómico que atravieze la partícula incidente, por lo tanto  $n$  deberá ser mayor que 1 ( $n > 1$ ). (Es posible que en algunos materiales  $n$  sea aproximadamente 1).

Usando estos criterios nos estamos limitando a trazas que puedan ser identificadas por el método del grabado químico; en caso de utilizarse otro método será necesario aplicar otros criterios

I.5.1.3.- El tercer requerimiento para la formación de trazas relaciona la disponibilidad de electrones cerca de camino ionizado :

Si otros electrones fueran capaces de reemplazar aquellos que han sido expulsados por la partícula energética cargada, antes que los átomos ionizados sean removidos de sus lugares, no se formaría ninguna traza. Esto nos sugiere, que para que se suprima la formación de trazas es necesario drenar electrones de una región cilíndrica alrededor del camino ionizado en un tiempo menor que  $10^{-13}$  seg, tiempo necesario para que los iones sean desplazados de sus sitios.

Si la densidad de electrones libres es " $n_n$ " y el número de ionizaciones por plano atómico es " $n_a$ ", el radio de la región a ser drenado estará dado por:

$$\pi \cdot r^2 \cdot a_0 \cdot n_n = n_a \quad (I.5)$$



El tiempo para que los electrones se difundan una distancia "r" es:

$$\tau_D = \frac{r^2}{D} \quad (\text{I.6})$$

donde D es la constante de difusión dada por la relación de Einstein:

$$D = \mu_n \cdot K \cdot \frac{T}{e} \quad (\text{I.7})$$

K = Constante de Boltzman; T = temperatura

" $\mu_n$ " = movilidad de los electrones

Por lo tanto, las trazas no podrán formarse a menos que el tiempo de drenaje sea mayor que el tiempo  $\tau_D = 10^{-13}$  seg de donde se deduce que:

$$n_n < \frac{e \cdot n_a}{\pi \cdot a_o \cdot \mu_n \cdot K \cdot T \cdot \tau_D} \quad (\text{I.8})$$

para un tiempo de difusión de  $\tau_D=10^{-13}$  (tiempo de vibración de la red) la ecuación se cumple para semiconductores y aislantes, esto implica que las trazas no se formarán en metales (a menos que la densidad de electrones de conducción fuese menor que  $10^{20}$  por cc).

I.5.1.4.- El cuarto criterio está relacionado con la movilidad de los huecos, puesto que la región ionizada a lo largo de una traza es en esencia una zona de alta concentración de huecos, éstos

podrían movilizarse alejándose de esta zona suprimiendo permanentemente la formación de las trazas.

Si asumimos que los huecos se difunden al menos una distancia atómica entonces la movilidad " $\mu_p$ " deberá satisfacer

$$\mu_p > \frac{a_0^2 \cdot e}{\tau \cdot K \cdot T} \quad (I.9)$$

para que se evite la formación de la huella.

Esta relación sugiere que a temperatura ambiente, no aparecerán trazas en materiales cuya movilidad de huecos sea mayor que 0.2 cm<sup>2</sup>. De esto se deduce que los metales y varios semiconductores, incluyendo silicio y germanio, son por lo general materiales incapaces de retener las trazas. Por otro lado, en muchos semiconductores incluyendo el vidrio vanadio, se piensa que la activación térmica ocurre como un resultado del solapamiento de iones, debido a las vibraciones térmicas, de tal manera que la expulsión de los iones puede ser posible.

## I.6

### EVALUACION DEL RADIO DE TENSION

El primer criterio para la formación de trazas, el cual establece que el radio de tensión R debe ser menor que el cuadrado de la ionización por átomo ( $n^2$ ), deberá llevar a un ordenamiento de los materiales de acuerdo a la sensibilidad

medida, tal como se observa en la tabla I.2, mientras R decrece, la sensibilidad deberá incrementarse.

Los valores de  $n^2$  dependerá de la energía de ionización del material, de la carga y energía de la partícula que forma la traza.

Puesto que la energía de ionización es en alguna forma un promedio ponderado, que esperamos no varíe en los materiales, por el momento despreciamos las variaciones en n.

Puede observarse que los valores de R separan los materiales en 4 grupos: los materiales sensitivos, que incluye a todos los polímeros pesados. 2 grupos de sensibilidad intermedia, micas y un grupo que incluye vidrios inorgánicos, y los materiales de baja sensibilidad como el zircón y olivino.

DENSIDAD DE IONIZACION.- Para satisfacer el segundo criterio de formación de trazas, es necesario mostrar que una concentración razonable de átomos ionizados, deberá producirse a lo largo del camino de una partícula formadora de trazas.

Como notamos previamente "n" deberá ser al menos "1" para que el modelo dado sea posible en los materiales como la mica.

Si un fragmento de fisión de carga efectiva  $z^*$  masa M y energía  $E_f$  pasa a una distancia b de un  $e^-$ ; éste deberá adquirir una energía :

$$E_e = \frac{4 m E_f}{M \left( 1 + \frac{4 b^2 m^2 E_f^2}{m^2 z^{*2} e^4} \right)} \quad (I.10)$$

Donde  $e$  y  $m$  son la masa y carga del electrón.

Hemos utilizado I.10 para calcular la energía del electrón como una función de la separación inicial del electrón del camino de varias partículas cargadas: Fragmentos de fisión de elementos ligeros de 30 MeV, iones de argón de 160 MeV y partículas alfa de 1 MeV. La siguiente figura muestra esta relación ploteada como una función excitación donde la ordenada  $\pi b^2$  es el área dentro de la cual cada electrón adquiere al menos una energía dada por la abcisa. Además, si  $\pi b^2$  es elegido para que sea la sección transversal atómica promedio y se computa que la energía es tan grande como la energía de primera ionización, existirá una traza continua de ionización; y uno de los requerimientos para formación de trazas en materiales, como la mica, será satisfecha.

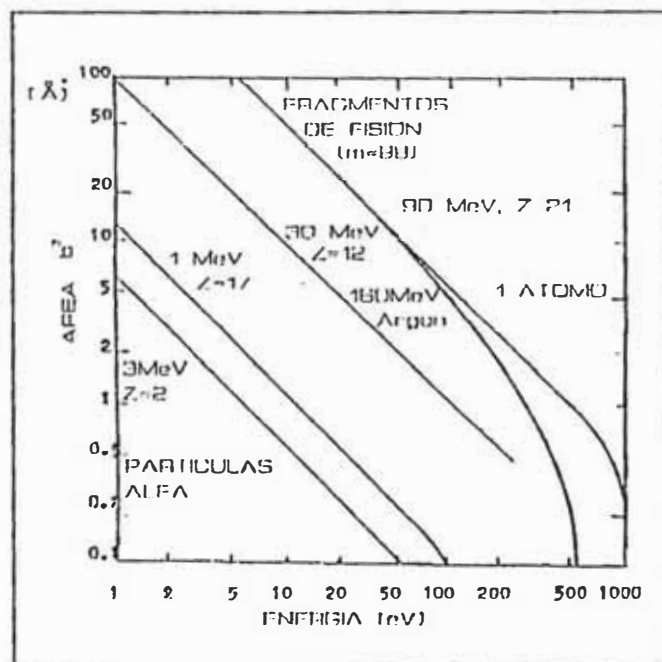


figura I.2

Para ensayar si éste es el caso escogemos  $\pi b^2 = 6\lambda^2$  como área

típica por átomo y encontramos que la energía es aproximadamente 90, 80, 16, 1 y 2 eV para las partículas incidentes listadas anteriormente. Puesto que el rango común de los potenciales de primera ionización va de 5 hasta 17 eV, los fragmentos de fisión crearán ionizaciones continuas de trazas pero no así los alfa y los iones argón.

En el caso de grandes polímeros (los cuales son los únicos materiales que se saben que el grabado revela trazas de partículas alfa y partículas ligeras), se necesita no menos de 2 eV para romper sus enlaces (como resultado de electrones excitados). En este caso una partícula alfa de 1 MeV debería dejar una traza continua de enlaces rotos y una de 3 MeV debería romper un enlace (en promedio), una vez cada dos distancias interatómicas a lo largo de su camino.

El trabajo sobre resinas de policarbonato muestra que aquellos polímeros de peso molecular pequeño son atacados más rápidamente por la solución química adecuada que aquellos con peso molecular mayor, y puesto que consideramos que la región de enlaces rotos tiene un peso molecular inferior, es razonable esperar que esta zona sea más rápidamente atacada con el ácido.

Para resumir, en plástico, todas las partículas que crean huellas revelables son en teoría capaces de producir desplazamientos atómicos por el mecanismo indicado. Debido a que estos átomos están separados quizás 5 espacios atómicos, en el caso de huellas alfa sin embargo, parece que un segundo tipo de defecto deberá también estar presente, para dar una densidad de defectos adecuada, para ser posible el ataque químico observado.

## CAPITULO II

### METODO DEL REVELADO QUIMICO

#### (ETCHING)

Cuando un cristal se disuelve en un solvente, la razón de disolución en las distintas direcciones del cristal varía de alguna manera[5], este fenómeno que es utilizado para revelar cristales, fue utilizado con éxito para la revelación de los daños dejados por los fragmentos de fisión en la muestra (trazas de fisión)

Las trazas en su estado natural sólo pueden ser observados con un microscopio electrónico, pero es posible, escogiendo el agente químico apropiado, agrandar la zona dañada tal que ésta pueda ser observada en un microscopio óptico con aumentos que varían desde 200 hasta 500.

Algunos de los reactivos comúnmente utilizados incluyen el ácido nítrico (para apatitas), ácido fluorhídrico (para vidrios y micas), y soluciones básicas concentradas (para sphenes); En el apendice A se indican otros tipos de reactivos.

Hay que tener en cuenta que las trazas son sólo de unos pocos angstroms de ancho y de aproximadamente de 10-20  $\mu\text{m}$  de longitud[6], además las trazas son mayores en minerales ligeros y vidrios que en minerales más pesados tales como el Zircon

Antes de comenzar a discutir la geometría de las trazas hay que tener en cuenta que cuando la muestra es atacada con el agente químico, no sólo se tiene en cuenta la velocidad ( $V_g$ ) a la cual se está removiendo la superficie de ésta, sino también la

velocidad ( $V_t$ ) a la cual disuelve la zona de daño dejada por la partícula ionizante que en general es mayor que  $V_g$ .

## II.1 GEOMETRÍA DE LAS TRAZAS PARA $V_t$ CONSTANTE

La geometría de las trazas depende de dos parámetros[7]:

i)  $V_t$ : disolución química a lo largo del camino dejado por la partícula y ii)  $V_g$  que es el ataque químico general de la superficie del sólido y sobre la superficie de la traza, la cual es constante e isotrópica[8].

Asumiendo  $V_t$  constante obtendremos varias características del ataque químico (esto es aplicable donde la razón de ionización de la partícula no varíe rápidamente).

II.1.1.1. INCIDENCIA NORMAL.- Supondremos una traza normal a la superficie del material; como la razón lineal de ataque hacia abajo, a lo largo de la traza es  $V_t$ , en un tiempo  $t$  la zona revelada se extenderá una distancia " $l$ " desde el punto de origen, entonces:

$$l = V_t \cdot t - V_g \cdot t \quad (\text{II},1)$$

En cada punto a lo largo de la traza, el reactivo se mueve en todas direcciones a una razón  $V_g$ . Cualquier punto desde una distancia  $Y$  del inicio de la traza es alcanzado por el reactivo a un tiempo  $T(y)$ :

$$T(y) = \frac{Y}{V_t} \quad (\text{II},2)$$

por lo que existe un tiempo residual  $t - T(y)$  disponible, para que el reactivo ataque radialmente en todas direcciones desde el punto Y a una distancia  $V_g(T - T(Y))$  en el medio. Las paredes de la traza revelada estarán formadas por el conjunto de puntos de todas las esferas de radio  $V_g(T - T(y))$ , donde  $T(Y)$  es la variable. Llegando a la formación de un cono de semiángulo  $\theta$  dado por:

$$\text{sen}\theta = \frac{V_g \cdot t}{V_t \cdot t} = \frac{V_g}{V_t} \quad (\text{II},3)$$

donde  $\theta$  es el ángulo crítico de ataque.

De la figura II,1 se observa:

$$\frac{D/2}{l} = \text{tang}\theta \Rightarrow \text{tang}\theta = \frac{D}{2 \cdot (V_t - V_g) \cdot t} \quad (\text{II},4)$$

combinando estas ecuaciones obtenemos:

$$D = 2 V_g \cdot t \frac{(V_t - V_g)}{(V_t^2 - V_g^2)^{1/2}} \Rightarrow D = 2 V_g \cdot t \left( \frac{V_t - V_g}{V_t + V_g} \right)^{1/2} \quad (\text{II},5)$$

Téngase en cuenta que "l" y D desaparecen cuando  $V_t = V_g$ , además la ecuación II,1 sólo se aplica si  $V_t \cdot t$  es menor que el rango R sobre el cual  $\theta$  es químicamente constante y la ecuación II,5 se satisface si[7]:

Muchas veces resulta útil poner las velocidades de ataque  $V_t$  y  $V_g$  en función de cantidades que pueden ser medidas; usando II,3



$$t < \left(\frac{R}{V_g}\right) \left(1 + \left[ \frac{(1 - \sin\theta) \left(\cos\frac{\theta}{2} + \sin\frac{\theta}{2}\right)}{\left(\cos\frac{\theta}{2} - \sin\frac{\theta}{2}\right) (\cos\theta)} \right] \right) \quad (\text{II}, 6)$$

tenemos:

$$\frac{V_t}{V_g} = \frac{1}{\sin\theta} = \csc\theta = \frac{2 \cdot \left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 + l^2\right)^{1/2}}{D} \quad (\text{II}, 7)$$

(ver figura II.1)

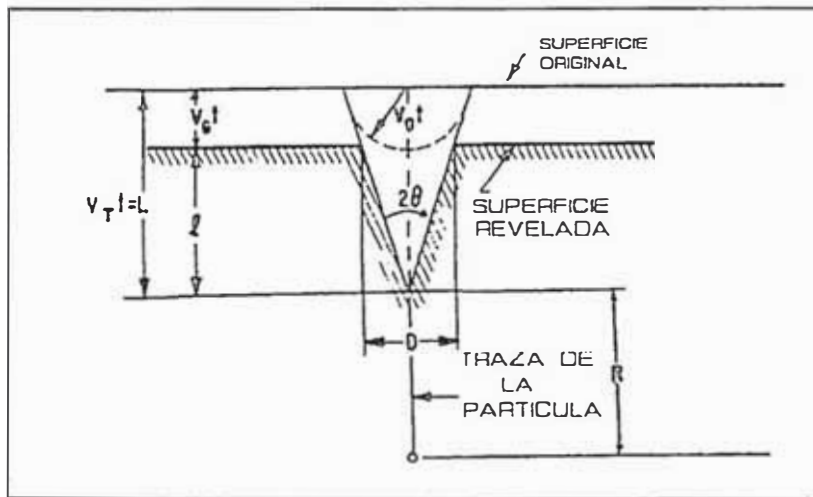


Figure II, 1

Traza normal a la superficie para el cálculo de la razón de velocidades de ataque químico. El ángulo del semicono es denotado por  $\theta$

Combinando esta última expresión con II.1 obtenemos:

$$V_g \cdot t = \left(\frac{D}{2}\right) \left(\frac{D}{2l} + \frac{\left(\left(\frac{D}{2}\right)^2 + l^2\right)^{1/2}}{l}\right) - \left(\frac{D}{2}\right) (\tan\theta + \sec\theta) \quad (\text{II}, 8)$$

de donde tambien se obtiene:

$$V_t \cdot t = \left( \frac{D^2}{2} + l^2 \right)^{1/2} \left( \frac{D}{2l} + \frac{\left( \left( \frac{D}{2} \right)^2 + l^2 \right)^{1/2}}{l} \right)$$

(II,9)

$$= D \cos \theta \frac{(\tan \theta + \sec \theta)}{2}$$

del cálculo anterior podemos resumir:

(1) El ángulo  $\theta$  del cono:  $(\theta = \text{Arc sen} (V_g / V_t))$ .

en ciertos materiales tales como el vidrio (donde  $V_t$  difiere poco de  $V_g$ ) se observarán conos con ángulos grandes, mientras que en plásticos y minerales (donde  $V_t \gg V_g$ ) se observarán trazas en forma de largas agujas.

(2) El diámetro de la superficie de intersección de las trazas se incrementará si se incrementa  $V_t$  alcanzando un máximo de  $2V_g \cdot t$  cuando  $V_t > V_g$  (según ecuación II.5)

Es necesario tener en cuenta que el ángulo crítico  $\theta_c$ , fija una condición para los ángulos de inclinación de las huellas; en el caso que la traza tenga un ángulo de inclinación menor que el crítico, la traza no será observada después del revelado pues la componente de  $V_t$  perpendicular a la superficie será menor que  $V_c$  y la superficie sera removida mucho más rápido. (ver figura II.2)

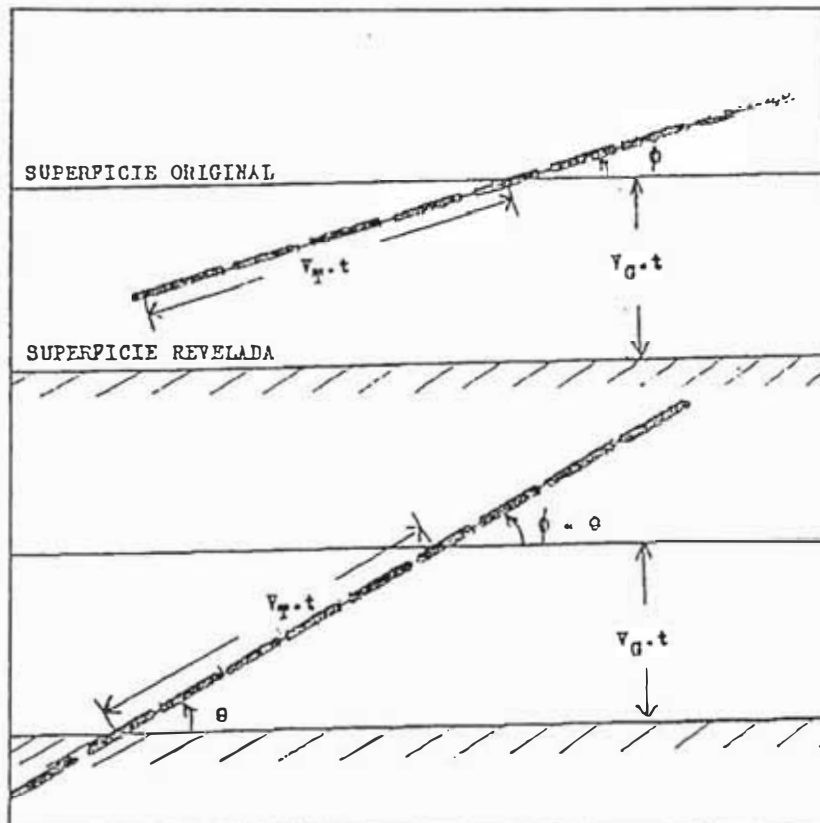


Figure II, 2

La grafica muestra dos trazas oblicuas que no seran reveladas por el agente quimico, la primera debido a que su ángulo de inclinacion es menor que el crítico y la segunda por tener el mismo ángulo crítico

### II.1.2 INCIDENCIA OBLICUA

Nuestro siguiente propósito es calcular los ejes máximos y mínimos de la abertura ( $D$  y  $d$  respectivamente), así como  $L_e$  para una traza incidente formando un ángulo  $\omega$  con la superficie.

La longitud de cada traza, en este caso será:

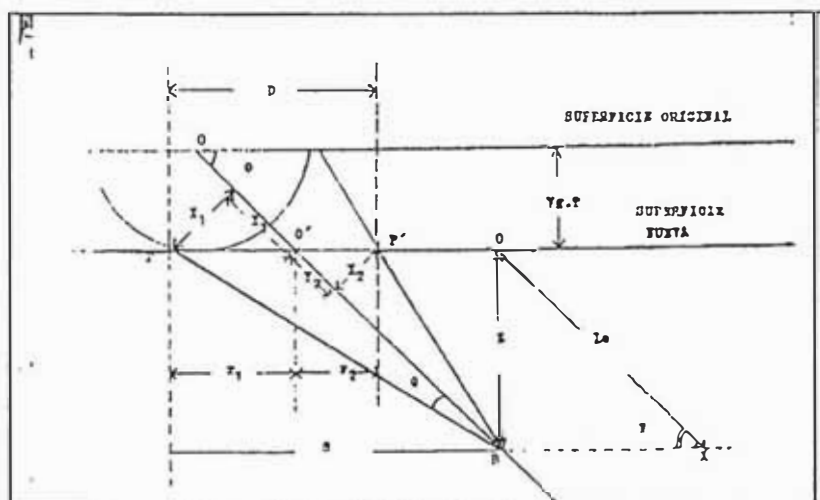
$$L_e = V_c \cdot t = \frac{V_g \cdot t}{\text{Sen}\omega} \quad (\text{II}, 10)$$

(ver figura II.3)

Note que el punto de intersección  $O'$  no divide a  $D$  en partes iguales; de la figura también observamos que:

$$r_1 = \frac{x_1}{\text{sen}\omega} \quad \Delta y_1 = r_1 \cos\omega \quad (\text{II}, 11)$$

$$r_2 = \frac{X_2}{\text{sen}\omega} \quad \Delta y_2 = r_2 \cos\omega \quad (\text{II},12)$$



FigureII,3

Construcción de una traza oblicua para obtener el diametro mayor y menor de la elipse, así como el desplazamiento de su centro, aquí  $\omega$  es el ángulo que forma la traza con la superficie

podemos calcular  $\tan \theta$  utilizando (II.10), (II.11) y (II.12):

$$\tan\theta = \frac{X_2}{(V_t \cdot t - V_g \cdot t / \text{sen}\omega - \Delta y_2)} \quad (\text{II},13)$$

$$\frac{X_1}{V_t \cdot t - V_g \cdot t / \text{sen}\omega + \Delta y_1}$$

Eliminando  $X_1$  y  $X_2$  de la ecuación anterior obtenemos

$$r_1 = \frac{\tan\theta (V_t - V_g / \text{sen}\omega) \cdot t}{\text{Sen}\omega - \text{Tang}\theta \cdot \cos\omega} \quad (\text{II},14)$$

$$I_2 = \frac{\tan\theta (V_t - V_g / \text{sen}\omega) \cdot t}{\text{Sen}\omega + \text{Tang}\theta \cdot \text{cos}\omega} \quad (\text{II},15)$$

Trabajando con (II.11) y (II.12) obtenemos (ver apendice B):

$$D = \frac{2 V_g t (V_t^2 - V_g^2)^{1/2}}{V_t \cdot \text{Sen}\omega + V_g} \quad (\text{II},16)$$

si hacemos  $V = V_t/V_g$  entonces:

$$D = \frac{2 V_g \cdot t (V^2 - 1)^{1/2}}{V \text{sen}\omega + 1} \quad \underline{\underline{(\text{II},17)}}$$

Note que a diferencia del caso circular, la traza no cruza la superficie grabada en el centro c de la elipse, sino que la intersección esta desplazada del centro por una cantidad igual a:

$$\Delta r = \frac{V_g \cdot t}{\text{Tang}\omega \cdot (V \cdot \text{Sen}\omega + 1)} \quad (\text{II},18)$$

(ver figura II.4)

donde de nuevo  $V = V_t/V_g$ .

Ahora para calcular el eje menor "d" de la abertura de la traza, consideraremos la sección circular derecha centrada en  $\Lambda$  del cono grabado. El plano de este círculo pasa a través del centro C de

la elipse; el círculo mismo pasa a través de la abertura de la traza por los extremos  $x, x'$  del eje menor .

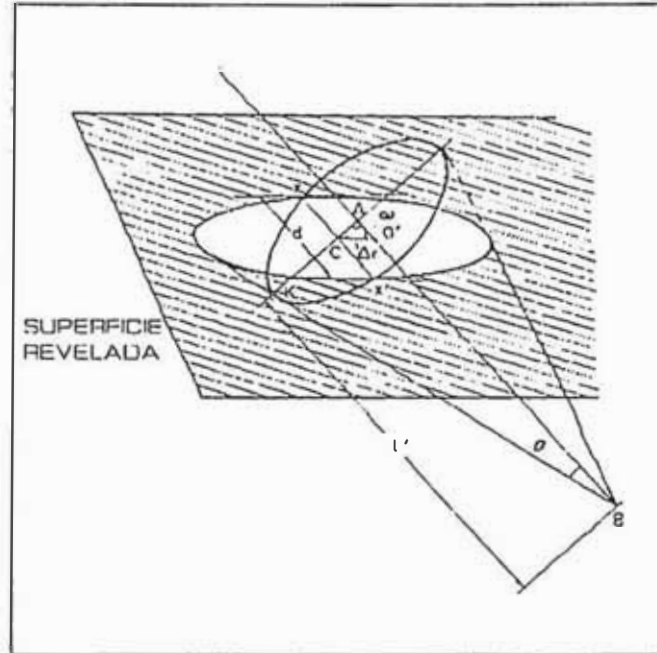


Figure II, 4  
 construcción de una traza oblicua para facilitar el cálculo del desplazamiento del centro de la elipse

La distancia de A a B del cono es:

$$L_e + \Delta R \cos\theta \quad (\text{II},19)$$

de donde finalmente obtenemos el eje menor de la elipse:

$$d = 2 V_g t \sqrt{\frac{V \text{sen} \omega - 1}{V \text{sen} \omega + 1}} \quad (\text{II},20)$$

## II.2

## EFICIENCIA DEL ATAQUE QUIMICO

## (ETCHING)

Ya se ha discutido anteriormente que las trazas son generadas internamente por la fisión espontánea del uranio 238 o por la fisión inducida del uranio 235 en materiales tales como vidrios y cristales naturales. (De ninguna manera se está descartando otro tipo de formación de trazas, sólo hacemos mención de aquellas que son objetivos de nuestro trabajo); ahora deseamos relacionar la densidad de huellas grabadas sobre una superficie interna con el número de eventos de fisión por unidad de volumen, dentro de la muestra (ver figura II.5).

Si consideramos la superficie  $O$  veremos que las trazas internas que contribuyen a la densidad de trazas en la superficie  $O$ , serán todos aquellos que se encuentran a una distancia  $R$  por debajo de ésta ( $R$ : rango del fragmento de fisión en el material). Pero no todas ellas podrán alcanzar la superficie aún si están dentro del rango sugerido; para ver mejor esto imaginemos una superficie a una profundidad  $Z$  de  $O$  y de espesor  $dz$ ., desde la cual han partido los fragmentos de fisión de alcance  $R$ , podemos apreciar que los fragmentos de fisión que alcanzarán la superficie  $O$  son todos aquellos cuya inclinación  $\theta$  es mayor que el ángulo " $\theta_1$ ":

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1}\left(\frac{Z}{R}\right) \quad (\text{II}, 1)$$

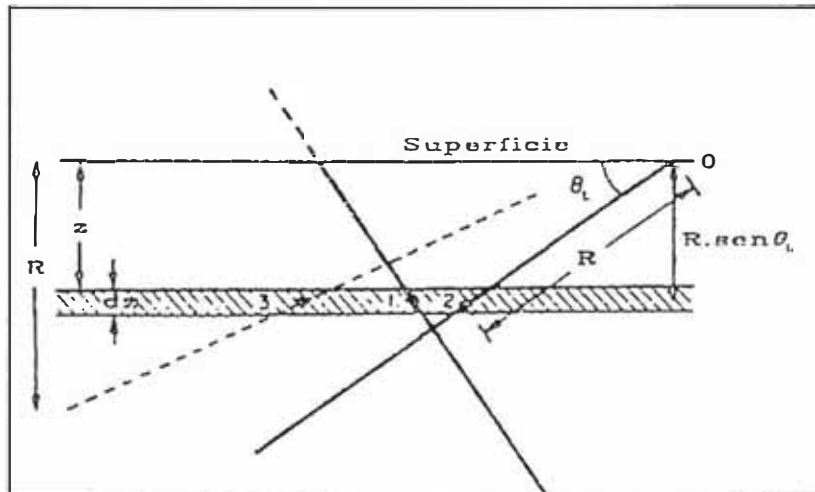


Figure II,5

Solo los fragmentos de la fisión ocurrida dentro de una profundidad  $z < R$  (rango del fragmento de fisión) alcanzaran la superficie o si su angulo de emision es mayor que el angulo critico

Una inclinación con un ángulo  $\theta$  menor que éste valor no permitirá que el fragmento alcance la superficie O.

Los fragmentos que parten de P y hacen un ángulo comprendido entre " $\theta$ " y " $\theta + \Delta\theta$ " están comprendidos dentro del ángulo sólido:

$$d\Omega = \frac{(2\pi l \cos\theta l d\theta)}{l^2} = 2\pi \cos\theta d\theta \quad (\text{II},2)$$

(ver figura II.6).



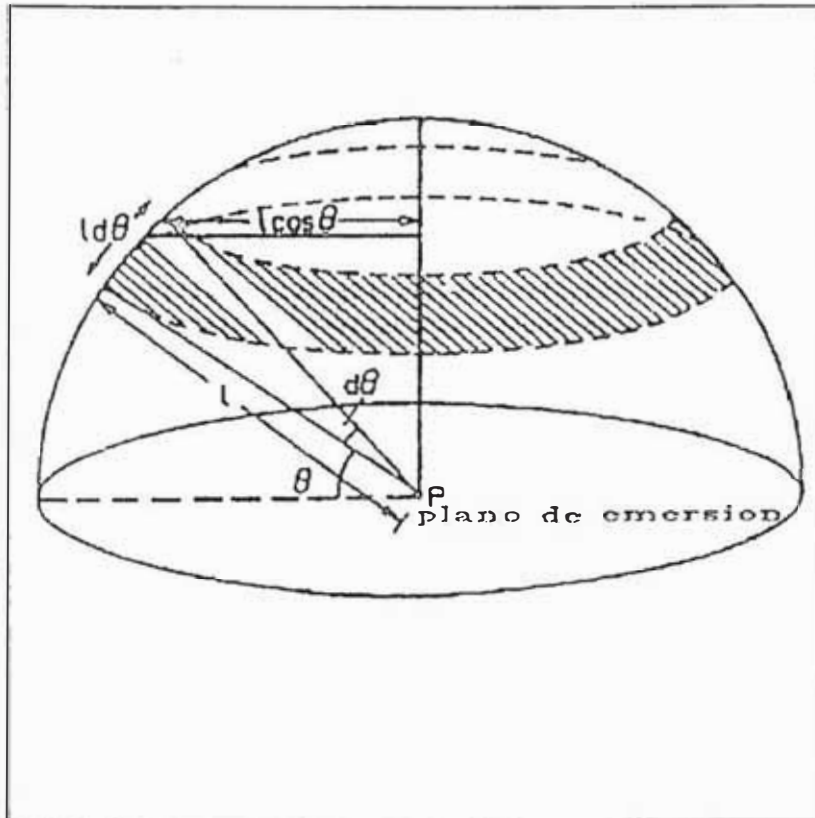


Figure II,6

las trazas que emergen del punto p con un angulo entre  $\theta$  y  $\theta + d\theta$  estan comprendidos dentro del angulo solido

Luego el ángulo sólido total contenido dentro del cono con un semiángulo vertical  $\pi/2 - \theta_1$ , es obtenido integrando la ecuación anterior desde  $\theta_1$  hasta  $\pi/2$ :

$$\int_{\theta_1}^{\pi/2} 2\pi \cos\theta d\theta = 2\pi (1 - \text{sen}\theta_1) \quad (\text{II},3)$$

Como el ángulo sólido subtendido por el hemisferio saliente es  $2\pi$ , la fracción de trazas que alcanzan la superficie O será:

$$1 - \text{sen}\theta_1 \quad (\text{II},4)$$

Ahora como éste es el número de trazas (de la capa comprendida entre  $Z$  y  $Z+dZ$ ) que alcanzan la superficie, tenemos que:

$$1 - \text{sen}\theta_1 \rightarrow 1 - \frac{Z}{R} \quad (\text{II},5)$$

como el número de eventos de fisión por unidad de volumen es  $n$ ; el número total de trazas por unidad de área provenientes de esta capa y que alcanzan la superficie será:

$$n dZ \left( 1 - \frac{Z}{R} \right) \quad (\text{II},6)$$

finalmente el número de trazas efectivas por unidad de área será:

$$\rho_{2\pi} = \int_0^R n \left( 1 - \frac{Z}{R} \right) dZ = \frac{n \cdot R}{2} \quad (\text{II},7)$$

Para llegar a este resultado no se ha tenido en cuenta en ningún momento la condición del ángulo crítico de grabado químico (ángulo mínimo de inclinación que puede tener la traza para poder ser revelada), el cual hará que la densidad de trazas encontradas anteriormente disminuya aún más. Nuestro siguiente propósito será incluir esta última condición.

Para lograr nuestro objetivo hacemos un cálculo análogo al anterior, teniendo en cuenta que para pequeños valores de  $Z$

$$n dZ \left( 1 - \frac{Z}{R} \right) \quad (\text{II},8)$$

El ángulo límite de inclinación de la traza no está determinado por el factor geométrico  $\text{sen}(\theta_1) = Z/R$  sino por el ángulo crítico ( $\theta_c$ ) dado por  $\text{sen}(\theta_c) = v_b/v_t$ .

Es útil dividir la profundidad total R desde la superficie O, en dos regiones R1 y R2, tal como se indica en la figura II.7

La región R1 que va desde 0 hasta  $Z=Z_c$  donde:  $Z_c = R\text{sen}(\theta_c)$ . En esta región el ángulo límite  $\theta_c$  se aplica al ángulo de inclinación  $\theta$  y la contribución (procedente de una capa de espesor  $dZ$ , ( $0 < z < z_c$ ) a una profundidad Z) a la densidad de trazas grabables es:

$$n dZ \int_{\theta_c}^{\pi/2} \cos\theta d\theta = n dZ ( 1 - \text{sen}\theta_c ) \quad (\text{II},9)$$

Entonces la contribución de toda esta zona a la densidad será:

$$n \int_0^{z_c} ( 1 - \text{sen}\theta_c ) dZ = n.R.\text{sen}\theta_c ( 1 - \text{sen}\theta_c ) \quad (\text{II},10)$$

La región R2 que va desde  $Z_c = R\text{sen}\theta_c$  hasta  $Z = R$ . En esta región el único criterio para grabar las huellas es que los fragmentos de fisión deben ser capaces de alcanzar la superficie por lo que  $\theta$  es siempre mayor que  $\theta_c$ , como antes, la contribución de una capa  $dZ$  a una profundidad Z ( $Z_c < z < R$ ) en esta región es:

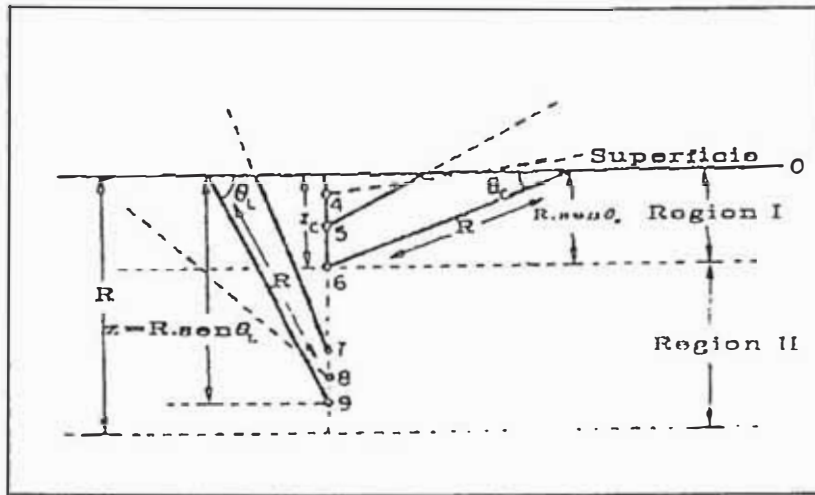


Figure II,7

La muestra a sido dividida en dos regiones. En la 1ra solo seran reveladas aquellas cuyo angulo de inclinacion sea mayor que el angulo critico de revelado y en 2 el revelado solo esta gobernado por el factor geometrico

$$n \, dz \int_{\theta_c}^{\pi/2} \cos\theta \, d\theta = n \cdot dz \left( 1 - \frac{z}{R} \right) \quad (\text{II},11)$$

Y la contribución de toda la región será:

$$n \int_{z_c - R \cdot \text{sen}\theta_c}^R \left( 1 - \frac{z}{R} \right) dz = n \cdot R \left( \frac{1}{2} - \text{Sen}\theta_c + \frac{1}{2} \cdot \text{sen}^2\theta_c \right) \quad (\text{II},12)$$

Sumando las contribuciones de cada región a la densidad de trazas en la superficie 0 obtenemos:

$$\rho_{2\pi} = \frac{1}{2} n \cdot R \cdot \text{Cos}^2\theta_c \quad (\text{II},13)$$

Donde la eficiencia de grabado quimico de un detector de trazas internas será en cualquier caso (geometría  $2\pi$  ó  $4\pi$ ):

$$\eta = \text{Cos}^2\theta_c \quad (\text{II},14)$$

En el cálculo de la densidad superficial de trazas no se ha tenido en cuenta, si las trazas fueron generadas por la fisión espontánea del uranio 238 o por la fisión inducida del uranio 235 (irradiado con neutrones térmicos) por lo que esta relación es válida para ambos casos.

En el caso que se tengan huellas naturales, designaremos la densidad superficial de trazas reveladas por  $\rho_s$  y la densidad volumétrica de trazas generadas por la fisión espontánea del uranio como  $N_f$ . luego :

$$\rho_s = \eta \cdot R \cdot N_f$$

En el otro caso designaremos la densidad superficial de trazas inducidas reveladas como  $\rho_i$  y la densidad volumétrica de trazas generadas por la fisión inducida del uranio 235 como  $N_i$  luego:

$$\rho_i = \eta \cdot R \cdot N_i$$

### CAPITULO III

#### DATAACION POR HUELLAS DE FISION

en el método de datación por huellas de fisión se aprovecha básicamente el número de trazas dejadas por los fragmentos de la fisión del uranio, los cuales se han almacenando en el material desde el momento de su formación. En muchos casos el número de trazas obtenidas por cm cuadrado en el material nos da información de la edad de la muestra y en otros casos nos proporciona el tiempo que ha transcurrido desde el último evento térmico; Este a su vez puede ser reconocido como un evento natural como por ejemplo que la muestra haya estado expuesta al sol o haya sido cubierta por lava volcánica o, como un evento artificial, por ejemplo que haya sido calentada por el hombre. Pero cualquiera que haya sido la historia de formación del material, es necesario una ecuación para obtener una relación entre el número de trazas encontradas naturalmente con la edad misma del material.

#### III.1 DECAIMIENTO RADIOACTIVO.-

Consideremos átomos de núcleo  $A$ , que decaen a una razón constante  $\lambda_a$ , en átomos de un núclido químicamente distinto  $B$ . Si denotamos el número de átomos de  $A$  presentes inicialmente en un mineral por  $N^o_a$ , entonces después de un tiempo  $\tau$ , el número de átomos que quedan  $N^t_a$  esta dado por la ley

$$N_a^t = N_a^o \cdot \exp(-\lambda_a \cdot t) \quad (\text{III.1})$$

$N_a^t$  es una cantidad medible pero no  $N_a^o$ .

Como sabemos que los átomos tipo A han decaído en B (éste último lo hemos asumido estable) una cuenta de átomos de B da, de hecho, el número de átomos A que han decaído.

En este procedimiento tampoco uno conoce si B es del todo radiogénico[9] (es decir producido enteramente por el decaimiento A) o si es que ya han habido núcleos de B presentes. Si éste fuese el caso se tiene que separar la fracción de B no radiogénicos. Lo último puede ser calculado por el conocimiento de la abundancia natural de isótopos B (no distorsionado por radioactividad) tal que una medición de uno de los isótopos no radiogénicos en la muestra produzca el valor de la cantidad intrínseca del núcleo B en éste (no radiogénico).

El exceso de B presente en la muestra es entonces producto del decaimiento A y es este valor el utilizado en el análisis descrito ( $N_a^t + N_b = N_a^o$ ).

### III.2 ECUACION DE EDAD EN HUELLAS DE FISION

Supongamos que un mineral contiene inicialmente  $N_u^o$  átomos de uranio 238 por unidad de volumen, entonces el número de átomos presentes está dado por:

$$N_u^t = N_u^o \cdot \exp(-\lambda_{D238} \cdot t) \quad (\text{III.2})$$

t: edad del cristal.

$\lambda_{DB}$ : constante de decaimiento total del uranio 238.

La edad por huellas de fisión de una muestra mide el tiempo que ha transcurrido desde que el mineral se enfrió por debajo de su temperatura crítica, es decir aquella temperatura para la cual la retención y formación de huellas comienza.

El decaimiento constante para el uranio 238 es casi idéntico al decaimiento por emisión alfa[10].

El número de decaimientos producidos en un tiempo t es:

$$N_8^o - N_8^t = N_8^t \cdot (\exp(\lambda_{DB} \cdot t) - 1) \quad (\text{III.3})$$

Muchos de estos eventos corresponden a la emisión alfa. La fracción correspondiente a la fisión espontánea es:

$$N_f = \frac{\lambda_{fB}}{\lambda_{DB}} N_8^t (\exp(\lambda_{DB} t) - 1) \quad (\text{III.4})$$

$N_f$ : # de eventos de fisión espontánea por unidad de volumen  
Ahora su densidad " $\rho_s$ " de huellas por fisión espontánea atravesando una unidad de superficie interna de la muestra está relacionada con la densidad  $N_f$  por:

$$\rho_s = \eta \cdot R \cdot N_f \quad (\text{III.5})$$



R: Rango del fragmento de fisión.

$\eta$ : Eficiencia en la revelación de las huellas.

Obteniendose:

$$\rho_s = \frac{\lambda_{fB}}{\lambda_{DB}} N_5^t \eta R (\exp(\lambda_{DB} \cdot t) - 1) \quad (\text{III.6})$$

en vez de medir directamente el U-238 contenido, es más conveniente medir el contenido de uranio U-235 de la muestra y asumir que la razón isotópica entre U-238 y U-235 es constante (éste es el caso).

Nota: La determinación del contenido del uranio 238 por fisión inducida con neutrones rápidos es evitada, pues también producirían fisión en el Th contenido en la muestra.

Si la muestra es irradiada con una fluencia conocida (flujo integrado en el tiempo)  $F$  de neutrones térmicos, entonces el número de fisiones inducidas por unidad de volumen es:

$$N_i = N_5^t \cdot \sigma \cdot F \quad (\text{III.7})$$

$\sigma$ : sección transversal de fisión térmica para el  $U^{238}$

$N_5^t$ : número de átomos de  $U^{235}$  por unidad de volumen al tiempo  $t$ .

Luego el número de huellas inducidas por unidad de área está dada por:

$$\rho_i = \eta \cdot R \cdot N_5^t \cdot \sigma \cdot F \quad (\text{III.8})$$

Si asumimos que el rango R y la eficiencia del grabado para las huellas inducidas y naturales son las mismas[11]. Entonces podemos calcular :

$$\frac{\rho_s}{\rho_i} = \frac{1}{\sigma \cdot F'} \frac{\lambda_{fs}}{\lambda_{ds}} ( \exp(\lambda_{ds} \cdot t) - 1 ) \frac{N_8^t}{N_5^t} \quad (\text{III.9})$$

de donde despejando t obtenemos:

$$t = \frac{1}{\lambda_{ds}} \ln \left( \frac{\lambda_{ds}}{\lambda_{fs}} \cdot \frac{N_5^t}{N_8^t} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_i} \cdot \sigma \cdot F' + 1 \right) \quad (\text{III.10})$$

La razón isotópica del uranio ha sido calculado para un gran número de muestras terrestres y se ha encontrado que esta es constante e igual a:

$$I = N_5^t / N_8^t = 7.26 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda_{fs} = 7.03 \cdot 10^{-17} \text{ años}^{-1} \dots\dots*$$

(\* valor escogido para nuestro trabajo)

$$\lambda_d = 1.551 \cdot 10^{-10} \text{ años}^{-1}$$

$\sigma$  = sección transversal del  $U^{235}$  para la fisión inducida por neutrones termicos e igual a:

$$580 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$(1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ cm}^2)$$

luego:

$$t = K_1 \cdot \ln \left( k_2 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_i} \cdot F + 1 \right) \quad (\text{III.11})$$

donde sólo es necesario hallar  $\rho_s$ ,  $\rho_i$  y  $F$ , para obtener la edad del cristal.

Siendo:

$$K_1 = 645 \cdot 10^7 \text{ años}$$

$$K_2 = 929.01 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$$

En el caso de muestras jóvenes ( $t \lll 4.5 \cdot 10^9$ ) tenemos:

$$t = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_i} \cdot F \quad (\text{III.12})$$

La medición de  $F$  puede hacerse usando la activación de hojuelas de oro o cobre con neutrones térmicos, las cuales son colocadas junto a la muestra durante la irradiación. Sin embargo el método usado en forma rutinaria en datación con huellas de fisión, en general es irradiar un pedazo de vidrio con el contenido de uranio conocido en una posición adyacente a la muestra y usados como estandar secundarios, su inducción de huellas  $\rho_{i_2}$  ha sido medida para varios valores de  $F$  y estandarizado por alguna técnica de activación. [12,13,14]

Esta calibración del vidrio introduce una constante  $B$  en la fórmula:

$$\rho_{ig} = B \cdot F$$

(III.13)

luego si se realiza una medición de  $\rho_{ig}$  el valor de F puede ser obtenido.

Por esto, la determinación de la edad se reduce a medir 3 densidades de huellas ( $\rho_g$ ,  $\rho_i$ ,  $\rho_{ig}$ ). Hay que tener en cuenta, sin embargo, que en la densidad de huellas naturales sólo debe considerarse las trazas de fisión espontánea y, segundo, que el mismo procedimiento de grabado y método de conteo de trazas deberá ser usado en forma simultánea, para contar las huellas naturales e inducidas en la muestra.

### III.3 ALTERACION DE LA EDAD EN HUELLAS DE FISION.-

Existen varias causas por las cuales la edad encontrada por el método de huellas de fisión, está alejado de su valor real. Una de éstas causas, por ejemplo, es la reducción de la densidad de trazas debido a que el material tiende a recomponer su estructura interna, claro que ésto no se efectúa rápidamente sino que tiene que transcurrir mucho tiempo y en muchos casos un evento térmico acelera este proceso enormemente.

También puede ocurrir que la muestra haya estado cerca de alguna fuente radioactiva natural el cual producirá trazas espurias y por ende una falsa edad será encontrada. Por lo tanto, es necesario tener algunas consideraciones antes de decir que la edad encontrada es realmente la que corresponde a la muestra

#### III.3.1 DECAIMIENTO DE LAS TRAZAS

La probabilidad de una disminución en la densidad o tamaño de las trazas siempre está presente.

Dicha reducción a la cual llamaremos decaimiento, puede ser causado por un evento a altas temperaturas y de poca duración o por un pequeño calentamiento a bajas temperaturas durante un intervalo de tiempo grande.

Es importante establecer si el decaimiento de trazas ocurre sobre tiempos geológicos o arqueológicos. Por lo tanto, se han

hecho una serie de estudios sobre el comportamiento de muchas sustancias a calentamientos sucesivos a distintas temperaturas y tiempos (Recocido). Este proceso en algunos casos puede resultar muy complicado[15], por lo que no son fácilmente descritos por una única energía de activación o por un único recocido cinético. los resultados obtenidos en su gran mayoría, son similares a la que se indica en la figura III.1.

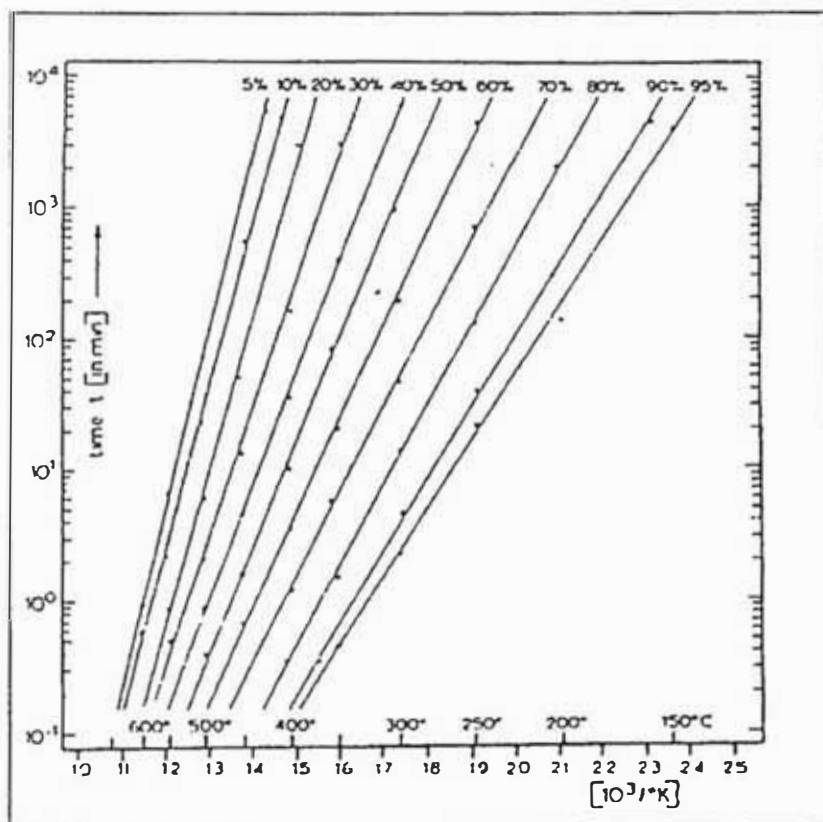


Figure III, 1

Curva De Arrhenius típica obtenida en un laboratorio. Cada porcentaje de trazas perdidas tiene una pendiente característica del cual se puede obtener su energía de activación por la relación:  
 $\ln t = a + (U/k)(1/T)$

En esta figura podemos apreciar que el recocido de las trazas, medidos como la fracción de trazas (que se pierden) en función del tiempo y la temperatura, produce la denominada curva de Arrhenius. En la cual un determinado porcentaje de trazas perdidas tiene una pendiente característica o energía de

activación  $U_i$ , además podemos expresar los efectos del tiempo de recocido  $t_r$  y temperatura  $T$  para una reducción de la densidad dada por la relación :

$$t_a = a \exp(U/KT) \quad (\text{III,14})$$

Donde  $K$  es la constante de Boltzman y  $a$  es otra constante.

Por ejemplo en el caso de la obsidiana se necesita una temperatura de recocido de 390 grados centígrados durante una hora para que su densidad de trazas decaiga en un 50% (ver apéndice C). Sin embargo, debemos recalcar que el uso de diferentes agentes químicos puede dar razones de decaimiento de trazas aparentemente diferentes[16], tal que de una sola muestra se puede extraer informaciones diferentes.

Es necesario mencionar que el recocido de las trazas a elevadas temperaturas ocurre presumiblemente vía la difusión de defectos atómicos a través de la red del cristal o del movimiento de los fragmentos moleculares en el caso de los polímeros. Los átomos intersticiales pueden entonces recombinarse con las vacantes de la red, y las cadenas moleculares rotas pueden volverse a unir (proceso ocurrido durante la formación de la traza), así como las distintas especies activas pueden recombinarse. Los detalles de tales procesos no son del todo comprendidos. En el caso de cristales, el experimento de dispersión de rayos X con ángulos pequeños indican que las trazas aparentemente consisten de defectos extendidos y rodeados por numerosos defectos puntuales y que durante el recocido estos defectos puntuales son mas

fácilmente removidos que los defectos extendidos.

Un típico experimento de recocido para la obtención de la curva de Arrhenius consiste en lo siguiente : Un determinado número de cristales conteniendo huellas de fisión (espontáneas o inducidas por neutrones) son calentadas a distintas temperaturas  $T$  para distintos intervalos de tiempo  $t$ . Después de este calentamiento, los cristales son revelados y la densidad de trazas  $\rho(T,t)$  son medidas y comparadas con la densidad de aquellas muestras que no han sufrido recocido. Las distintas combinaciones  $(T,t)$  para muestras que presentan la misma fracción de trazas perdidas producirán un arreglo de líneas cuando se gráfica el  $\log(t)$  versus  $1/T$  .

En términos generales, la reparación de la traza durante el recocido puede, como se indico antes, ser visto como el resultado de un proceso de difusión. El coeficiente de difusión puede ser expresado en función de la energía de activación  $U_1$  y la temperatura  $T$  tal como se indica:

$$D = D_0 \exp(-U_1/KT) \quad (\text{III},15)$$

Donde  $D_0$  es una constante de dimensión  $(\text{longitud})^2/\text{tiempo}$ . La escala de tiempo para la difusión de los defectos será proporcional; a la inversa de  $D$ , tal que su magnitud es proporcional a  $\exp(U_1/KT)$ . Por lo tanto una gráfica de  $\log t$  versus  $1/T$  producirá líneas rectas, de pendiente  $U_1/K$ . De esta manera se han deducido las energías de activación para el proceso de reparación de trazas, las cuales son del orden de los



eV. Tales energías de activación son típicas de la difusión de los defectos atómicos o moleculares.

Una característica importante obtenida del gráfico, es que la energía de activación, para la reparación de trazas, tiende a incrementarse (con las pendiente de la gráfica) mientras mas daño es removido por efecto de la temperatura[17]. Esto último es importante pues permite hacer correcciones en la edad de la muestra cuando esta ha sufrido algún evento térmico.

### III.3.1.a. TEMPERATURAS TIPICAS DE RECOCIDO PARA TRAZAS DE FISION EN VARIOS MATERIALES.-

La estabilidad de las trazas de fisión han sido extensivamente estudiados por años, en vista de su importancia en la datación por el método de huellas de fisión. Los fragmentos de fisión son, además, fácilmente disponibles y son almacenados por todos los detectores de trazas. Se ha encontrado que la estabilidad de las trazas de fisión en diferentes materiales varía enormemente. Las trazas en los plásticos son afectados por temperaturas que varían entre los 80 y 100 grados centígrados y durante 1 hora, mientras que en algunos minerales, tales como el Clinopyroxene, cuarzo, zirconio y Sphene las trazas de fisión son estables durante grandes períodos de tiempo y a temperaturas de 500 grados centígrados o más . En la tabla III.1 se muestran las propiedades de la retención de las trazas para diferentes detectores siendo la temperatura el parámetro, que indica el decaimiento total de las trazas durante una hora.

TABLA III.1

Característica de retención de trazas de algunos detectores comunes donde se muestra la temperatura típica de borrado para una hora de recocido

materiales	100% DE PERDIDA DE TRAZAS EN 1h (C)
PLASTICOS nitrato de celulosa cr-39 lexan makrofol.	80-100 ~250 > 185 165.
VIDRIOS Soda lime tektita	350-400 ~ 500
CRISTALES Apatita Clinopyroxene Epidote Feldespato Merrillite Mica Olivine Orthopyroxene Cuarzo Sphene Zirconio	350-400 500-600 625-725 700-800 ~ 450 500-600 400-500 450-500 1000 650-800 750-850.

III.3.1.b TEMPERATURA DE CIERRE "CLOSING TEMPERATURES".-

En esta parte es importante remarcar que, para escalas de tiempo geológicos, el contenido de uranio del cristal acumulara un considerable numero de fisiones espontáneas a través de la fisión del uranio 238 ( $U^{238}$ ). Si el contenido de uranio del cristal es conocido, entonces el numero de éstas trazas puede ser utilizado para deducir la edad del cristal.

Para la interpretación de la edad, es importante saber si la edad encontrada es realmente la edad del material o el tiempo que a transcurrido desde su último calentamiento. Por ejemplo: si inmediatamente después del proceso de formación de una roca, ésta

se ha mantenido a temperaturas relativamente bajas durante un tiempo "t", es obvio que la edad medida por trazas de fisión será "t" y que la misma edad será obtenida para cada uno de los minerales componentes de la roca. Por otro lado, si la roca se enfría muy lentamente durante un intervalo de tiempo muy grande (no insignificante comparado con la edad de formación de la muestra), la interpretación de su edad no sería muy clara, pues cada mineral constituyente de la roca darían edades distintas, debido a que tienen distintas temperaturas de retención de trazas.

Si una roca se enfría tal como se indica en la figura III.2, la pregunta sería en qué punto de la curva de enfriamiento empieza realmente la retención de trazas.

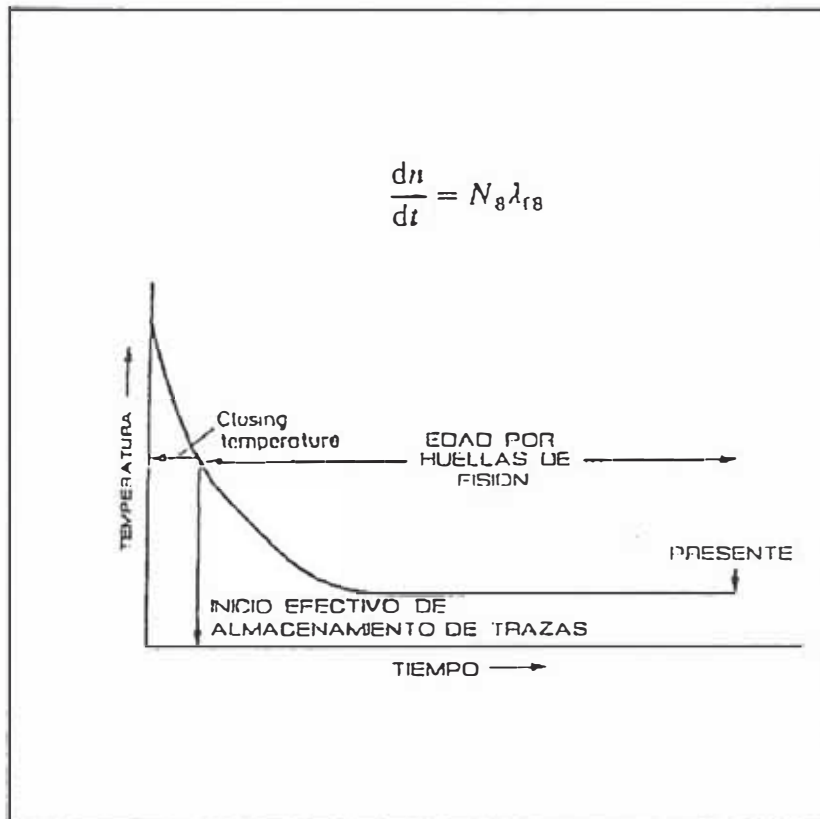
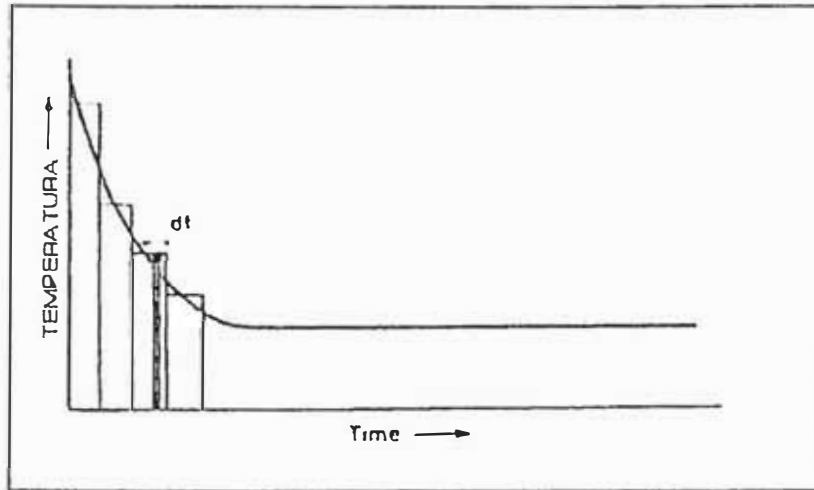


Figure III, 2

Curva de enfriamiento para una roca. la Temperatura de cerrado esta definida por aquella, para la cual un tipo de cristales comienza a retener sus trazas espontanea en forma efectiva.

la temperatura a la cual el material empieza a retener las trazas se conoce con el nombre de "Closing temperature" o "closure temperature" (preferimos mantener este nombre), la cual depende del tipo de cristal bajo consideración y de la razón de enfriamiento de la roca .

Para un enfriamiento constante de la roca, la manera como las trazas se acumulan puede ser representado, reemplazando la función continua  $T(t)$  por una serie de pasos, cada una de temperatura constante. Tal como indica la figura III.3.



**Figure III, 3**

Reemplazo de una curva de enfriamiento continua por una serie de pasos de recocido isotermico. Tal analisis es utilizado para estimar la temperatura de cerrado y calcular la edad de trazas efectivas de la roca

Consideremos ahora un intervalo de tiempo  $dt$  dentro de uno de estos pasos. La razón a la cual el número de trazas de fisión son producidos por unidad de volumen esta dado por :

$$\frac{dn}{dt} = N_B \lambda_{fB} \quad (\text{III}, 16)$$

donde  $\lambda_{fB}$  es la constante de decaimiento de la fisión del uranio 238, y  $N_B$  es el número de átomos de  $U^{238}$  por unidad de volumen. El incremento de la densidad de trazas de fisión (en ausencia de recocido) sobre una superficie interna del cristal esta dado por:

$$dp = N_B \lambda_{fB} F(R, \theta_c) \quad (\text{III}, 17)$$

donde  $F(R, \theta_c)$  es el factor geométrico el cual indica las aportaciones del número de trazas a la densidad superficial y que tiene el valor de  $R \cos^2 \theta_c$  para trazas internas y  $V_c$  constante tal como indicamos antes. Aquí  $R$  es el rango de alcance del fragmento de fisión y  $\theta_c$  es el ángulo crítico para el grabado químico; la

reducción en el número de trazas de fisión por unidad de volumen debido a cambios en el factor  $F(r, \theta_c)$  por efectos del recocido será:  $\alpha(T)\rho dt$  donde  $\alpha(T)$  es la reducción fraccional de las trazas; por lo que el cambio neto en la densidad de trazas está dado por:

$$d\rho = N_B \lambda_{fB} F(R, \theta_c) dt - \alpha(T) \rho dt \quad (\text{III.18})$$

Para escalas de tiempo pequeño comparados con el tiempo de vida media del  $U^{238}$ , la razón de producción de trazas (por unidad de tiempo) que se graban en el material por unidad de área, puede ser considerado como una constante,  $P$ , por lo que:

$$\rho(T) = \frac{P}{\alpha(T)} - C \exp(-\alpha(T) t) \quad (\text{III.19})$$

donde  $C$  es una constante de integración que calcularemos a continuación:

Existen dos grupos de trazas a considerar; las primeras son aquellas que estuvieron presente al inicio del intervalo isotérmico bajo consideración, las cuales tienen una densidad  $\rho_0$ , para ésta tenemos que  $P=0$  ya que son completamente distintas de aquellas producidas durante el intervalo en cuestión; entonces de la ecuación III.19 tenemos que:

$$\rho_0(t) = - C \exp(-\alpha(T) t) \quad (\text{III.20})$$

y puesto que  $\rho_0(t) = \rho_0$  en  $t = 0$ ,  $C = -\rho_0$   
se llega a :

$$\rho_0(t) = \rho_0 \exp(-\alpha(T) t) \quad (\text{III},21)$$

De esta manera las trazas presentes al comienzo de cada intervalo se reducen exponencialmente en cada intervalo de tiempo.

La fracción de trazas retenidas después de un tiempo  $t$  a la temperatura  $T$  puede ser calculada de la curva de Arrhenius. Si denotamos esta fracción por  $F$ , entonces:

$$F = \frac{\rho_0(t)}{\rho_0} \quad (\text{III},22)$$

y de la ecuación III,21

$$F = \exp(-\alpha(T) t) \quad (\text{III},23)$$

en esta parte del análisis se ha asumido que todas las trazas son frescas al inicio del intervalo. De hecho, algunas de éstas son la fracción residual de la población de trazas iniciales, pero, ahora mucho más reducidas por efecto del recocido.

Como éstas trazas sufren el efecto del recocido, es lógico pensar que una mayor energía de activación prevalezca durante cualquier subsecuente recocido que ellos sufran, haciéndolos mucho más resistentes al decaimiento.

El segundo grupo de las trazas mencionadas, son aquellas producidas sólo durante el intervalo isotérmico bajo

consideración ( $\rho'$ ), donde la densidad es cero al inicio del intervalo, por lo tanto de la ecuación III,19 con  $t=0$  tenemos que:

$$C = P / \alpha(T)$$

y

$$\rho'(t) = \frac{P}{\alpha(T)} (1 - \exp(-\alpha(T) t)) \quad (\text{III.24})$$

la densidad final de trazas al término de un intervalo de longitud  $t$  está dado por :

$$\rho(t) = \rho_0(t) + \rho'(t) \quad (\text{III.25})$$

ahora usando las ecuaciones III,22,23,24, obtenemos:

$$\rho(t) = \rho_0 F + \frac{P}{\alpha(T)} (1-F) \quad (\text{III.26})$$

sustituyendo en esta última ecuación la relación para  $\alpha(T)$  se logra:

$$\rho(t) = \rho_0 F + \frac{P t (1-F)}{-\ln F} \quad (\text{III.27})$$

de lo anterior podemos entonces decir que la densidad de trazas  $\rho_k$  al final del  $K$ -esimo intervalo esta dado por:

$$\rho_k = \rho_{k-1} F + \frac{P t (1-F)}{-\ln F} \quad (\text{III.28})$$



ya que la densidad de trazas inicial para el K-esimo intervalo es la densidad de trazas final  $\rho_{k-1}$  del intervalo anterior.

Este procedimiento puede ser utilizado aun si  $T(t)$  es continuo, realizando un trabajo de recocido al mineral de interés y obteniendo la densidad de trazas como función del tiempo.

Para una razón de enfriamiento dado, la longitud del intervalo isotérmico es determinado seleccionando el tamaño del paso de temperatura entre intervalos consecutivos.

La densidad  $\rho_{k-1}$  debe ser cero a temperaturas mayores a la cual la retención de trazas comienza, y mientras K incrementa, la temperatura disminuye, elevándose la fracción de trazas retenidas, en cada paso el valor de F apropiado es determinado de la curva de Arrhenius. Este procedimiento iterativo produce una curva de crecimiento de trazas en función de la temperatura.

Como un ejemplo aplicativo del proceso citado anteriormente podemos citar el realizado con razones de enfriamiento de 10, 1, 0.1 °C/Y<sup>-1</sup> todas lineales y contínuas tal como se indica en la figura III.4[]

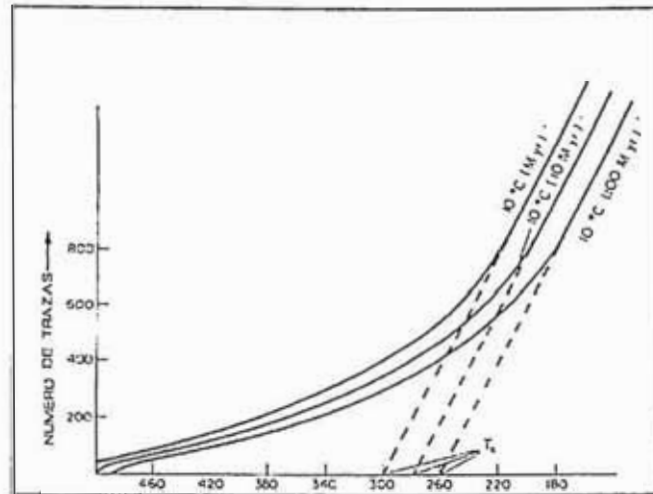


Figure III, 4

Crecimiento del # de trazas en función de T para distintas razones de enfriamiento. La extrapolación de dichas curvas nos da la temperatura de cerrado a la cual presumiblemente comenzó la retención de trazas

En esta podemos observar que las curvas tienen un comportamiento lineal a bajas temperaturas lo cual indica que el recocido no influye fuertemente en el borrado de trazas P.

Una extrapolación de éstas curvas nos da una temperatura  $T_c$  la cual corresponde al Closing temperature efectivo (a la cual presumiblemente debió haber empezado la acumulación de trazas). Para Gartner una variación de la razón de enfriamiento ( desde 10 °C/ año hasta 0.1 °C/año) solo cambia la temperatura a la cual empieza la acumulación de trazas (de 300°C a 260 °C en este caso). Como vemos, el cálculo del closure temperature depende sólo de la extrapolación de los datos de recocido para tiempos reproducibles en un laboratorio (horas o días) sobre escalas de tiempo geológicos (millones de años); Por ejemplo recientemente se han realizado varios trabajos para medir la densidad de trazas en apatita como función de la profundidad a la cual es sacado; La temperatura de tales hoyos como función de la profundidad pueden

ser fácilmente obtenidos, y el conocimiento de la geología local permite estimar la duración de los regímenes de altas temperaturas a la cual las apatitas estuvieron expuestas. El closing temperatures obtenido para apatitas están dentro del rango de 80 a 120 °C (esta depende de la razón de enfriamiento) y en el caso del Sphene la retención de trazas comienza alrededor de los 300°C

### III.4

#### METODO DE CORRECCION DE EDADES

##### III.4.1.METODO DE CORRECCION POR TAMANO DE LA TRAZA.-

Un efecto termico especialmente interesante ocurre cuando las trazas son afectadas por el calor (calentamiento), pero no son borradas totalmente; El resultado es que la razón de ataque químico a lo largo de la traza se ve disminuída trayendo como consecuencia una disminución en el diámetro de la traza para un tiempo de grabado fijo. (también su longitud se ve afectada). Este importante paso de hacer uso de éstas alteraciones de los diámetros en vidrios fue iniciado por Storzer y Wagner 1969. El procedimiento consiste en medir el decrecimiento en el diámetro de las trazas como una función del tiempo y temperatura para luego relacionar estos valores al decrecimiento observado en el # de trazas que son reveladas por el etching .

La curva Diámetro versus densidad que se obtiene frecuentemente se indica en la figura III.5

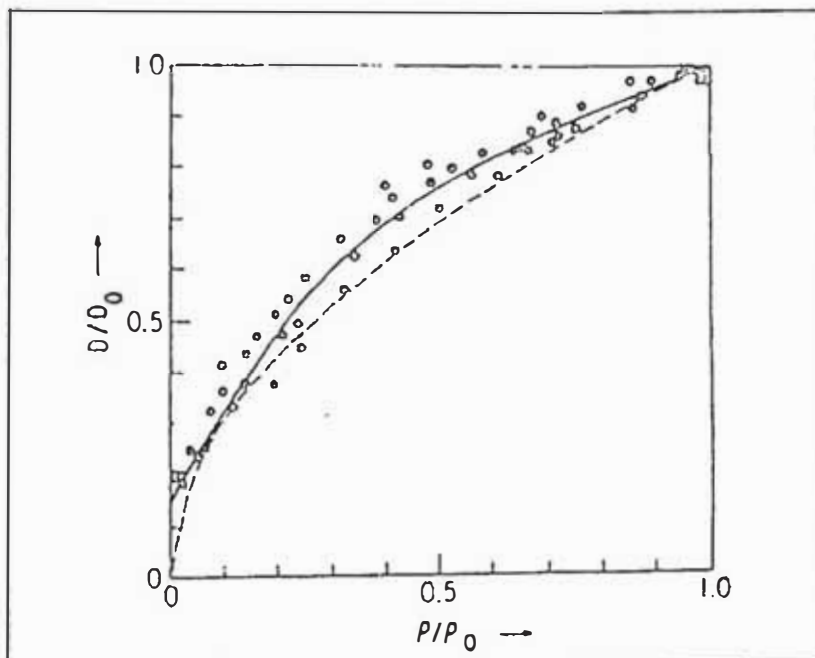


Figure III, 5

El diámetro promedio en una muestra recocida es plotada contra la densidad de trazas. Los datos son normalizados por el diámetro promedio y la densidad de trazas de una muestra no recocida

En la práctica el diámetro promedio de las huellas fósiles son comparadas con el diámetro promedio de las huellas inducidas; Si las huellas fósiles son mas pequeñas, entonces, para obtener la edad, La densidad de trazas es incrementado apropiadamente usando la curva  $D_0$  versus  $P_0$ .

#### III.4.2.METODO DE PLATEAU (STORZER AND POUPEAU 1973)

En este método se realiza recocido a pares separados de muestras cada una en una serie de temperaturas entre los 50 y 450°C[18].

En cada caso un muestra tiene sólo huellas fósiles y la otra contiene huellas inducidas

Tal como se indica en la figura III.6:

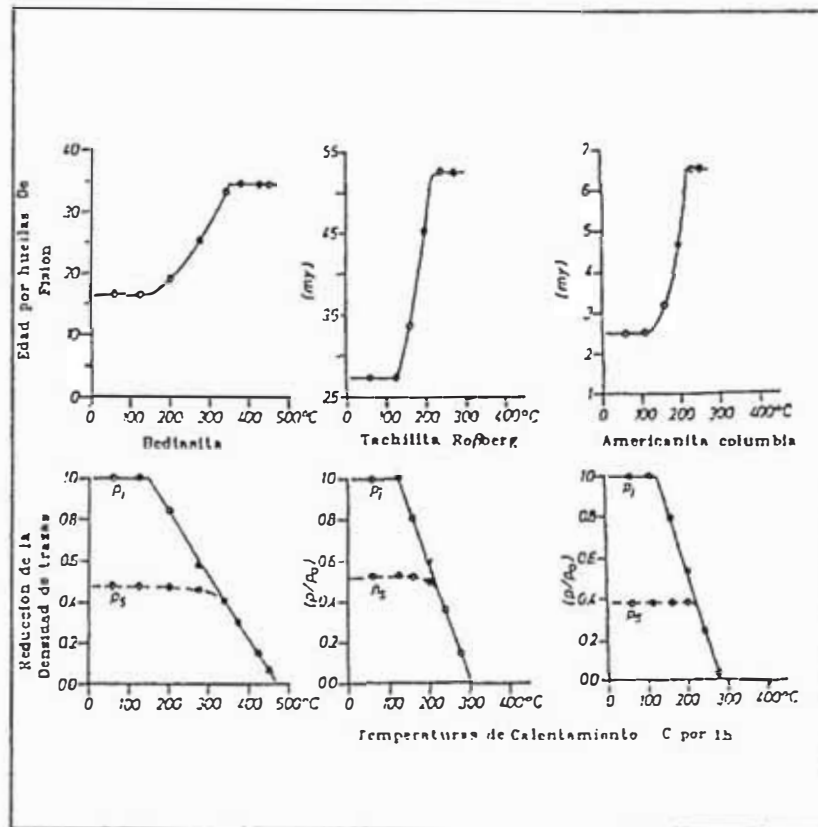


Figure III, 6

en ambas muestras la densidad de trazas decrece mientras se incrementa la temperatura, pero en la muestra que contiene sólo huellas inducidas la razón de decrecimiento es al inicio mas rápido que la muestra que contiene huellas fósiles.

Cada par de muestras permite una edad por trazas de fisión la cual es calculada y graficada como una función de la temperatura. La edad aparente se incrementa a bajas temperaturas pero alcanza un plateau a temperaturas sobre aquella correspondiente a un evento de calentamiento previo o a temperaturas a la cual decaen las trazas naturalmente. Este procedimiento el cual es análogo al que convencionalmente se emplea en la datación por  $\Lambda r^{10} - Ar^{39}$ . Da

resultados concordantes con la datación de  $Ar^{40}$  con una precisión del  $\pm 3\%$ .

Este método explota el hecho que la resistencia al decaimiento térmico es una función creciente a la densidad de daños generado por radiación. (Mientras un fragmento de fisión esta deteniéndose, este captura electrones y produce menos daño a su paso por lo que la parte final de una traza es más sensible a un recocido que la porción de daños generado cuando el fragmento está altamente energético).

Por lo tanto las trazas que han sufrido un recocido son más cortas que las trazas frescas y una fracción más pequeñas de ellas son reveladas en una superficie dada. La curva de Arrhenius muestra implícitamente que es más difícil borrar el extremo final más denso (de daños) que el extremo final más ligero.

La figura muestra el concepto de Edad de Plateau; donde hemos designado como  $T_a$  edad aparente;  $T_p$  edad de plateau;  $\rho_s$  densidad de huellas fósiles y  $\rho_i$  densidad de huellas inducidas

Si no ha existido ningún tipo de pérdidas en la densidad de trazas fósiles entonces ambas poblaciones de trazas tendrán un comportamiento similar y la edad calculada la cual depende del cociente  $\rho_s/\rho_i$  permanecerá constante con la temperatura tal que  $T_a = T_p$ .

Pero si ha ocurrido un recocido geológico parcial, el comportamiento de las poblaciones de trazas serán diferentes.

Como las trazas fósiles han tenido ya un decaimiento, producto del recocido geológico, sólo las trazas más resistentes han

sobrevivido.

La aplicación de un calentamiento en un laboratorio no influirá sobre  $\rho_s$  al inicio; sólo cuando el recocido sobrepase la condición geológica equivalente la densidad de trazas  $\rho_s$  empezara a disminuir. Las trazas de fisión inducidas recientemente, sin embargo, empezarán a reaccionar al tratamiento de recocido de laboratorio mas rápidamente y comenzaran a decaer a bajas temperaturas

El efecto neto es que uno consigue una edad inferior  $T_a$  de la parte inicial de la las curvas. Pero cuando la severidad del recocido sobrepase el condicionamiento geológico de las trazas fósiles, las dos poblaciones comenzaran a reaccionar al recocido en la misma manera. La razón  $\rho_s/\rho_i$  por lo tanto comienza a elevarse y alcanza un valor constante, la cual producirá una edad mayor " $T_p$ " (edad de Plateau).

III.5.1.METODO POBLACIONAL.-

En este método se asume que el contenido de uranio del material a ser datado es casi uniforme (en el caso de la obsidiana éste es el caso). El mineral escogido es separado en dos partes, las cuales serán tratadas como una representación de la población de trazas del material. La primera de ellas es reservada para la medición de la densidad de las trazas fósiles. La segunda es calentada para remover las trazas espontáneas y luego irradiada con un flujo de neutrones térmicos.

Finalmente se montan en portamuestras, se pulen y se atacan químicamente. midiéndose luego la densidad de trazas fósiles sobre la primera y la densidad de trazas inducidas sobre la segunda.

El método poblacional no es confiable si la concentración de uranio varía enormemente, particularmente si se están usando pequeños cristales, ó si el proceso de recocido altera las propiedades del material.

Este problema puede ser eliminado si se suprime el paso de calentamiento de la muestra, con lo que la densidad de huellas fósiles es medido en una de ellas y la densidad de huellas inducidas más fósiles son medidos sobre la segunda; para finalmente obtener la densidad de trazas inducidas por diferencia.

El error estadístico introducido por la sustracción puede ser



enorme a menos que la densidad de trazas inducidas sea mucho mayor que las fósiles

En este método es necesario observar que ambas muestras tengan las mismas condiciones químicas y a la vez, deben ser tratadas en forma simultánea para evitar serios errores en el cálculo de su edad.

### III.5.2.METODO DEL DETECTOR EXTERNO.-

En el método del detector externo lo principal es determinar la densidad de trazas fósiles e inducidas para cada cristal particular .

Para aplicar este método un # de granos son montados, pulidos y luego atacados químicamente para revelar sus trazas fósiles. Estos granos montados son luego cubiertos con una lámina de un material detector tal como la Mica Muscovita ó Lexan y luego irradiado con un flujo de neutrones térmicos. Los fragmentos de la fisión inducida producen trazas en los detectores, y la densidad de cada cristal puede ser medido.

En este método se deben tomar algunas precauciones. Primero, el contenido de uranio del detector externo debiera ser pequeño comparado con el de los cristales; En el caso de la mica cuyo contenido de uranio es variable es necesario realizar un trabajo preliminar para seleccionar aquella con contenido bajo de uranio (unas pocas partes de uranio en  $10^9$  es aceptable) también existen

láminas sintéticas de micas para este fin. El Lexan contiene muy poco uranio ( $\ll 1$  parte en  $10^9$ ) pero es inadecuado para usarlo con altas fluencias de neutrones ( $\gg 10^{17}$  n  $\text{cm}^2$ ) pues se oscurece debido a las trazas de los neutrones de retroceso producido por las componentes rápidos, la cual están normalmente presentes en los flujos de neutrones térmicos disponibles en un reactor nuclear. Mas aun, muchos plásticos se vuelven frágiles haciendo difícil su manipuleo después de la exposición.

El decaimiento parcial de las trazas de fisión inducidas pueden tambien presentarse en los plásticos especialmente si el detector es usado dentro del reactor (en el tubo del haz de neutrones). Segundo, debe mantenerse buenas condiciones de limpieza durante la preparación de las muestras para su irradiación, pues el uranio en contacto con la contaminación puede producir trazas inducidas de interferencia sobre la lámina del detector.

Finalmente uno necesita medir la densidad de trazas fósiles e inducidas, correspondientes al misma área individual de cada cristal. Para calcular su edad, es importante asegurarse que uno sea capaz de identificar la imagen de trazas inducidas producidas por cada cristal en el detector externo.

Esto último puede lograrse haciendo un cuidadoso mapeo de la localización de los cristales antes de la irradiación e incertando cualquier marca de confianza sobre la montura del cristal y colocando al detector en firme contacto con el.

Puesto que las trazas inducidas son medidas desde una superficie externa mientras que las trazas fosiles son medidas desde una

superficie interna, la densidad de estas ultimas debera ser multiplicada por un factor de 0.5 antes de introducirla en la ecuación de edad. Esto es debido a que el material sólo contribuye por un solo lado del detector externo a la densidad de trazas inducidas  $\rho_1$  mientras que el material contribuye por ambos lados de una superficie originalmente en el interior del cristal a la densidad de trazas fósiles.

Este valor geométrico puede diferir del valor ideal de 0.5 si la eficiencia del detector externo y el cristal ( ó vidrio ) a ser datado difieren.

Los vidrios (obsidianas) generalmente tienen eficiencias de grabado por debajo de 1 mientras que las micas y lexan tienen eficiencias cercanas a 1.

### III.5.3

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El número de trazas originadas en muestras materiales está limitado por la baja sensibilidad de los vidrios y cristales naturales, ninguno de los cuales graba las trazas de las partículas o de alguna radiación de baja intensidad tales como las producidas en el decaimiento alfa o beta. Esta insensibilidad

es una característica de los sólidos que graban trazas.

Las trazas internas son debida, enteramente, a las fisiones o a los núcleos residuales los cuales son muchos mas pesados que las particulas alfa.

Excluyendo el efecto de los rayos cósmicos, Estamos implícitamente considerando sólo muestras que se encuentran sumergidos dentro de una atmósfera ó a una profundidad de 600 gm/cm<sup>2</sup> en el interior de un cuerpo sin atmósfera.

En la actualidad existen 4 variedades de trazas naturales internas que han sido identificadas :

-Las trazas por fisión espontánea del U<sup>238</sup>

-Las trazas de fisión espontánea del Pu<sup>244</sup>

-Las trazas de los nucleos pesados de retroceso productos del decaimiento alfa del Th<sup>232</sup> , U<sup>235</sup>,U<sup>238</sup>.

-Y las trazas producidas por la dispersión de las partículas alfa en los minerales silicatados

En los dos últimos casos debera enfatizarse que las partículas alfa por si mismas no crean trazas en los minerales naturales, sino el corto alcance ( $5 \times 10^{-5} \text{m}$ ) de los núcleos pesados de retroceso dejan trazas revelables

Aunque en principio existen muchas otras variedades de trazas, éstas son tan raras en la tierra que no son considerados[19].

#### III.5.3.1. IDENTIFICACION DE TRAZAS:

Aunque sólo los eventos de fisión producen trazas naturales, todas las características lineales revelados por los agentes

químicos no son necesariamente trazas, por ejemplo, se podran obtener algunas fallas análogas a las trazas, ó espurias en los vidrios y dislocaciones en los cristales.

Una preparación cuidadosa de los vidrios permite que tales características sean identificadas plenamente cuando éstas están presentes en la muestra. Las dislocaciones en los cristales pueden ser identificadas por algunas propiedades que las distinguen de las trazas (longitud, distribución, orientación, etc).

#### III.5.3.1.a.IDENTIFICACION DE TRAZAS VIDRIOS:

El proceso de datación depende propiamente de la identificación de las trazas de los fragmentos de fisión y su cálculo aproximado.

Las trazas reveladas en los vidrios tienen apariencia de pequeños conos, cuyo intercepto con el plano de trabajo muestra pequeñas elipses, Las cuales varían desde el extremo inicial hasta el extremo final de la traza donde éstas toman formas circulares y oscuras.

Debido a que las trazas son fácilmente confundidas con la porosidad del mismo material, existen dos maneras ó criterios de contabilizarlas las cuales son:

1.-El primer procedimiento es formar pequeñas trazas con un tiempo de ataque químico breve. Estas tiene sus limitaciones pues uno, puede inadvertidamente contar pequeñas imperfecciones ó inclusiones que aparecen con un pulimentado inadecuado, la otra limitación es que las pequeñas trazas son muy difíciles de contar

rápida mente cuando su densidad es muy baja, sobre todo cuando las muestras son demasiados jóvenes

2.-Un procedimiento más conveniente y más usado es dar un tiempo de ataque químico más largo tal que las trazas sean suficientemente grandes para ser identificadas, pero suficientemente pequeñas para que ellas no se superpongan, y contar sólo las elipsoidales

Para el cálculo es necesario examinar las superficies internas del material en vez de la externa la cual ha estado expuesta al medio.

Es frecuente encontrar en los vidrios pequeñas burbujas que si no se tiene cuidado pueden ser contabilizadas como trazas. Para poder descartar esta posibilidad es necesario tener en cuenta que cuando éstas son observadas por luz reflejada, aparecen como zonas brillantes en contraste con las trazas, las cuales son brillantes en su centro y oscuras a su alrededor .

Cuando se realiza el conteo de las trazas bajo uno de los dos criterios, habrá un porcentaje de ellas que no se cuenten o que pasen inadvertidas, a pesar que han sido revelados por el agente químico, Dicho porcentaje se debe a que algunas aparecen pequeñas, debido a que el etching sólo ha alcanzado una pequeña porción o sólo el inicio de la traza y otras aparecen grandes confundiéndose con las burbujas o defectos del material, debido a que el grabado, en este caso, ha disuelto gran parte de la traza presentando sólo su extremo final.

Por lo que es importante usar el mismo procedimiento para encontrar las huellas fósiles e inducidas, ya que la edad depende

de la razón de sus densidades.

El conteo de las trazas puede realizarse convenientemente con aumentos de 300X ha 600X y con un microscopio que cuente con una rejilla reticular de área conocida.

Como la superficie del vidrio es seccionalmente plana, debemos observar tales superficies corriendo el plano focal hacia arriba ó hacia abajo para que cada campo visual pueda establecer si los hoyos presentés son trazas o no

Por lo menos, se necesitan contar unas 400 trazas por cada muestra para obtenér una estadística adecuada, aunque para algunas muestras de baja densidad esto no es práctico.

Además, si se encuentra una traza dentro de una segunda huella, ésta no debe de ser contada, puesto que no hubiera sido revelado en ausencia de la primera. Por el contrario, si se encuentran dos trazas que se solapan, éstas deberán ser contabilizadas ya que ambas se encontraban en el mismo plano antes de ser reveladas

### III.5.3.2 IRRADIACION DE LAS MUESTRAS

Para la irradiación de la muestra por lo general se incluyen dosímetros (detectores de trazas) cuyo posterior revelado y conteo de sus trazas nos da un valor de  $\phi$ .

Las condiciones normales del revelado del detector, depende del tipo de material del cual esta hecho. Por ejemplo en el caso de

detectores de vidrio, tenemos el vidrio Soda-Lime, él cual requiere 5 seg cuando es tratado con HF al 48% y una temperatura de 23°C. En cuanto a su eficiencia de revelado se ha encontrado que cambia de 0.53 a 0.43 cuando el agente químico es cambiado de 10w/0 HF hasta 49w/0HF.

La elección de la dosis está gobernado por la necesidad de tener una densidad de trazas inducidas mucho mayor que las fósiles es decir:

$$\rho_s + \rho_i \gg \rho_s$$

de tal forma que el valor de  $\rho_i = [(\rho_s + \rho_i) - \rho_s]$  puede ser deducido sin mayores errores estadísticos. Si, por ejemplo, deseamos que  $\rho_i$  sea al menos 10 veces mayor que  $\rho_s$ , de lá ecuación de edad tenemos que :

$$T = \frac{I \sigma \rho_s \phi}{\lambda \rho_i} \quad (\text{III.29})$$

De donde :

$$\phi > \left( \frac{\rho_i}{\rho_s} \right) \left( \frac{\lambda}{I \sigma} \right) T \quad (\text{III.30})$$

Reemplazando el valor de las constantes tenemos:

$$\phi > (1/6) 10^9 T \quad (\text{III.31})$$

Si la edad de la muestra es del orden de  $10^6$  años entonces el flujo deberá de ser al menos  $1.6 \cdot 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>[20]. Es por lo tanto útil saber el orden de la edad que se va a tratar para decidir que flujo de neutrones se va a utilizar.



Otro punto importante que se debe saber, es el de usar una fuente de neutrones térmicos para inducir fisiones en el U-235, pues los neutrones rápidos producirían las fisiones del U-238 y Th-232, Pero si el flujo de neutrones contiene también neutrones rápidos es necesario reemplazar en la ecuación de edad el valor de  $\sigma C^{235}$  por el valor más real de :

$\sigma_{235}C^{235} + \sigma_{238}C^{238} + \sigma_{232}C^{232}$  ( $\sigma_i C^u$ , son la concentración y sección eficaz) entonces esta constante deberá variar con la razón de Th/U y la razón de neutrones rápidos a neutrones térmicos ( $n_{\text{rapido}}/n_{\text{termico}}$ ) en el reactor.

Este problema puede ser abordado realizando diferentes irradiaciones bajo Cadmio[21] ó usando exclusivamente un lugar en el reactor donde, las fisiones inducidas por los neutrones rápidos sean despreciables. Además la sección transversal  $\sigma_{235}$  para las fisiones por neutrones térmicos es cientos de veces más grande que el de las fisiones rápidas del  $U^{238}$  o  $Th^{232}$

Las razones de térmicos a rápidos mayores que 20/1, normalmente, aseguran que los errores obtenidos en el cálculo de la edad sean menores que los errores estadísticos y sistemáticos.

La excepción ocurre cuando el thorium es relativamente más abundante que el uranio, en proporciones de 3.6/1 a 4/1.

Esto ocurre particularmente con el zircon, de quien se sabe tiene grandes variaciones en el contenido de uranio y Th (Th/U), por lo que se requiere un especial cuidado cuando se realiza su datación

## IV

### TRABAJO EXPERIMENTAL

OBTENCION DE LOS PARAMETROS DE TIEMPO DE ATAQUE QUIMICO  
CONCENTRACION DEL ACIDO FLUORHIDRICO (HF) Y TEMPERATURA DE  
REACCION:

Para la obtención de los parámetros, se trabajó con la muestra #1 Rajchi del Cuzco. Nuestro propósito era averiguar el comportamiento de una obsidiana típica frente a la concentración del ácido HF y el tiempo de ataque químico

#### IV.1 MONTAJE DE LA MUESTRA

Para poder manipular bien la muestra es necesario colocarla en portamuestras preparadas con resina epóxica (en moldes preparados con tubos pvc) en proporciones adecuadas de cobalto + peróxido, de tal modo que éstas sean transparentes y permitan la fácil observación de la muestra en el microscopio.

Al inicio las portamuestras eran oscuras, pero ya se ha logrado la transparencia necesaria.

La mezcla de resina +peróxido+ cobalto se vierte en los moldes de tubos pvc donde previamente se han colocado las muestras, inmediatamente después que la resina ha endurecido se desmolda, con cuidado, tratando de no dañarlo. De esta manera la muestra queda lista para la parte de lijado y pulimentado.

#### IV.2. LIJADO DE LA MUESTRA

Colocada la muestra en la resina se procede a lijar su superficie en la pulidora de plato giratorio marca Buehler LDA, con el propósito de eliminar todas la irregularidades de ella, iniciamos el lijado con lija # 400. Esto se realiza sólo hasta que en la superficie no se observa ningún cambio. Luego pasamos a la lija # 600 y, finalmente, a lija # 1200. Debo hacer notar que cada vez que se cambia de lija es necesario lavar La muestra, a fin de que no queden ningún rasgo de la lija utilizada que pudieran dañar la superficie, quedando de esta manera la muestra lista para la parte de pulimentado.

#### IV.3.. PULIMENTADO DE LA MUESTRA:

Para poder realizar un buen trabajo de datación es necesario obtener una superficie de la muestra bastante limpia sin irregularidades y rayaduras que dificulten su posterior revelado químico, es decir un pulimentado a nivel óptico.

Se trabajó con alúminas de 1 y 0.3 micrones (marca Buehler Alpha Micropolish II) cada una con su respectivo paño. Durante el trabajo de pulimentado se presentaron serias dificultades tales como superficies arañadas o resquebrajadas, no lográndose el pulimentado a nivel óptico como se requería. Fue necesario dar más tiempo de pulimentado para cada tipo de abrasivo (aproximadamente 45 minutos), en este paso se perdió abrasivo pero se obtuvieron buenos resultados.

NOTA:No se debe considerar el tiempo de 45 minutos como un parámetro de pulido, pues este depende de la presión que uno

realiza sobre la muestra, la cual puede variar de una a otra persona.

#### IV.4. ATAQUE QUIMICO DE LA MUESTRA (ETCHING):

Una vez que se obtuvieron superficies ópticamente pulidas, nuestro siguiente propósito fue obtener los parámetros de tiempo de ataque químico y concentración del ácido fluorhídrico HF importantes para el buen revelado de las trazas

Se preparan distintas concentraciones de HF al 25%, 30%, 35%, 40% en peso, la muestra es introducida en el ácido ya preparado durante tiempos que van desde 20 hasta 140 segundos en intervalos de 10 seg. Inmediatamente después que la muestra es atacada, ésta es lavada en un agente neutralizante a fin de cortar el poder corrosivo del ácido y, posteriormente, colocada en un flujo de agua para limpiar el ácido residual que pudiese quedar en la muestra.

Con la muestra ya lavada se procede a realizar la observación en el microscopio óptico (marca Ortholux II Leitz Wetzlar Germany) con objetivos de 50X y 10X, oculares de 25X, y con la ayuda de un reticulado ocular.

En esta parte se toma notas del estado de la superficie y diferenciación de las trazas de las fallas propias del material; realizando finalmente un conteo de las trazas con el fin de obtener su densidad.

El área del reticulado o del campo visual de trabajo en este caso

fue de  $10^{-4} \text{ cm}^2$

Obtenido el dato de la densidad se vuelve a atacar la muestra incrementando el tiempo de ataque químico en 10 seg (Antes de realizar el siguiente ataque químico es necesario repetir los pasos de pulimentado).

El número de campos que se toman para la obtención de la densidad promedio de trazas es de 500.

Los datos obtenidos se presentan en la tabla IV.1

La temperatura en todo momento fue de  $22.5^{\circ}\text{C}$

Para la obtención de los errores en la densidad promedio consúltese al apéndice D

Las gráfica correspondientes a la densidad de trazas encontradas como función de la concentración del ácido fluorhídrico y el tiempo de ataque químico se presentan en la figura IV.1

#### IV.5 CARACTERISTICAS OBTENIDAS DE LAS GRAFICAS:

1. Cuando la concentración del ácido es baja el crecimiento del valor de la densidad de la muestra se incrementa hasta alcanzar un valor (densidad de saturación) en donde se mantiene estable aun cuando se incremente el tiempo de ataque químico.

2. Cuando la concentración del ácido es relativamente alta la zona de saturación se alcanza más rápidamente, pero el incremento de la densidad indica que se están contando también impurezas como trazas, esto producirá un error en el cálculo de la densidad de trazas.

3. Cada curva tiene su zona de trabajo, definida como la zona, donde la revelación de las trazas permite distinguir fácilmente una traza de una falla del material (el tamaño de las trazas juega un papel importante en la elección de esta zona, pues un tamaño apropiado de las trazas nos permite diferenciarlas fácilmente de las fallas o irregularidades del material).

4. Mientras más se incrementa la concentración del ácido, la zona de trabajo disminuye, tornándose crítico la elección del tiempo de ataque químico .

5.- La zona de trabajo es:

para  $c = 25$ , el tiempo de ataque esta entre 50 y 100 seg;

para  $c = 30$ , el tiempo de ataque esta entre 60 y 100 seg;

para  $c = 35$ , el tiempo de ataque esta entre 40 y 70 seg;

para  $c = 45$ , el tiempo de ataque esta entre 20 y 30 seg.

DATAACION DE LA OBSIDIANA

Obtenido los parámetros de trabajo para una obsidiana típica, nuestro siguiente propósito es encontrar la edad de las muestras de obsidiana para lo cual escogimos los siguientes parámetro

CONCENTRACION DEL HF (%)	TIEMPO DE ATAQUE (SEG)
35	60

El procedimiento de montaje, lijado y pulimentado es el mismo que se explicó anteriormente.

En este caso, las muestras ya irradiadas fueron colocados juntas con las no irradiadas en un mismo portamuestra con el fin que los pasos de lijado pulimentado y ataque químico sean las mismas para ambas muestras.

#### MEDIDAS DE LOS DIAMETROS:

Para la obtención promedio de las trazas fósiles e inducidas se utilizó un ocular micrométrico

Esta medida fue necesaria para poder saber si las trazas han sufrido una disminución en su tamaño, lo cual nos indicaría si es necesario hacer una corrección de la edad.

El método utilizado para la obtención de la densidad promedio es el "METODO POBLACIONAL" Obteniendo en un caso la densidad de huellas fósiles mas inducidas (muestra irradiada) y en el otro caso la densidad de huellas fósiles, para finalmente obtener por sustracción la densidad de huellas fósiles.

Los datos obtenidos en cada uno de los tres casos se presentan en la tabla IV.2

TABLA IV.2

A. NOMBRE DE LA MUESTRA:

MUESTRA #1 AREQUIPA

LUGAR DE DATAACION: LABORATORIO DE DATAACION R2-120

TIPO	CAMPOS	#CUENTAS	CUENTAS/ CAMPO	DENSIDAD traz/cm <sup>2</sup>	DIAMETRO μm
FOSILES	1500	194	0.1293	1293 ± 93	3.245
INDUCIDAS	500	2507	5.104	50140 ±1001	3.892

B. NOMBRE DE LA MUESTRA:

MUESTRA #2 PROCEDENCIA:RAJCHI-CUZCO

LUGAR DE DATAACION: LABORATORIO DE DATAACION R2-120

TIPO	CAMPOS	#CUENTAS	CUENTAS/ CAMPO	DENSIDAD traz/cm <sup>2</sup>	DIAMETRO μm
FOSILES	1500	317	0.2113	2113 ± 121	5.85
INDUCIDAS	500	2761	5.522	55220 ±1071	6.22

C. NOMBRE DE LA MUESTRA:

MUESTRA #3 PROCEDENCIA:BATAN ORQUIO-CUZCO

LUGAR DE DATAACION: LABORATORIO DE DATAACION R2-120

TIPO	CAMPOS	#CUENTAS	CUENTAS/ CAMPO	DENSIDAD traz/cm <sup>2</sup>	DIAMETRO μm
FOSILES	1500	243	0.162	1620 ± 107	
INDUCIDAS	500	2945	5.89	58900 ±1085	5.90



FLUJO DE NEUTRONES (neutr/cm <sup>2</sup> )	0.77 ± 0.002 10 <sup>15</sup>
--	-------------------------------

haciendo uso de la ecuación de la edad y de la constante de decaimiento del uranio 238 obtenemos las edades de la muestra, tal como se indica en la tabla IV.3

TABLA IV.3

A Edad hallada por el método de huellas de fisión de las muestras de Arequipa, Rajchi y Batan Orquío (DF, DI: densidad de trazas fosiles e inducidas; R.DIAM: relación de diámetros)

NOMBRE DE LA MUESTRA	DF tr/cm <sup>2</sup>	D.I tr/cm <sup>2</sup>	F CORREL.	R.DIAM.	EDAD X 10 <sup>6</sup> AÑOS
AREQUIPA	1293	50140	0.998	0.83	1.22 ± 0.07
RAJCHI	2113	55220	0.998	0.94	1.84 ± 0.08
BATAN ORQUIO	1620	58900	0.997	-----	1.30 ± 0.07

B Edad calculada por el método de huellas de fisión en el instituto Dolomieu Grenoble Francia de la muestra procedente de Arequipa

NOMBRE DE LA MUESTRA	RAZON DE DIAMETROS	EDAD X 10 <sup>6</sup> AÑOS
AREQUIPA	0.81	1.34

En el caso de la muestra #1 se a agregado la datacion obtenida en el instituto Dolomieu-Grenoble Francia como una manera de comparar nuestros resultados

#### CONCLUSIONES:

Se puede observar que el resultado obtenido con la muestra #1 (arequipa) concuerda bastante bien con el hallado en los Laboratorio de Francia , esto indica pues la eficacia y

reproducibilidad del método y la confiabilidad de las edades encontradas en las muestras 2 y 3.

Como una manera de ver que tan confiables son nuestros resultados, se procedió a datar una muestra cedida por el Dr Gerard Poupeau (Arci 4/81) obteniéndose los resultados que se indican en la tabla IV.4

**TABLAIV.4**

A En la tabla se indica los valores hallados en la densidad de huellas fosiles e inducidas, para la muestra ARCI 4/81

LUGAR DE DATAACION: LABORATORIO DE DATAACION DE LA FACULTAD DE CIENCIAS R2-120

TIPO	CAMPOS	#CUENTAS	CUENTAS/ CAMPO	DENSIDAD	DIAMETRO
FOSILES	701	351	0.500	5007 ± 287	
INDUCIDAS	400	2163	5.4075	54075 +1097	

FLUJO DE NEUTRONES (NEUTR/CM2) X 10 <sup>15</sup>	4.458 ± 0.025
--	---------------

haciendo uso de la ecuación de la edad y de la constante de decaimiento del uranio 238 obtenemos:

EDAD DE LA MUESTRA X 10 <sup>6</sup>	2.73 ± 0.11
---	-------------

CORRELACION	0.89
-------------	------

B En la tabla se indica los valores de la densidad de huellas fosiles e inducidas asi como la edad, halladas en los laboratorios del Instituto Dolomieu Grenoble Francia, de la muestra Arci.

ARCI 4/81

LUGAR DE DATAACION: GRENoble FRANCIA

TIPO	CAMPOS	#CUENTAS	CUENTAS/ CAMPO	DENSIDAD	DIAMETRO
FOSILES	700	408	.....	4410	.....
INDUCIDAS	400	2410	.....	45560	.....

FLUJO DE NEUTRONES (NEUTR/CM2) X 10 <sup>15</sup>	4.458 ± 0.025
--	---------------

haciendo uso de la ecuación de la edad y de la constante de decaimiento del uranio 238 obtenemos:

EDAD DE LA MUESTRA X 10 <sup>6</sup>	2.55 ± 0.20
---	-------------

LA MUESTRA FUE IRRADIADA EN EL CENTRO NUCLEAR DE HUARANGAL RACSO

Estos resultados confirman una vez mas la confiabilidad de nuestro trabajo.

El método de datación por huellas de fisión nos permite de esta manera poder calcular edades de muestras de tipos arqueológicos tales como cabezas de flechas o de tipo geológicos que son de gran utilidad en el estudio de eventos geológicos ; Es así que este método que es de gran utilidad para el geólogo como el arqueólogo puede ser utilizado en el país con grandes perspectivas.

## OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

-No debe considerarse los parámetros de tiempo de ataque químico y concentración del ácido Fluorhídrico encontrados como condiciones fijas para el revelado de las obsidianas pues estas pueden variar, y dependen de su composición química.

- Cuando se trabaja con vidrios volcanicos es necesario escoger aquellas muestras que sean transparentes, para facilitar la identificación de la huellas. En el caso que no se tenga una muestra suficientemente transparente es necesario fraccionar las muestra y escoger las que tienen espesores pequeños.

Así mismo los portamuestras deben de ser transparentes .

-Cuando las muestras tienen inclusiones que no permiten una fácil identificación de las huellas, se recomienda trabajar primero con las muestras irradiadas con la finalidad de hacer una buena identificación de sus características, es decir, tamaño y forma, para luego hacer una buena discriminación de las huellas en la muestra no irradiada.

-Si el diámetro promedio de una huella fósil, es mucho menor que el tamaño de una huella inducida es necesario aplicar uno de los métodos de corrección de edad, pues una disminución del diámetro, significa una disminución en la densidad de huellas fósiles.

En nuestro caso esto no fue necesario pues, el diámetro de las fósiles no difería mucho de las inducidas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Gerard Poupeau y Enio Soliani, Algunos ejemplos de utilizacion de las trazas nucleares en la geologia.CBPF-NF\_041/88.
- [2].Guido Bonfiglioli, Electron microscope investigation on the nature of tracks of fission products in Mica; Journal of applied physics,32 1961, pp 2499 - 2503.
- [3].R.L.Fleischer and P.B. Price; Science 140, 1221, 1963.
- [4].R.L. Fleischer, P.P. Price and R.M. Walker Journal of Applied Physics, vol 36, II (1965), 3645 - 3652.
- [5].Modin, Modin , Optical Methallography
- [6].C.W.Naeser; N.S.Briggs Us Geological Survey Geochronology of Quaternary tepphra deposits.
- [7] Annual Review of nuclear science vol 21 1971.
- [8]. Bernd Eberhard fischer, Reimar sphor. Production and use of nuclear tracks; Imprinting structure on solids.
- [9].Yu.M. Shirokov y N.P. Yudin, Nuclear Physics Vol. 1, MIR Publisher Moscu, 1982.
- [10]. R.L. Fleischer, Advances in fission tracks dating, General Electrics (1974).
- [11].P.F. Green, On the cause of the shortening spontaneus fission tracks in certains minerals; Nuclear tracks Vol 4; pp 91 - 100.
- [12].Radiation effects vol 15, pp 273 - 274.

- [13].N.B.S Special publication, standart reference material  
calibrate glass standars for fission tracks use
- [14]. M.G. Seitz; R.M. Waler and B.S. Carpenter; Geophysical  
laboratory, Journal of applied physics, vol 44, 1, january  
1973 pp: 10 - 512
- [15].S.A,. Durani and R.K. Bull principles methods and  
aplication; Pergamon press 1987. Solid stated nuclear tracks  
detection.
- [16].Calk and Naeser, 1973, Price et al ;1973.
- [17]C.W. Naeser and H faull (1969) Fission tracks annealing in  
apatite and sphene. j. Geophys. res. 74; 705 - 710.
- [18].Storzer,D. And Poupeau G.; 1973, C.R. Acad sc. Paris; 276,  
series D: pp 137 - 139.
- [19] C.W. Naeser, Noye M. Johnson y Victor E. Mc Gee  
Fourth international conference, geochronology,  
cosmochronology, isotope geology 1978,pp 303-304.