

30  
29



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"FECHAMIENTO DE LA APATITA DEL CERRO DE MERCADO Y CALIBRACION DEL METODO DE HUELLAS DE FISION"

T E S I S  
PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO GEOLOGO  
P R E S E N T A N :  
ANGEL VALERO REYES  
ALEJANDRO TREVIÑO MONTEMAYOR



MEXICO, D. F.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN 1990



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## INDICE

Resumen	( 3 )
I. Introducción.	( 5 )
Objetivo.	( 6 )
II. Historia y generalidades.	( 7 )
III. Fundamentos del método.	( 10 )
Formación de la traza.	( 10 )
IV. Ecuación de la edad.	( 13 )
Problema en el cálculo de la constante de decaimiento por fisión ( $\lambda_f$ ) y el uso de estándares.	( 17 )
V. Grabado y borrado de trazas.	( 21 )
a) Grabado.	( 21 )
Geometría de la traza grabada.	( 21 )
Eficiencia de grabado y ángulo crítico.	( 23 )
b) Borrado.	( 24 )
Concepto de temperatura de cierre.	( 24 )
Estabilidad de la traza.	( 25 )
Efecto de la temperatura sobre la traza.	( 25 )
Variación del comportamiento de trazas fosiles e inducidas en función de la temperatura.	( 27 )
VI. Preparación de las muestras.	( 29 )
a) Corte.	( 29 )
b) Montaje.	( 29 )
c) Pulido.	( 30 )
d) Grabado.	( 31 )
VII. Calibración de la fuente de $\text{Cr}^{252}$ .	( 32 )
VIII. Estadística y Cuento.	( 34 )
IX. Irradiación.	( 36 )
A. Características geológicas de la localidad del Cerro de Mercado.	( 37 )
a) Marco geológico regional.	( 37 )
Complejo Volcánico Inferior (CVI)	( 37 )
Complejo Volcánico Superior (CVS)	( 38 )

b) Descripción de la Localidad del Cerro de Mercado.	( 39 )
1) Estratigrafía.	( 40 )
2) Mineralogía.	( 41 )
3) Génesis del yacimiento.	( 42 )
c) Evolución Tectónica de la zona.	( 43 )
XI. Discusión de Resultados.	( 45 )
a) Procedimiento de trabajo.	( 45 )
b) Método del Detector Externo.	( 45 )
1. Corte.	( 45 )
2. Montaje y pulido.	( 46 )
3. Grabado.	( 46 )
Resultados obtenidos.	( 46 )
c) Método poblacional.	( 47 )
Resultados obtenidos.	( 48 )
d) Método de la población-substracción.	( 48 )
Resultados obtenidos.	( 49 )
e) Coteo de trazas y estadística.	( 49 )
f) Discusión.	( 50 )
XII. Conclusiones y Recomendaciones.	( 52 )
a) Conclusiones.	( 52 )
b) Recomendaciones.	( 54 )
Bibliografía.	

## RESUMEN

La fisión del uranio-238 contenido naturalmente en los minerales y vidrios, provoca un daño en la red cristalina y estructura de los mismos que se denomina trazas latentes de fisión. La producción de fisión espontánea ocurre a una tasa fija y si medimos el número de fisiones espontáneas y el contenido de uranio, entonces estas trazas se pueden utilizar como reloj geológico.

En el proceso de la elaboración de este trabajo se irradiaron en el reactor nuclear del ININ en Salazar, México, muestras de mineral. Para producir en ellos fisiones del U-235, produciéndose trazas de fisión inducidas. El número de trazas inducidas producidas dependerá de la cantidad de U-235 que está contenido en la muestra, y como la relación de U-238 / U-235 es constante en la naturaleza, la cantidad de uranio se determina directamente. Obteniendo la densidad de trazas espontáneas e inducidas ( $p_s$  y  $p_i$ ) así como el flujo de neutrones ( $\phi$ ) es posible obtener la edad de una gran cantidad de materiales geológicos.

Ya que la fluencia de neutrones es una variable importante que se requiere conocer con exactitud, se irradió un estándar de apatita de la Toba Fish Canyon (Colorado E.U.) cuya edad (28 m. a. K-Ar y trazas de fisión), y contenido de uranio está bien determinado (Naeser et. al., 1981).

Con estos parámetros conocidos, la fluencia de neutrones se obtiene de la ecuación de la edad.

Debido a la diversidad de valores obtenidos experimentalmente de la constante de fisión del uranio (Bigazzi, 1981), y a la incertidumbre que trae consigo escoger un valor de la misma, se prefiere trabajar con estándares de edad y concentraciones de uranio conocidas, con las cuales se determina con mayor precisión el flujo de neutrones térmicos del reactor. Para que un mineral sea considerado como estándar, es necesario que su edad muestre concordancia con fechas obtenidas por otros métodos.

Estándares de apatita, zircón y esfena utilizados comúnmente en Norteamérica, provienen de la toba mencionada con anterioridad, para determinar el número de trazas inducidas, fue necesario utilizar

detectores externos de mica. lo cual permitió conocer los valores precisos de las trazas inducidas.

La apatita del Cerro de Mercado, cuya edad de huellas de fisión reportada anteriormente (Naeser et. al., 1975) es de 30 m.a. y concordante con fechas de K-Ar, se utilizó para calibrar el método. Cristales de esta apatita fueron pulverizados hasta obtener un tamaño uniforme (entre 250 y 75  $\mu$ ), la edad que se obtuvo con el método de la población-substracción fue de 30 m.a.

Posteriormente se realizaron cortes en apatita variando el ángulo de corte respecto al eje cristalográfico "c". los resultados obtenidos indican que existe una variación en las densidades de trazas fósiles e inducidas dependiendo de la orientación de las superficies, esto se debe probablemente a la anisotropía de grabado con respecto al arreglo cristalino de éstas, lo cual se refleja en una variación de edades relativas obtenidas en cada una de ellas.

La muestra se irradió en el reactor Triga Mark del ININ por un tiempo de 110 seg. El flujo de neutrones obtenido produce fechas compatibles en muestras cuyas edades habían sido previamente reportadas por el mismo método.

Es importante hacer notar que los conteos de trazas (fósiles e inducidas) no se llevaron a cabo en las mismas áreas como lo establece el método del detector externo, lo anterior significa que en otras condiciones se acarrearía una fuente de error, sin embargo, el hecho de que la apatita del Cerro de Mercado tenga una extraordinaria homogeneidad en el contenido de uranio permitió considerar correctas las edades obtenidas por el método del detector externo.

## I. INTRODUCCION

En general los métodos isotópicos de fechamiento son significativamente recientes, pues su uso tiene apenas unas decenas de años. Dentro de este campo de investigación, el método de fechamiento por trazas de fisión es de los más recientes, su nacimiento data de apenas 30 años.

La importancia de establecer las bases del fechamiento por trazas de fisión en México, radica en las ventajas y aplicaciones del método. Las más sobresalientes son el hecho de que la técnica es de fácil aplicación y su bajo costo. Otras características que presenta son un rango de aplicación bastante amplio (desde unos miles de años hasta edades del Sistema Solar), su utilización en una gran cantidad de sustancias entre cristales y vidrios entre los que podemos contar más de 50 diferentes materiales. Recientemente se ha utilizado este método para determinar historias térmicas en cuencas sedimentarias, yacimientos minerales y otros ambientes geológicos.

En el presente trabajo se desarrollan de una manera muy breve las bases de la técnica, el modo de empleo del método, además de las ventajas y desventajas del mismo. Se reporta además la calibración del método utilizando para esto la apatita del Cerro de Mercado cuya edad de 30 m.a. había sido obtenida anteriormente utilizando los métodos de  $^{147}\text{Sm}$  y de trazas de fisión.

Se escogió la apatita del Cerro de Mercado para calibrar el método y poder desarrollar estándares propios, con los cuales calibrar fechamientos posteriores.

El fechamiento de la apatita del Cerro de Mercado con esta técnica, es un primer paso en el largo aprendizaje que hay por delante sobre el método de fechamiento por trazas de fisión.



## OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fue calibrar el método de fechado por trazas de fisión utilizando estándares minerales de edad conocida, y así desarrollar un estándar propio para efectuar fechamientos posteriores.

En el procedimiento correcto para realizar la calibración se deben utilizar tanto estándares minerales como vidrios estándares cuyo contenido de uranio es bien conocido y con los cuales se determina un parámetro conocido como  $\lambda$ . sin embargo, en el presente trabajo sólo se utilizaron estándares minerales pues en el momento de realizar el mismo, en el laboratorio sólo se contaba con éstos.

## II. HISTORIA Y GENERALIDADES

Los antiguos griegos postularon la existencia de una partícula tan pequeña que no podía ser dividida en partes menores a ésta. En 1803 Dalton propuso que la última división de la materia era el átomo.

Las investigaciones posteriores provocaron una afanosa búsqueda de la forma de dividir el átomo y así conocer su composición y estructura. En 1897 J.J. Thompson demostró la existencia del electrón. Más tarde se conoció el protón y en 1932 se encontró el neutrón.

Por otra parte, en 1895 Roentgen descubre los rayos X y en 1896. Henry Becquerel y los esposos Curie descubren la radiactividad.

En 1938 dos famosos químicos: Otto Hahn y Fritz Strassman bombardearon uranio con neutrones térmicos y encontraron que se producía bario en este proceso. Esto se comunicó a Niels Bohr quien a su vez lo discutió con Albert Einstein en 1939 llegando ambos a la conclusión de que el uranio se había dividido en dos o más fragmentos. Aquí nació la era de la producción de energía por el control de la fisión del uranio.

Bohr y Wheeler supusieron que el núcleo puede alcanzar un tamaño crítico dependiendo del parámetro  $Z^2/A$  (siendo  $Z$  el número atómico y  $A$  la masa atómica del átomo), cuando la fuerza de repulsión electrostática sea mucho mayor que la fuerza superficial que mantiene unido el núcleo. Cuando el tamaño crítico es alcanzado el núcleo es susceptible de fisionarse espontáneamente. El tamaño crítico es alcanzado por un núcleo cuando tiene un número atómico cercano a 100. Como resultado de la fisión del uranio se producen principalmente dos fragmentos de fisión que varían desde  $^{30}\text{Zn}$  hasta  $^{65}\text{Tb}$  (Faura, 1977)

En cada evento de fisión se emiten partículas  $\alpha$ , neutrones y fragmentos ligeros acompañados con la emisión de una gran cantidad de energía cercana a los 200 MeV. Si se compara esta liberación de energía con la liberada en el decaimiento del  $^{40}\text{K}$  a  $^{40}\text{Ar}$  (que ocurre con la captura de un electrón por el núcleo) que es de aproximadamente 1.51 MeV, se nota la enorme diferencia que existe entre ambas (MacDougall, 1976).

A diferencia de los otros métodos radiométricos, en el método de trazas de fisión no se mide el producto de la radiación, sino el efecto de

esta. Para hacer un fechado por  $^{40}\text{Ar}$  se necesita aproximadamente un y diezmilionesima de  $\text{cm}^3$  de  $^{40}\text{Ar}$  (MacDougall, op.cit.), esto equivale al decaimiento de aproximadamente 3 billones de átomos, en cambio, en el fechado por trazas de fisión cada traza equivale a la fisión de un átomo de uranio.

Los átomos resultantes de la fisión presentan un amplio espectro del número atómico. Estos productos tienen exceso de neutrones, son radiactivos y algunos de ellos decaen por emisión  $\beta^-$ .

Las trazas de fisión fueron descubiertas en la década de los 50's por Sill y Barnes (1959) cuando expusieron micas a los iones producidos por la fisión de elementos pesados (Price et al. 1962).

Cuando iones positivos viajan a través de un dieléctrico sólido dejan un daño, resultado de la transferencia de energía de la partícula a los átomos del medio.

En 1957 Sill y Barnes fueron los primeros en observar con un microscopio electrónico que existían trazas latentes (de aproximadamente de 100 anstroms de diámetro) en una red cristalina de mica. Posteriormente Price y Walker (1962) descubrieron que estas trazas se podían observar con el microscopio óptico cuando se sometía la muestra a un ataque químico que hacía que la traza creciera hasta alcanzar algunas micras de longitud y diámetro.

Price y Walker (1962), encontraron que las trazas eran el producto de la fisión espontánea del  $\text{U}^{238}$  contenido en los minerales y propusieron que se podía obtener una fórmula para determinar la edad de las micas.

En 1964 Fleischer y Price dataron las primeras Tectitas teniendo edades concordantes con edades K-Ar.

Ahora es común hacer dataciones con este método en una gran cantidad de minerales y vidrios con aplicaciones en una gran variedad de problemas en ciencias como la Geología, la Arqueología y en las Ciencias del Espacio entre otras.

Las trazas son estables por debajo de una cierta temperatura, lo que implica que las edades obtenidas significan el lapso transcurrido desde la vez que la muestra pasó por esta temperatura. Estas edades se denominan de enfriamiento y son importantes para el estudio de

historias técnicas. Adicionalmente es importante señalar que cada mineral tiene diferente temperatura de borrado parcial de trazas.

### III. FUNDAMENTOS DEL METODO

#### FORMACION DE LA TRAZA

Quando un fragmento de fisión pasa a través de un sólido dieléctrico, deja un daño en el material al que se conoce como traza de fisión.

Durante el recorrido a través de este sólido, el fragmento de fisión ioniza el medio por donde pasa, dislocando la red cristalina de electrones de los átomos que conforman al medio.

Existen varias teorías y modelos para explicar la formación de las trazas de fisión. (Iurani et.al. 1987).

Sin embargo, el modelo más aceptado por los investigadores es el llamado "Ion-explosion track model" (Fleischer et al 1965).

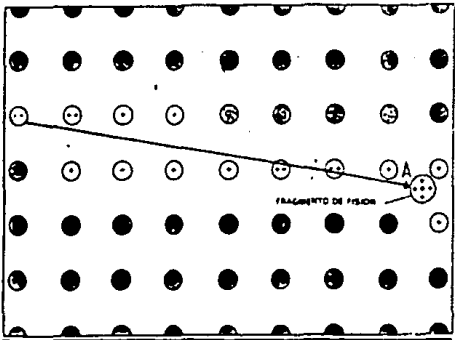
Los dos principales fragmentos de fisión, tienen aproximadamente la misma masa y carga por lo que se repelen en dirección directamente opuesta. Estos fragmentos viajan a través del sólido dejando una zona ionizada positivamente (Figura 1).

Durante el paso a través del sólido, el átomo va cediendo y aceptando electrones del medio, por lo que su carga  $Z$  no se puede precisar con certeza y por lo tanto el átomo adquiere una  $Z$  "efectiva" que no es otra cosa que el promedio de electrones que conserve durante su recorrido. La  $Z$  efectiva de los fragmentos de fisión es de aproximadamente  $2U e^-$  (Baicazar, com.personal).

Quando el ión pasa por el punto A (Fig. 1), éste tiene la misma velocidad que la de los electrones en órbita, por lo que el ión captura a éstos conforme pasa y reduce su carga, es decir, se neutraliza hasta llegar al reposo. Como se reduce la carga, existe menor interacción con el medio e implica menor pérdida de energía.

El alcance de los fragmentos de fisión depende de varios factores de los cuales los principales son: la carga del ión y la densidad de los átomos que forman al medio (estructura cristalina), es decir, a mayor  $Z$  existe menor alcance del ión pues la interacción con el medio es mayor y viceversa.

La ionización de los átomos del medio provoca una repulsión electromagnética entre ellos. Este defecto en la estructura del sólido constituye el daño o traza de fisión.



FORMACION  
DE LA  
TRAZA

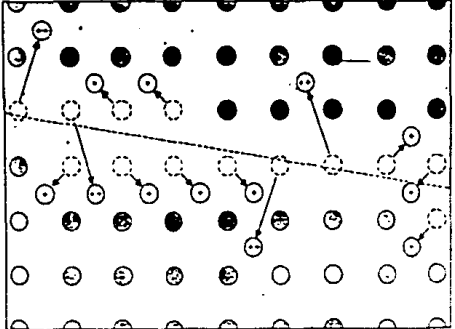
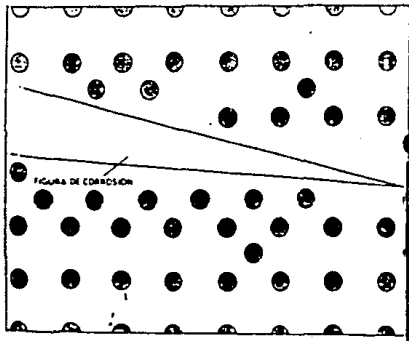


Figura (1).

LA FORMACION DE HUELLAS se muestra empíricamente, según el modelo propuesto por Robert L. Fleckner, P. Bedford Pridon y Robert M. Walker. Uno de los dos fragmentos ionizados positivamente (arriba), producido por la fisión de un átomo de U-235, pasa a través de un retículo cristalino idealizado; rompe la red, libera electrones de los átomos que encuentra en su camino, ionizando así a los átomos. Luego (abajo), los átomos ionizados del retículo se desplazan, alterando la estructura del mismo. Cuando el retículo se expone a un agente (abajo), la fracción alterada del retículo es más susceptible al ácido que la porción no alterada. Solo las esmeraldas sintéticas registran las huellas de la fisión; los electrones libres de los materiales no aislados devuelven la neutralidad eléctrica a los átomos momentáneamente ionizados, antes de que pueda registrarse la alteración del retículo cristalino.



<b>U N A M</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
TREVINO y VALERO '90	

La traza es estable en dieléctricos. En medios conductores y semiconductores no se llega a formar trazas pues existe una gran cantidad de electrones libres que rápidamente neutralizan la ionización producida.

Cada traza de fisión es la imagen de una fisión de uranio en el tiempo geológico. Existen diferentes fuentes naturales de trazas de fisión (Price et al 1962a):

1) trazas producidas por la fisión espontánea del  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{244}\text{Pu}$ .

2) trazas producidas por Retroceso  $\alpha$  en :  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  y  $^{235}\text{U}$  (Fleischer, et.al. 1975 ).

De estas, las partículas  $\alpha$ , no tienen la suficiente masa y energía para crear trazas en minerales naturales (Fleischer, op. cit. ), y las trazas producidas por el  $^{244}\text{Pu}$  sólo son observables en muestras cuya edad sea mayor a  $4.6 \times 10^9$  años (Durrani et al 1987 ), es decir, todo el Pu ha decaído en la actualidad y sólo se reconocen trazas producto de la fisión del  $^{244}\text{Pu}$  en meteoritos, cuya edad es mucho mayor a la edad de la Tierra.

Por lo anterior se concluye que sólo tres isótopos se fisionan espontáneamente y son capaces de producir trazas:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ .

De éstos, sólo el  $^{238}\text{U}$  produce un número significativo de fisiones, pues tiene una vida media relativamente corta de  $9.5 \times 10^{15}$  años<sup>-1</sup> (Naeser, 1976 ), y una abundancia significativa en los minerales. Por su parte el  $^{235}\text{U}$  tiene una vida media mucho más corta y su abundancia en la naturaleza y en los minerales es muy pequeña lo que hace que la mayoría de las trazas de fisión sean atribuidas a la fisión del  $^{238}\text{U}$ .

Otra fuente de trazas de fisión son los rayos cósmicos, sin embargo, en materiales terrestres no existen trazas producidas por éstos pues la atmósfera absorbe la mayor parte de los mismos y la mayoría son desviados por el campo magnético terrestre y sólo tienen interacción con materiales extraterrestres como los meteoritos y rocas lunares (Durrani et.al., 1987.). La traza formada tiene tan sólo unos cuantos angstroms de diámetro y de 10 a 20 micras de largo por lo que son

visibles unicamente con un microscopio electronico (Vieira y Waijen 1962a ). Para poder observarlas con microscopio optico es necesario agrandar la traza mediante el ataque quimico de un acido : HCl. Este acido ataca las paredes de la traza , la hace crecer hasta poder observarla con aumentos que van de 200 a 500x (Fleischer et. al. 1975).



#### IV. ECUACION DE LA EDAD

Este capítulo se enfoca a exponer de una manera muy breve los principios básicos y fundamentales en los que se apoya la fórmula para determinar una edad por trazas de fisión. La ecuación en la que se basa este método es la ecuación fundamental del decaimiento radiactivo que se utiliza en los otros métodos radiométricos, como Rb-Str, K-Ar y U-Pb por mencionar algunos.

La ecuación de la edad se deduce de la ya conocida ecuación del decaimiento radiactivo.

$$N_a^t = N_a^0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

En donde  $N_a^t$  es el número de átomos hijos presentes en un tiempo  $t$  y  $N_a^0$  es el número de átomos iniciales.

Esta expresión indica el número de átomos presentes en un tiempo  $t$ .

Como se sabe, el método se basa en las concentraciones de U en un cierto mineral o material, actualmente el U natural consiste en 99.2% de  $^{238}\text{U}$  y de 0.7% de  $^{235}\text{U}$  (Strozier y Selig, 1964). Ambos isótopos del U decaen por emisión de partículas  $\alpha$  y por fisión espontánea, cuyas constantes de decaimiento son  $\lambda_\alpha$  y  $\lambda_f$  respectivamente.

El proceso dominante de decaimiento es el de decaimiento  $\alpha$  en razón de 1:1000:000. En el método de trazas de fisión se debe medir la abundancia de decaimientos primarios en la muestra, en este caso el número de fragmentos de fisión o trazas que atraviesan una sección transversal de la muestra; éstos a su vez son proporcionales al número de átomos fisionados.

Se puede arreglar la ecuación (1) de la siguiente manera: se nombra al número de átomos iniciales de  $^{238}\text{U}$  que contiene una muestra por unidad de volumen como  $N_b^0$ , entonces, el número de átomos presentes ( $N_b^t$ ) de  $^{238}\text{U}$  estará dado por:

$$N_b^t = N_b^0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

donde  $\lambda_D$  es la constante total de decaimiento del  $^{238}\text{U}$  (que es prácticamente idéntica a la constante de decaimiento  $\lambda$ ),  $t$  es la edad del cristal.

Por otro lado, el número de átomos  $N_D^t$  que han decaído en un cierto tiempo  $t$  por unidad de volumen es:

$$N_D^0 - N_D^t \text{ así que}$$

$$N_D^t = N_D^0 - N_D^t \quad \text{sustituyendo (2) tenemos}$$

$$N_D^t = N_D^0 \cdot e^{-\lambda_D t} \quad (3)$$

donde la mayor parte de los decaimientos son por emisión  $\alpha$ . La expresión que permite conocer la relación entre fisiones espontáneas y decaimientos por  $\alpha$  se representa como  $\lambda_f / \lambda_D$ , el número de fisiones ocurridas por unidad de volumen  $N_f$  está dado por la siguiente expresión:

$$N_f = \frac{\lambda_f}{\lambda_D} \cdot N_D^0 (e^{\lambda_D t} - 1) \quad (4)$$

La densidad de trazas fósiles es función del número de fisiones ocurridas en un periodo geológico ( $N_f$ ) y de un factor de eficiencia de grabado ( $n$ ), la ecuación que define este parámetro es:

$$\rho z = n \cdot R \cdot N_f \quad (5)$$

en donde  $n$  = eficiencia de grabado.

$R$  = Rango de la traza latente.

De esta forma, si se sustituye (4) en (5):

$$\rho z = \frac{\lambda_f}{\lambda_D} \cdot N_D^0 \cdot n \cdot R \cdot e^{\lambda_D t} - 1 \quad (6)$$

El número de fisiones inducidas en la muestra después de su irradiación con neutrones térmicos del reactor, está dada por ( Balcazar, curso de posgrado: FI UNAM 1980) :

$$N_1 = N_0^1 \sigma F \text{-----(7)}$$

donde  $\sigma$  es la sección transversal de la muestra y  $F$  es el flujo de neutrones.

similáramente la densidad de trazas de fisión inducidas  $p_1$  está relacionada con factores tales como la eficiencia de grabado ( $\eta$ ) , así como el rango ( $k$ ): haciendo intervenir estos en la expresión (7) obtendremos que la densidad de trazas inducidas esta dada por:

$$p_1 = \eta R N_0^1 \sigma F \text{-----(8)}$$

dividiendo (6) entre (8) y suponiendo que tanto  $R$  y  $\eta$  son de igual magnitud para trazas fósiles e inducidas resulta :

$$p_2/p_1 = \left( \frac{\lambda_f}{\sigma F \lambda_D} \right) ( e^{\lambda_D t} - 1 ) \left( \frac{N_0^1}{N_0^1} \right) \text{-----(9)}$$

despejando "t" de (9):

$$t = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left[ \frac{\lambda_D N_D^t \rho_2}{\lambda_I N_I^t \rho_1} + 1 \right] \quad (10)$$

que representa finalmente la ecuación de la edad en función de las trazas de fisión. Ya que la relación  $^{238}\text{U} / ^{235}\text{U}$  es bien conocida en la naturaleza, y se ha observado que es la misma en la mayoría de los materiales terrestres ( $7.26 \times 10^{-8}$ ), se puede reducir con éste la ecuación de la edad (10) de la siguiente manera:

si  $1 = 7.26 \times 10^{-8}$  que representa  $N_D^t / N_I^t$  queda

$$t = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left[ \frac{\lambda_D \rho_2 1 \sigma F}{\rho_1 \lambda_I} + 1 \right] \quad (11)$$

Es de hacerse notar que la ecuación general de la edad, puede simplificarse para muestras que presentan edades mucho menores que la vida media del uranio

esto es cuando  $t \ll 1/\lambda_D$  es decir menores de  $4.5 \times 10^8$  años (Lurrani y Bull 1987)

Ya que  $e^{-\lambda_D t} - 1 = -\lambda_D t$  de esto se obtiene:

$$\rho_2 = \lambda_I N_D^t n R t \text{-----} (12)$$

dividiendo (12) entre (8) y despejando t se tiene

$$t = \left[ \frac{\rho_2 1 \sigma F}{\rho_1 \lambda_I} \right] \quad (13)$$

que representa la ecuación para muestras donde "t" es menor a  $1/\lambda_D$ . La relación  $(1 - \lambda_D / \lambda_D)$  toma los valores de  $6 \times 10^{-8}$  ó  $5 \times 10^{-8}$  dependiendo del valor de la constante de fisión que se use ( $7$  ó  $8.4 \times 10^{-17}$  años<sup>-1</sup>) y un valor de  $5.8 \times 10^{-22}$  cm<sup>2</sup> para la sección transversal ( $\sigma$ ) por lo que la ecuación de la edad queda:

$$t = 6 \text{ ó } 5 \times 10^{-8} (\rho_2 / \rho_1) F \text{ años}$$

### PROBLEMA EN EL CALCULO DE LA CONSTANTE DE DECAIMIENTO POR FISION ( $\lambda_f$ ) Y EL USO DE ESTANDARES.

Existe una gran diversidad de valores obtenidos experimentalmente para la constante de fisión del uranio ( $\lambda_f$ ). Esta constante es componente esencial en el uso de la fórmula de fechamiento por trazas de fisión, por lo que la evaluación de ésta es determinante en el fechado de un mineral.

Se ha evaluado la constante por diversos métodos desde que se descubrió la fisión del uranio, y desde entonces se tienen más de 40 valores de la misma, comprendidos entre  $0.7$  y  $28 \times 10^{-17}$  años<sup>-1</sup>.

Los métodos para obtener el valor de " $\lambda_f$ " son muy variados, siendo los más importantes los que se muestran en la tabla 1.

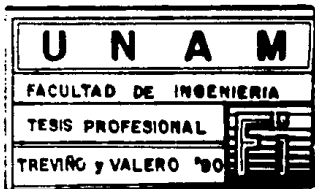
Grupando los valores obtenidos para " $\lambda_f$ " en un diagrama de frecuencia se observa que la distribución de éstos contiene por lo menos dos valores significativos que son  $6.46$  y  $7.05 \times 10^{-17}$  años<sup>-1</sup> (figura 2).

Estos valores eran usados por los geocronólogos regularmente hasta 1970 se notaba, sin embargo, una diferencia en las edades calculadas con ambos valores de por lo menos el veinte por ciento (Bigazzi, 1981).

Para evitar el uso del valor de " $\lambda_f$ ", se prefiere utilizar un método que permite establecer la fórmula de la edad sin considerar implícitamente un valor para  $\lambda_f$ . Este método que se basa en la calibración de un parámetro llamado "zeta" ( $\zeta$ ) se basa en el uso de estándares para medir el flujo de neutrones. De los estándares se conoce el contenido de uranio y/o la edad de los mismos (la edad de ellos

AUTORES	VALOR (años) <sup>-1</sup>	METODO
PLEKOV Y PETRZHAK 1940	$0.7 \pm 7 \cdot 10^{-17}$	CAMARA DE IONIZACION
SPADAYBOCHIA Y BAN 1957	$8.42 \cdot 10^{-17}$	CAMARA CINATOPIA
CERLING ET. AAL. 1959	$1.19 \cdot 10^{-17}$	ANALISIS POR XENON
PLEISCHER Y PRICE 1964	$6.85 \cdot 10^{-17}$	DETECTOR DE MICA
ROBERTS ET. AL. 1968	$7.03 \cdot 10^{-17}$	DETECTOR DE MICA
KHAN Y DURRANI 1973	$6.83 \cdot 10^{-17}$	DETECTOR DE MICA
THIEL Y HERR 1976	$8.57 \cdot 10^{-17}$	T. DE FISION EN VIBRIO

TABLA No. 1 DETERMINACIONES DE LA CONSTANTE DE DECAIMIENTO POR FISION ESPONTANEA DEL U- 238



FRECUENCIA

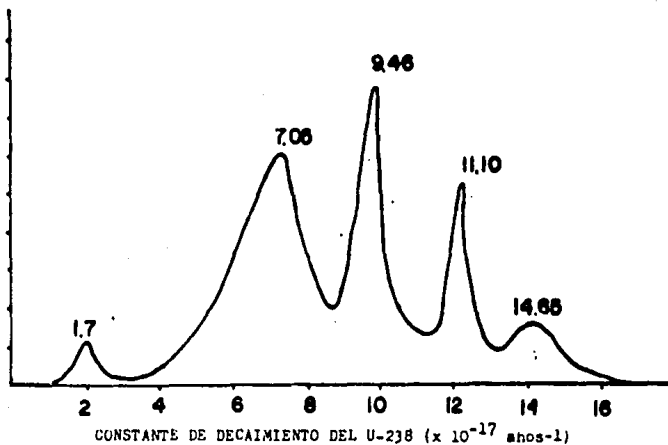


Figura (2). Gráfica en donde se muestra la gran cantidad de valores calculados para la constante de decaimiento por fisión del U-238. Una gran cantidad de éstos tienen diferencias notables, sin embargo, los valores de 7.05 y 9.46 son los más comúnmente utilizados.

(Bigazzi, 1981)

<b>U N A M</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
TREVINO y VALERO '80	

puede determinarse por otros métodos radiométricos y se confirma en varios minerales de la misma roca).

La ecuación que representa la edad del mineral evitando el uso de la constante de fisión se deduce de la siguiente manera:

Se irradian al mismo tiempo con la muestra en estudio uno o varios estándares. éstos por lo general son estándares de apatita de la toba Fish Canyon cuya edad es de 28.5 m.a. y estándares de vidrio cuyo contenido de uranio es bien conocido.

El vidrio estándar sirve para determinar el flujo de neutrones ( $\phi$ ) y eliminar el uso de la constante  $\lambda_f$  en la ecuación de la edad.

La densidad de trazas en el vidrio es directamente proporcional al flujo de neutrones térmicos en el reactor (Balcazar curso de posgrado FI UNAM, 1990 ), de esta manera :

$$P_{LV} = B F \quad (b)$$

en donde  $B = \sigma U^{235} F n$

$n$  = rango de la traza  
latente

$n$  = eficiencia de  
grabado

$P_{LV}$  = Densidad de trazas  
inducidas del vidrio  
estándar.

La ecuación de la edad del estándar es :

$$t_E = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left[ \frac{\lambda_D}{\lambda_f} \frac{D_0}{D_1} (of + 1) \right] \quad (c)$$

despejando  $\lambda_f$  de esta ecuación y sustituyéndola en la del mineral en estudio que es:



$$t_m = \frac{1}{\lambda_D} \operatorname{Ln} \left[ \frac{\lambda_D}{\lambda_f} \frac{\rho_m}{\rho_i} I_0^F + 1 \right] \quad (d)$$

se obtiene :

$$t_m = \frac{1}{\lambda_D} \operatorname{Ln} \left[ \frac{(\rho_m/\rho_i)_m}{(\rho_m/\rho_i)_E} (e^{\lambda_D t} - 1) + 1 \right] \quad (e)$$

De la ecuación (d) usando la ecuación (b) se obtiene :

$$F = \frac{\rho_{iv}}{B} ; \quad t_m = \frac{1}{\lambda_D} \operatorname{Ln} \left[ \frac{\rho_m}{\rho_i} \frac{\lambda_D}{\lambda_f} \frac{1 + \rho_{iv} B}{B} + 1 \right]$$

reduciendo términos :

$$t_m = \frac{1}{\lambda_D} \operatorname{Ln} \left[ \frac{\rho_m}{\rho_i} \lambda_D \rho_{iv} \zeta + 1 \right]$$

La ecuación anterior representa la edad del mineral en estudio evitando el uso de la constante de fisión ( $\lambda_f$ ). Solo basta conocer el valor de  $\zeta$ . Esta se define como :

$$\zeta = \frac{\sigma}{E\lambda_f}$$

conociendo la edad del estándar mineral, se rearrregla la ecuación (c) sabiendo que

$$\rho_m = e^{\lambda_D t} - 1 \quad (U.R.N.) \quad \text{y despejando } \zeta \text{ se obtiene :}$$

$$\xi = \frac{e^{\lambda_D t} - 1}{(\rho_e/\rho_v)_e \rho_{iv}} \frac{1}{\lambda_D}$$

Dado que  $\xi$  depende de la medición visual de las densidades de trazas espontáneas e inducidas en el mineral estándar, así como de la densidad de trazas en el detector externo que se coloca sobre el vidrio artificial estándar, su valor será diferente para cada observador y deberá ser determinado de por lo menos 7 u 8 irradiaciones y calibrado para cada investigador del laboratorio.

## V. GRABADO Y BORRADO DE TRAZAS

### a) GRABADO

Las trazas de fisión en estado natural o latente, son demasiado pequeñas y sólo son observables con ayuda del microscopio electrónico ( i.e., aumentos de 20.000 x ).

Price y Walker (1962), descubrieron que la traza latente podía ser observada con un microscopio óptico después de someter la muestra a un ataque químico con algún ácido o base que disolviera preferentemente las paredes de la traza. Experimentando con diferentes sustancias y materiales se obtuvieron posteriormente las concentraciones y tiempos de grabado para poder observar estas trazas en un gran número de cristales con un microscopio óptico a magnificaciones de solamente 500x a 1500x. Este procedimiento permite observar trazas en una gran cantidad de minerales y plásticos, como se muestra en la tabla 2.

El grabado hace una rápida disolución a lo largo de la traza y lenta en el resto de la superficie del mineral. Así la velocidad de grabado a lo largo de la traza ( $V_t$ ) es mayor que la velocidad de grabado en la superficie del mineral ( $V_g$ ), estas variaciones dependen principalmente de la orientación cristalográfica de la superficie, del arreglo cristalino de la misma, y por supuesto de las características del mineral y de las trazas .

### GEOMETRIA DE LA TRAZA GRABADA

La geometría de la traza grabada, depende principalmente de la relación que existe entre las velocidades de grabado en la traza  $V_t$  y en la superficie del mineral  $V_g$  , además de la inclinación de la traza con la superficie. Cada material tiene diferentes valores de velocidad de grabado.

Existe una relación bien definida entre  $V_g$  y  $V_t$  que afecta la eficiencia de grabado del material.

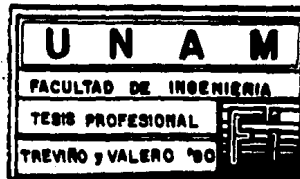
La figura 3 ilustra las relaciones geométricas de una traza de fisión. Supóngase como se muestra en la figura que la traza es normal a la superficie, es decir, que tenga como base del cono una circunferencia

CONDICIONES DE GRABADO PARA DIFERENTES  
MATERIALES

MINERAL	CONDICIONES DE GRABADO	REFERENCIA
Apatita	5% $\text{HNO}_3$ , 1 min , 23°C	Bhandari et al.(1971 )
Varita	70% $\text{HNO}_3$ , 3 h , 100°C	Fleischer and Price (1964 )
Berilo	19N KOH , 9 h , 150°C	Fleischer and Price ( 1964 )
Augita	2ml 48% HF:1ml 80% $\text{H}_2\text{SO}_4$ : 4ml $\text{H}_2\text{O}$ , 5-20 min, 23°C	Crozas et al. (1970)
Epidota	50N NaOH, 0.5-2 h, 140°C	Naesser and Dodge (1969)
Feldespatos	3g NaOH:4g $\text{H}_2\text{O}$ , 20-90 min, en punto de ebullición	Lal et al. (1968)
Fluorita	98% $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 10 min, 23°C	Fleischer and Price (1964 )
Biotita	20% HF , 1-2 min , 23°C	Price and Walker (1962 )
Olivino	1 ml $\text{H}_3\text{PO}_4$ :2g ácido oxálico: 4g EDTA: 100ml $\text{H}_2\text{O}$ : 4.5g NaOH , 2-3 h, 125°C	Krishnaswami et al. (1972)

Tabla ( 2 ). Se muestra sólo algunos de los diferentes materiales que se pueden utilizar para fechar rocas, una lista mucho más numerosa se muestra en Fleischer Price y Walker (1975).

(tomada de Fleischer et al. 1975 )



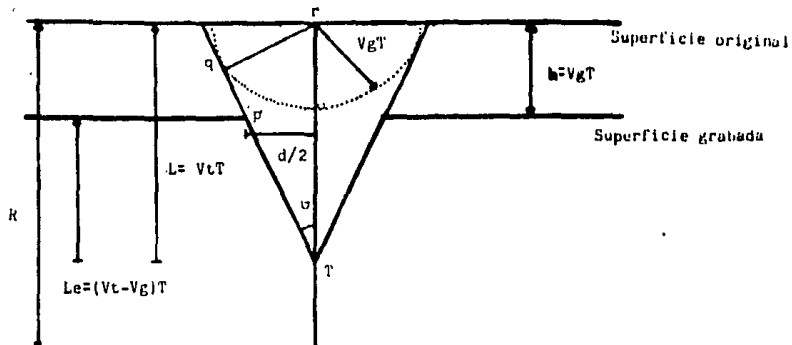
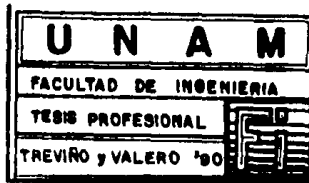


Figura (3). Se ilustra las relaciones geométricas de una traza de fisión. La posición de la traza en este caso es perpendicular a la superficie de grabado.  $L$  es la longitud de la traza latente,  $V_t$  y  $V_g$  son las velocidades de grabado a lo largo de la traza y del material respectivamente

(Tomada de Carrani et. al. 1987)



con radio  $d/2$ , que la velocidad de grabado  $V_t$  sea constante y que  $V_g$  también sea constante e isotrópica.

Después de un tiempo de grabado  $T$ , la longitud de la traza  $L$  será:

$$L = T V_t$$

De la misma manera la distancia  $h$  que se redujo la superficie es  $h = V_g T$ , entonces la longitud de la huella es  $L = T V_t - V_g T$

Del triángulo  $GP_1$ , el ángulo  $\theta$  está dado por

$$\tan \theta = (d/2)/L$$

Por otro lado del triángulo  $q_1 r_1$  se encuentra que

$$\tan \theta = V_g / (V_t^2 - V_g^2)^{1/2}$$

y combinando estas dos ecuaciones

$$(d/2)/L = (2V_g) / (V_t^2 - V_g^2)^{1/2} \quad \text{por lo tanto}$$

$$d = (2V_g L) / (V_t^2 - V_g^2)^{1/2} \quad \text{se sabe que}$$

$$L = T V_t - V_g T \quad \text{entonces}$$

$$d = 2V_g ((V_t - V_g) / (V_t + V_g))^{1/2} \quad \text{desarrollando}$$

$$d = 2V_g T ((V-1) / (V+1))^{1/2} \quad \text{en donde } V = V_t / V_g$$

de aquí se pueden hacer algunas observaciones.

Si  $V_t \gg V_g$  entonces  $((V-1) / (V+1))^{1/2}$  tenderá a 1

por lo tanto:  $d = 2V_g T$

Esto quiere decir que el diámetro de una traza de alto valor  $V_g$  (fragmento de fisión en mica) crece directamente proporcional con el tiempo, pudiendo medirse la velocidad de corrosión  $V_g$  con medidas de diámetro.

Si  $V_t$  es poco mayor que  $V_g$ , se desarrollarán trazas con un gran ángulo  $\theta$

como es el caso del vidrio, y si  $V_t \gg V_g$  se desarrollarán trazas largas con un ángulo  $\theta$  pequeño como es el caso de las micas (Figura 4).

#### EFICIENCIA DE GRABADO Y ANGULO CRITICO

La eficiencia de grabado se define como la relación que existe entre el número de trazas latentes (i.e. sin grabar) y el número de trazas después del grabado y se expresa como:

$$n = 1 - \text{Sen } \theta_c \quad \text{en donde } \theta_c = \text{el ángulo crítico del material.}$$

En el caso que la traza no sea perpendicular con la superficie, ésta tiene un cierto ángulo ( $\theta$ ) con aquella, además la intersección de la traza con la superficie de grabado es una elipse con eje mayor "l" y eje menor "d" (Fig. 5a).

Haciendo un análisis matemático (Baicázar, 1978) se llega a lo siguiente:

$$l = V_t (V_t^2 - V_g^2)^{1/2} / V_t \text{ sen } \theta + V_g \text{-----(1)}$$

$$d = 2 V_g t (V \text{sen } \theta - 1 / V \text{sen } \theta)^{1/2} \text{-----(2)}$$

De la ecuación (2) se tiene que si  $V \text{sen } \theta = 1$ , entonces "d" vale cero. Esto se debe a que cuando  $V \text{sen } \theta = 1$ , la componente normal de la velocidad de grabado de la superficie es igual a la velocidad de grabado de todo el material y por el tamaño no se puede observar la traza ya que ésta ha desaparecido en el proceso de grabado.

Así se tiene que existe un ángulo que representa la mínima inclinación que guarda la traza con la superficie a la cual se conservan las mismas después del grabado. A este ángulo ( $\theta_c$ ) se le conoce como ángulo crítico, que según la figura 5b se define:

$$\text{Sen } \theta_c = V_g / V_t = 1/V \text{-----(1)}$$

$$\theta_c = \text{arcsen } 1/V \text{-----(2)}$$

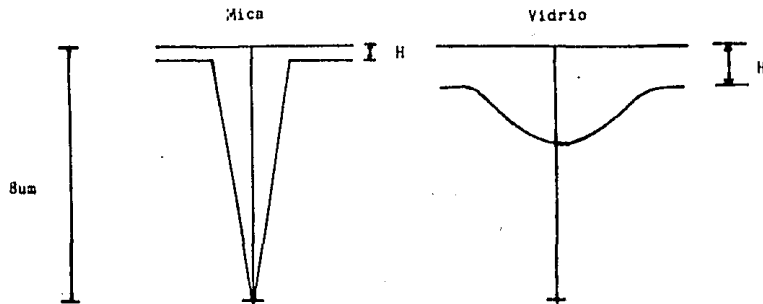
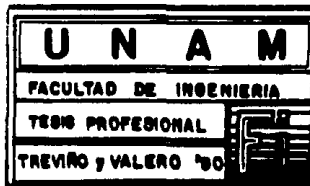


Figura (4). Mientras que en la mica se desarrollan trazas largas con un diámetro pequeño, en el vidrio se desarrollan cortas pero con gran diámetro. La relación de grabado en la mica es  $V_t/V_g = 30$ , lo que significa que por cada unidad que se reduce la superficie la velocidad de grabado de la traza crece 30 veces, en cambio en el vidrio la relación de grabado es  $V_t/V_g = 2$  por lo que por cada unidad que se reduce la superficie, la traza crece 2 veces.





U N A M

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS PROFESIONAL

TREVIÑO y VALERO '80

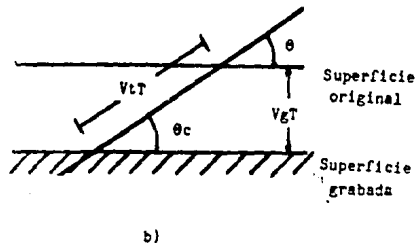
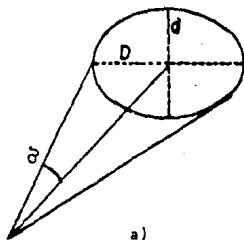


Figura ( 5 ). Cuando la traza no es perpendicular a la superficie de grabado ésta tiene un desarrollo como se muestra en (a), la base de la traza es una elipse con eje mayor  $D$  y eje menor  $d$ , además la traza conserva un ángulo de inclinación  $\theta$  con la superficie de grabado. En (b) el ángulo crítico se define como  $\theta_c = \arcsen (V_g/V_t)$ , sólo las trazas cuyo ángulo de incidencia  $\theta$  sea mayor que  $\theta_c$  pueden ser registradas.

tomada de Fleischer et. al., 1975

Esto significa que sólo las trazas que tengan un ángulo ( $\theta$ ) menor al ángulo crítico ( $\theta_c$ ) se perderán con el grabado.

Cada material presenta distinto ángulo crítico por ejemplo, la mica presenta un ángulo crítico ( $\theta_c$ ) de  $2^\circ$  ó  $3^\circ$ , esto implica una eficiencia de  $n = 100\%$ , en cambio el vidrio el  $\theta_c$  es igual a  $32^\circ$ , esto representa una eficiencia de  $50\%$ .

## b) BORRADO

El desarrollo de las trazas de fisión en un lapso de tiempo geológico en un material cristalino, se ve afectado en su geometría cuando dicho material es expuesto durante cierto tiempo a algún evento térmico. A este proceso se le conoce como recocido (annealing), o borrado parcial o total de las trazas.

Para entender el proceso de recocido es necesario entender ciertos conceptos fundamentales que a continuación se describen.

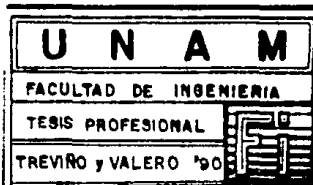
### CONCEPTO DE TEMPERATURA DE CIERRE

Los materiales cristalinos y los vidrios mantienen el registro de las trazas de fisión sólo por debajo de una cierta temperatura, que es función de la composición de cada material. A temperaturas menores las trazas de fisión son estables (i.e. las trazas no sufren deformaciones físicas y preservan sus características originales), a esta temperatura se le conoce como temperatura de cierre o temperatura de retención de trazas (tabla 3). La temperatura de cierre involucra a su vez otro concepto denominado "rango de retención parcial" el cual se define como el rango de temperaturas que en función del tiempo limita una zona en un diagrama espacio-tiempo en el que ocurre un borrado parcial de trazas. Algunos autores manejan que la temperatura de cierre es aquella

MINERAL	100 % DE BORRADO EN 1 h. °C
AMBITO	350 - 400
OLIVINO	400 - 500.
ORTOPINGUITO	450 - 500
MICA	500 - 600
ESFENA	650 - 800
ZIRCON	750 - 850
CUARZO	MAS DE 1000

TABLA 3 ( Durrani 1989 )

Se muestran algunos ejemplos de temperaturas de borrado en laboratorio para diferentes minerales.



a la que el 50% de las trazas son preservadas.

### ESTABILIDAD DE LA TRAZA

Las trazas presentes en diferentes materiales responden de distinta manera cuando son sometidos a una misma variación de temperatura, algunos son borradas totalmente y en otros casos sólo parcialmente, esto se debe a que cada material presenta resistencia diferente al recocido. Estas propiedades determinan la estabilidad de la traza.

Las propiedades que afectan al comportamiento de las trazas son:

- 1) La energía de activación (E) requerida para el borrado de las trazas, esta "E" va aumentando conforme se van borrando las primeras trazas, y corresponde a la ecuación:  $D = D_0 e^{-E/RT}$  (Figura 6 y 7).
- 2) Otro factor importante son las propiedades cristalográficas i.e. la orientación que presenta la traza con respecto a arreglo cristalino del material. Ejemplo: en las micas las trazas perpendiculares al cruceo son más resistentes que las paralelas. Esto se entiende más cuando se estudia la cristalografía de cada mineral.
- 3) La composición química (Figura 8).
- 4) La temperatura es un factor (así como el tiempo) que más afecta la estabilidad. La presión de formación y fluidos, no afectan la estabilidad de la traza.

### EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA TRAZA

Como se mencionó anteriormente la temperatura y el tiempo son los factores más importantes que afectan la estabilidad de las trazas. el efecto de estos factores produce una reducción de la longitud y la densidad de las trazas a medida que la temperatura se incrementa. Gleadow y Duddy (1981), proponen que como un mismo mineral puede tener diferente comportamiento al recocido es preciso obtener una relación matemática entre  $L/L_0$  de la traza, al someter la muestra a un calentamiento sucesivo que culmina con el borrado total de las trazas.

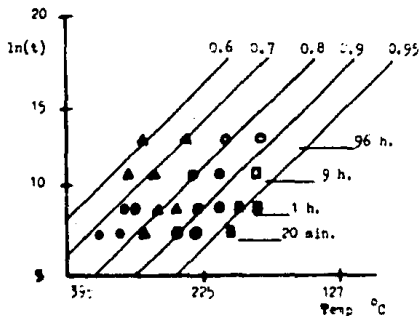


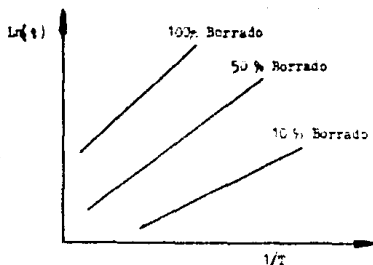
FIGURA No. 6  
 GRÁFICA TIPO ARRHENIUS, EN  
 ELLA SE MUESTRA EL PORCENTAJE  
 DE TRAZAS BORRADAS A  
 DIFERENTES TEMPERATURAS EN  
 DISTINTOS MINERALES, LOS  
 CUALES SE INDICAN CON VARIOS  
 SÍMBOLOS.

(Green y Juddy 1965)

FIGURA No. 7

SIMPLIFICACION DE LA GRÁFICA  
 TIPO ARRHENIUS, EN DONDE CADA  
 LÍNEA REPRESENTA UN CIENTO  
 PORCENTAJE DE TRAZAS BORRADAS.  
 EL ARRIBLO ES APLICABLE A DI-  
 VEROS MINERALES, PARA CADA UNO  
 DE ELLOS LAS LÍNEAS PRESENTARÁN  
 UN CORRIAMIENTO LATERAL CONFOR-  
 ME A LA TEMPERATURA DE CIERRE  
 DE CADA MINERAL.

(Durrani 1987)



U N A M

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS PROFESIONAL

TREVIÑO y VALERO '90



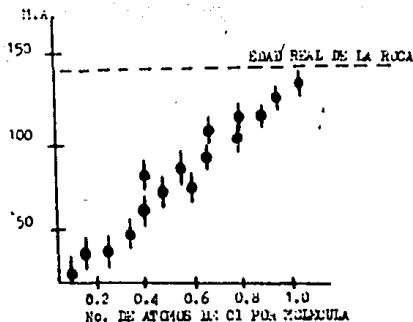
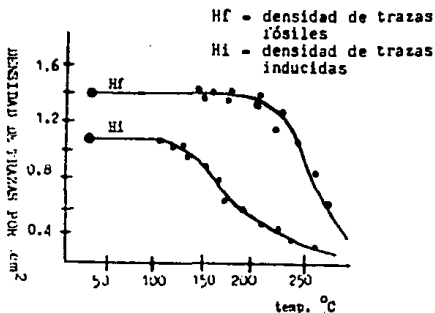


FIGURA No. 8  
 MUESTRA LA VARIACION DE LA  
 EDAD DE UNA MUESTRA EN FUN-  
 CION DE LA CONCENTRACION DE  
 CLORO (muestra de apatita).  
 LA EDAD QUE SE OBTIENE EN  
 AL EJE "Y" SE OBTIENE  
 POR TRAZAS DE FISION.

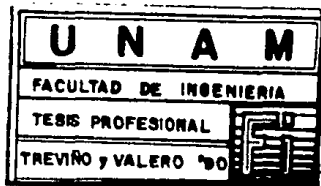
( Wagner y Reiser 1972 )

FIGURA No. 9  
 EN ESTA SE MUESTRA LA DIFEREN-  
 CIA DE TEMPERATURA DE  
 EQUILIBRIO EN LAS TRAZAS  
 FORMADAS E INDUCIDAS EN LA  
 MISMA MUESTRA.

( Gleadow y Duddy 1967 )



Hf - densidad de trazas  
 fósiles  
 Hi - densidad de trazas  
 inducidas



Ellos proponen las siguientes relaciones:

$$\text{Lnt} - C_1 \ln(1 - L/L_0) = C_2 + C_3/T \text{ -----(1)}$$

donde : L = longitud de trazas inducidas.

L<sub>0</sub> = longitud de trazas fósiles

t = tiempo de borrado en s

T = temperatura en K<sup>o</sup>

$$C_1 = 4.47$$

$$C_2 = -17.37$$

$$C_3 = 19000$$

la ecuación (1) puede expresarse como sigue:

$$\text{Ln}(1 - L/L_0) = A_1(t) - B/T \quad \text{comportamiento isócrono-----(2)}$$

$$\text{Ln}(1 - L/L_0) = A_2(t) + B_2 \text{Lnt} \quad \text{comportamiento isotérmico-----(3)}$$

$$\text{Lnt} = A(L/L_0) - B/T \quad \text{arreglo Arrhenius-----(4)}$$

$$\text{En donde : } A_1 = \frac{1}{L} \text{Ln } t - \frac{C_2}{C_1} \quad ; \quad B = \frac{C_3}{C_1}$$

$$A_2 = - \left( \frac{C_3}{C_1} \frac{1}{T} + \frac{C_2}{C_1} \right) \quad ; \quad B_2 = \frac{1}{C_1}$$

los que describen los diferentes comportamientos en el proceso de recosido.

La ecuación (4) muestra que los datos pueden ser graficados en forma de líneas paralelas para condiciones de igual porcentaje de reducción en la densidad de trazas (Figuras 7 y 8). Este tipo de arreglo es aplicable a diversos minerales, pero para cada mineral las líneas presentarán un desplazamiento lateral diferente y dependiente de la temperatura de cierre de cada mineral.

Va que el grado de borrado es una función lineal de las temperaturas que han afectado al mineral. la gráfica tipo Arrhenius puede extrapolarse desde tiempos cortos obtenidos en el laboratorio a largos

en el rango del tiempo geológico.

## VARIACION DEL COMPORTAMIENTO DE TRAZAS FÓSILES E INDUCIDAS EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

Se ha observado en experimentos de laboratorio que las trazas fósiles presentan propiedades de borrado diferentes a las inducidas. Por lo que es importante entender el comportamiento de las trazas fósiles con mayor claridad ya que éstas se forman en el ambiente geológico (Figura 9). Con base en esto, es necesario realizar estudios comparativos del comportamiento de las trazas tanto fósiles como inducidas en el proceso de borrado en el laboratorio. Esta variedad en los comportamientos depende además de los factores ya expuestos, de los procesos termogeológicos a los que se vio sometida la muestra.

Si no se presenta un recocido natural las densidades de trazas fósiles e inducidas se comportan de manera similar en el proceso de borrado en el laboratorio, es decir, a medida que aumenta la temperatura la densidad de trazas tanto fósiles como inducidas disminuyen proporcionalmente (Figura 10).

Por el contrario si se presentó en el pasado un recocido natural entonces ocurre que la densidad de trazas fósiles no se verá tan afectada en un calentamiento adicional en el laboratorio (ya que estas trazas presentan mayor estabilidad, son más cortas y más resistentes a los cambios de temperatura) como la densidad de trazas inducidas (Figura 11), por lo que la edad se incrementará al aumentar la temperatura hasta alcanzar un valor estable que corresponde a la edad corregida, a este procedimiento se le conoce como corrección de meseta. Conociendo la temperatura de retención trazas en los minerales, se ha confirmado que la longitud de las trazas fósiles son más cortas que las longitudes de las trazas inducidas. Según Stroezel y Wagner (1963), existe una relación entre las reducciones entre la longitud y la densidad de cada mineral, esto se hace midiendo  $L/L_0$  y  $\rho/\rho_0$  en muestras recocidas y no recocidas en laboratorio. De esta forma se realiza una comparación entre el recocido artificial y el promedio de reducción tanto en longitud y densidad. Extrapolando esto para las



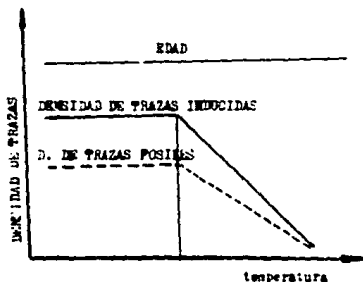


FIGURA No. 10

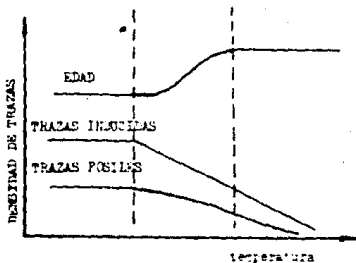
CUANDO SE TOMA UNA MUESTRA SIN BORADO NATURAL LA DENSIDAD DE TRAZAS POSIBLES E INDUCIDAS REACTIVAN EN FORMA SIMILAR EN EL PROCESO DE BORADO EN EL LABORATORIO. EN CONSECUENCIA, LA DENSIDAD POR TRAZAS DE FISION ES CONSTANTE

( Carpena y Kienast 1986 )

FIGURA No. 11

SI LA MUESTRA PRESENTA BORADO NATURAL, LA DENSIDAD DE T. POSIBLES NO SE VE TAN AFECTADA EN EL LABORATORIO YA QUE LA T-RAZA ES MAS ESTABLE Y RESISTENTE A LA TEMPERATURA. EN CONTRASTE LA DENSIDAD DE TRAZAS INDUCIDAS SE VE NOTABILMENTE AFECTADA, POR LO QUE LA EDAD OBTENIDA NECESITA UNA CORRECCION.

( Carpena y Kienast 1986 )



<b>U N A M</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
TREVINO y VALERO '90	

trazas fósiles se puede inferir la temperatura a la que ha sido sometida una muestra en un proceso de recocido natural (Figura 12).

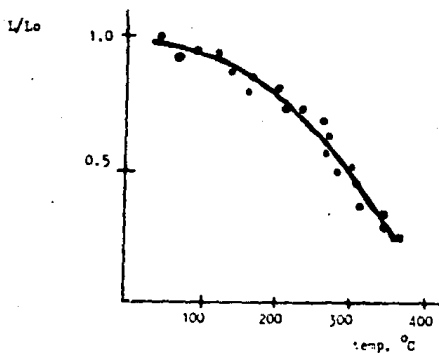
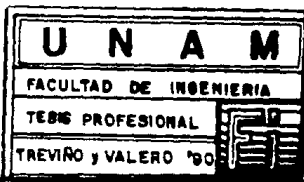


Figura 12. Se muestra la reducción del cociente la longitud media  $L$  y longitud original  $L_0$  de tracas inducidas, en un proceso de recocido en laboratorio. Como punto de partida para tracas locales de metal, inferior las temperaturas a que se recetó una muestra en un proceso de recocido natural. Esta gráfica se obtuvo de una muestra de análisis.

Green y Duddy, 1985.



## VI. PREPARACION DE LAS MUESTRAS

Para los ensayos en laboratorio sobre trazas de fisión, se escogieron apatitas de calidad gema, con el objeto de trabajar con cristales bien formados, de buen tamaño y transparencia, teniendo con esto condiciones óptimas de observación al microscopio.

El procedimiento a seguir varía dependiendo de las características de la muestra, existen dos procedimientos:

A) Método poblacional. Este método se utiliza en muestras cuyo contenido de uranio es homogéneo como en el caso de las apatitas y vidrios. Los pasos que se deben seguir se ilustran en la figura 13.

B) Método del detector externo. Este método se usa para muestras cuyo contenido de uranio no es uniforme, como en los casos del zircón y esfena. El procedimiento que se debe seguir se ilustra en la figura 14.

### a) CORTE

Para realizar los cortes en el mineral, dado el tamaño de las muestras, y para facilitar su manejo, es necesario poner las muestras inmersas en resina epóxica obteniendo de esta forma un mejor control en las orientaciones de los cortes que se desean hacer.

### b) MONTAJE

El tipo de montaje depende mucho de la forma, tamaño y constitución de la muestra, pues de acuerdo a la calidad de ésta, varía el tipo y técnica de montaje a utilizar.

Una muestra grande, con alto grado de cristalización se puede trabajar en una sola pieza, para ello es necesario que el cristal quede totalmente inmerso en la resina epóxica, con ello se pueden obtener diversos cortes a diferente orientación.

Por el contrario cuando se trabaja con material pulverizado, el montaje más adecuado a seguir es el siguiente:

Se deben agrupar los cristales formando un pequeño círculo sobre una

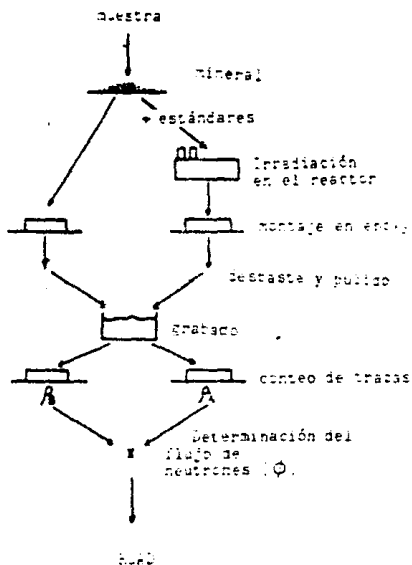
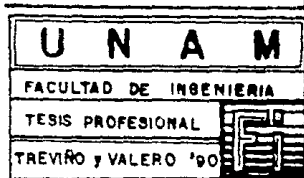


Figura (13). Proceso a seguir en la obtención de una edad por huellas de fisión por el método poblacional. Este proceso se utiliza principalmente en cristales cuyo contenido de uranio es homogéneo como las arcillas y vidrios.

(tomada de Haeser et al, 1972).



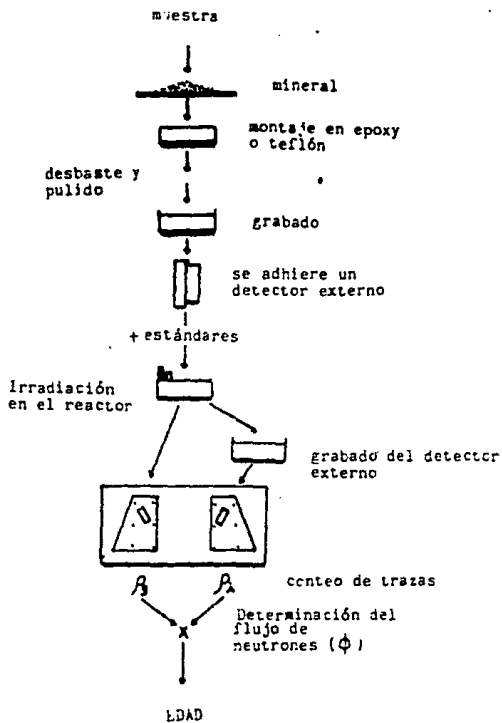


Figura (11). Proceso a seguir en la obtención de una edad por trazas de fisión por el método del detector externo. Este proceso se utiliza principalmente en cristales cuyo contenido de uranio no es homogéneo como en los zircones.  
 (citada de Naesser et al. 1993 ).

placa de teflón. Posterior a esto, se vierte una gota de resina epóica sobre los cristales y se cubre con un portaobjetos (figura 15a y 15b).

## c) PULIDO

El objetivo del pulido, es dejar expuesta una superficie interior del cristal, una vez montada la muestra en el portaobjetos el pulido se desarrolla de la siguiente manera:

1) Se desbasta la muestra con lija abrasiva del número 600, usando para ello agua como lubricante. Este proceso se efectúa en una máquina pulidora ISOMET a 100 rpm, con esto se pretende obtener una superficie lisa, así como desaparecer las estrias producidas por la sierra de diamante.

2) Se pule con pasta de diamante de nueve micras. El pulido se efectúa en sentido contrario al del giro de la máquina pulidora. Para que el pulido sea óptimo la muestra se debe pulir en diferentes posiciones hasta que queden rayas del mismo espesor. El tiempo empleado en este paso estará en función de la dureza del mineral, la velocidad de giro del disco y de la fuerza que se aplique sobre la muestra (consecuentemente dependerá de la habilidad del pulidor).

3) Pulido con pasta de diamante de una micra. Básicamente se desarrolla de la misma forma que el paso anterior, con esta pasta lo que se logra es borrar completamente las marcas dejadas con el abrazivo anterior, sin necesidad de pulir con pastas de diamante intermedias (J.J. Ramírez, 1982 laboratorio de minerografía de la F.I. de la UNAM, comunicación personal) lo que acorta considerablemente el tiempo empleado en el pulido.

4) Pulido con pasta de diamante de 0.25 micras. Esta última parte del pulido debe desarrollarse con sumo cuidado ya que la limpieza de la muestra y del papel base debe ser total, puesto que cualquier impureza raya nuevamente al mineral, este paso da el acabado final de la muestra, quedando de esta forma lista para el proceso de grabado. Durante todo el proceso de pulido es necesario observar el avance del

## TECNICA DE MONTAJE

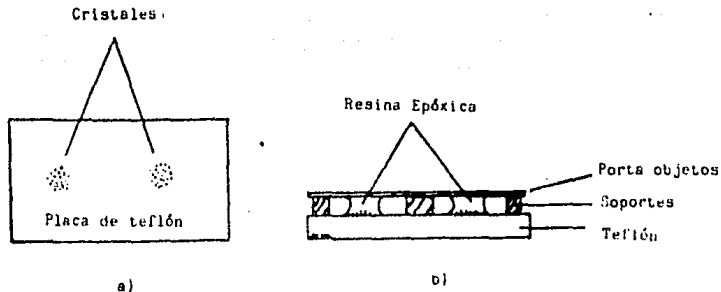


Figura (15). Se muestra la técnica de montaje primeramente se agrupan los cristales formando un pequeño círculo (a), separados de tal manera que se pueda montar varias muestras a la vez, posteriormente, se vierte una gota de resina epóxica sobre el conjunto de cristales y se coloca un porta objetos sobre los mismos (b).

<b>U N A M</b>
FACULTAD DE INGENIERIA
TESIS PROFESIONAL
TREVIÑO y VALERO '90



mismo al microscopio.

#### d) GRABADO

El grabado como ya se mencionó anteriormente, tiene el objetivo de provocar corrosión a lo largo de las trazas, magnificándolas para que éstas puedan ser observadas con el microscopio óptico.

El tipo de solvente que se utiliza depende de las características químicas del mineral. Las condiciones de temperatura, así como la concentración de la solución pueden acelerar la reacción y las trazas serán observables en un tiempo menor.

Algunos ejemplos de las condiciones de grabado en diferentes materiales se ilustran en la tabla 2.

Es importante que las condiciones de grabado sean constantes ya que la densidad observada de trazas es función de la concentración de la solución, del tiempo de grabado y de la temperatura.

## VII CALIBRACION DE LA FUENTE DE CALIFORNIO 252

En un experimento previo a la irradiación de las muestras de apatita en el reactor nuclear, se irradiaron con una fuente de  $^{252}\text{Cf}$  plásticos de Macrofol G y apatitas a diferentes ángulos de incidencia, ya que el  $^{252}\text{Cf}$  produce entre otras, partículas de fisión, estas al incidir sobre los plásticos rompen las cadenas de los polímeros que las forman produciendo de esta forma una traza sobre el material, esta traza es comparable en geometría con las que se formarían en la apatita al irradiarse en el reactor. Esta irradiación con  $^{252}\text{Cf}$  se realizaron en una cámara versatil (Balazar, 1983) con los siguientes objetivos:

- 1) Calibración de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ .
- 2) Identificar la geometría de la traza para diferentes ángulos de incidencia en las apatitas.

- 3) Conocer el tiempo óptimo de revelado de trazas a diferentes ángulos. Para la calibración se irradiaron plásticos con intervalos de 30 min. hasta completar un tiempo de 5 horas, posteriormente, se revelaron los plásticos en una solución de NaOH al 25% y 70%, contando en cada caso la densidad de trazas producidas y graficando los resultados.

Este procedimiento se repitió para cada ángulo de irradiación, es decir,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$  contándose en total más de 50 muestras de plástico Macrofol G, obteniéndose al final una curva de calibración de densidad de trazas vs. ángulo de incidencia, para los fragmentos de fisión de  $^{252}\text{Cf}$ , (ver figura 16).

Es de hacerse notar que esta curva de calibración no es constante en el tiempo ya que el  $^{252}\text{Cf}$  va decayendo en su actividad.

Para identificar la geometría de la traza en muestras de apatita, y conocer el tiempo óptimo de revelado de las mismas, se procedió a irradiar las muestras de mineral con la misma fuente de  $^{252}\text{Cf}$  y basándonos en la curva de calibración determinamos los tiempos de irradiación para obtener una densidad determinada de trazas por  $\text{cm}^2$ . posterior a esto, se revelaron las muestras en una solución de  $\text{HNO}_3$  al 5% variando los tiempos de revelado cada 10 seg. hasta completar 3 min. observando el desarrollo de la traza bajo el microscopio, de esto se

TRACAS/Cm<sup>2</sup>

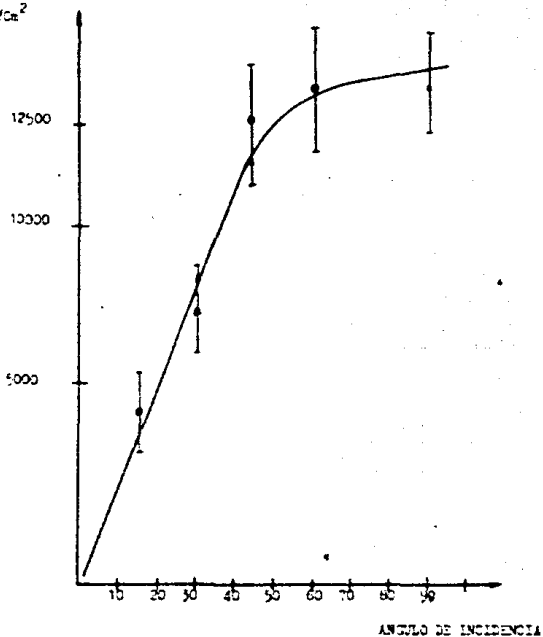


FIGURA No. 16

CURVA DE CALIBRACION DE LA FUENTE  
DE CALIFORNIO 252  
DENSIDAD DE TRACAS VS. ANGULO DE  
INCIDENCIA, TIEMPO DE IRRADIACION  
1 h., MAKHSPOL C.  
CONDICIONES DE REVELADO, NaOH 25 %  
70° C. DURANTE 2 h.  
Fecha: 20/1/89

<b>U N A M</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
TREVINO y VALERO '80	

obtuvo un muestrario fotográfico de trazas de fisión en la apatita a diferentes ángulos y distintos tiempos de revelado. de estos experimentos se obtuvieron los siguientes resultados:

- 1) El tiempo óptimo de revelado es de 30 seg. en una solución de  $\text{HNO}_3$  al 5% a  $20^\circ\text{C}$ .
- 2) Después de este tiempo la geometría de la traza comienza a deformarse. los daños en el cristal son amplificadas pudiéndose confundir fácilmente con las trazas. lo cual dificulta el conteo de las mismas.
- 3) Con tiempos de revelado menores las trazas son difíciles de detectar con ampliaciones menores de 125x. dificultando el conteo.

El conteo de trazas y la estadística de las mismas, es una etapa fundamental en el cálculo de una edad por trazas de fisión. Pues ésta depende principalmente de la relación que existe entre trazas fósiles e inducidas.

El decaimiento radiactivo sigue las leyes de la estadística Poissoniana, así mismo, la estadística en el fechado por trazas de fisión tiene una distribución de Poisson, aunque en ocasiones se pueda considerar una distribución normal (Didier Chailouet et al., 1964). La precisión de las edades obtenidas depende tanto de los errores obtenidos en el conteo de las trazas tanto fósiles  $p_f$  como inducidas  $p_i$ , y del error de estimación del flujo de neutrones  $\phi$ . Para calcular una edad se puede utilizar, como se vio anteriormente, el método del detector externo o el poblacional. Cuando se use el detector externo se presenta una desviación estándar del conteo de trazas en el mineral, en el detector externo y en el estándar, por lo que el error total es:

$$\text{Std.} = (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2)^{1/2} \quad (1)$$

en donde

$$\alpha = \frac{F}{F}^{1/2} \quad \beta = \frac{I}{I}^{1/2} \quad \gamma = \frac{E}{E}^{1/2}$$

F = Trazas fósiles

I = Trazas inducidas

E =  $\sigma$  del estándar

En la mayoría de los casos se excluye el error en el estándar. Esto es válido si las densidades  $p_f$  y  $p_i$  son contadas en el mismo grano o en el grano y su detector (Naeser, 1976).

En cambio en el método poblacional la estadística que se usa es la estadística de distribución normal. Pues al calcular  $\phi$  según Poisson provoca un error demasiado grande comparado con lo que la estadística permite.

Este efecto es producido por la diferencia del contenido de uranio en

los cristales, por lo tanto

$$S = (Ex^2/N - (Ex/N)^2)^{1/2} \quad Ex = \text{media}$$

$$\text{y el error es : } S_c = S / N^{1/2}$$

En donde N = número de granos. Esta fórmula se usa tanto para trazas fósiles como inducidas y la desviación total se obtiene de la ecuación (1).

Las densidades de trazas  $p_s$  y  $p_i$  se obtienen dividiendo el número total de trazas entre la suma de las áreas en donde se efectuó el conteo:

$$p = N/A \quad N = \text{número total de trazas} \\ A = \text{área total medida}$$

Entonces la edad total de un cristal está dada por :

$$t = \text{edad calculada} + 2\sigma$$

## IX. IRRADIACION

Uno de las etapas más importantes de la datación por trazas de fisión es la de la irradiación. La razón por la que se irradia la muestra en el reactor es para inducir fisiones en el  $^{235}\text{U}$ , pues es determinante tener la relación de trazas fósiles entre inducidas.

La muestra se irradia con neutrones térmicos lentos, es decir, estos tienen una energía de aproximadamente 0.025 eV. De irradiar la muestra con neutrones rápidos el producto que se fisiona es el  $^{238}\text{U}$  y no es lo que se desea.

Si se conoce la energía del neutrón se puede expresar la probabilidad de captura en términos de una área imaginaria circular que rodea el núcleo, y que es perpendicular al flujo de neutrones. Solo el neutrón que pasa a través de esta área puede inducir a la fisión.

A esta área se le conoce como sección transversal de fisión del núcleo  $\sigma_f$ , ésta es diferente para cada núcleo y para diferentes valores de energía, mientras más lento viaje un neutrón mayor será la sección  $\sigma_f$ .

En la figura 17 se observa que si se irradia con neutrones rápidos con energías mayores a 1 MeV, se fisionará tanto el  $^{238}\text{U}$  como el  $^{235}\text{U}$ . Por lo tanto es importante conocer la relación existente entre neutrones lentos y rápidos en el reactor.

Un factor muy importante de definir es el flujo de neutrones  $\phi$  que se aplica a la muestra. Para obtenerlo, es necesario irradiar al mismo tiempo la muestra y el estándar cuya edad y contenido de U se conoce. El tiempo necesario para producir un número considerable de fisiones depende principalmente del flujo de neutrones, de la sección transversal y concentración del  $^{235}\text{U}$  (Balcázar, curso de posgrado, FI UNAM, 1990). La apatita del Cerro de Mercado al igual que el estándar que se utilizó en los experimentos de laboratorio fueron irradiados durante 110 s, el flujo calculado  $\phi$  que debió pasar por la muestra fue de  $7.125 \times 10^{16}$  neutrones/cm<sup>2</sup>/s.

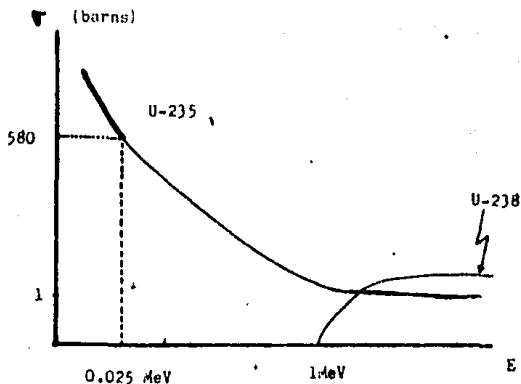


Figura (17). Esta gráfica representa la probabilidad de fisión del U-235 y U-238 dependiendo de la energía del flujo de neutrones. Se grafica la sección transversal del núcleo ( $\sigma$ ) contra la energía de los neutrones durante la irradiación ( $E$ ). Si se irradia con neutrones rápidos  $E > 1$  MeV se fisiona el U-238 mientras que si son lentos en donde  $E < 0.025$  MeV se fisiona el U-235.

<b>U N A M</b>			
FACULTAD DE INGENIERIA			
TESIS PROFESIONAL			
TREVIÑO y VALERO '90			



## X. CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DEL CERRO DE MERCADO

### a) MARCO GEOLOGICO REGIONAL

La Sierra Madre Occidental comprende una área de 1200 Km de longitud y entre 200 y 300 Km de amplitud, con elevaciones máximas de 3000 m.s.n.m., extendiéndose desde el sur de E.U. hasta las proximidades de la ciudad de Guadalajara donde desaparece bajo las rocas intermedias y básicas del Cinturón Volcánico Transamericano (Raiz, 1964). La Sierra Madre Occidental (SMO) presenta una acumulación de rocas volcánicas de composición ácida, lo que la hace la mayor representación de ignimbritas en el mundo. Los procesos que dieron origen a esta gran estructura han sido mejor estudiados y entendidos a partir de los 70's a la fecha, algunos autores como Clark (1978), Loney (1977), McJowell y Keizer (1977), Swanson (1978) y otros han publicado diversos trabajos que han ayudado a entender los orígenes de la estructura. Según McJowell y Clabaugh (1979), la SMO está compuesta por dos secuencias ígneas que son las más importantes, cuyo contacto se ha interpretado como un hiato magmático entre los eventos volcánicos.

### COMPLEJO VOLCANICO INFERIOR (CVI)

El CVI se presenta principalmente en forma de derrames y unidades piroclásticas de composición andesítica, con intercalaciones de ignimbritas silíceas, este complejo contrasta fuertemente con el CVS, ya que se presenta con plegamientos de pequeña longitud, parcialmente fallado y con alteraciones hidrotermales. Los espesores de esta secuencia varían de 1400 a 2000 m en las localidades de Topia y Tayoltita respectivamente, según Hwater (1970), el CVI constituye un típico arco magmático de composición calcoalcalina, relacionado con una margen continental convergente entre la placa Farallón y la corteza continental de México. Este proceso de convergencia duró hasta hace 30 m.a. (McJowell y Clabaugh, 1979).

El CVI está intrusionado por un batolito de composición intermedia, el cual aflora en el estado de Sinaloa (Henry et al 1975). Algunos

Plutones granodioríticos de pequeña extensión intrusaron al complejo volcánico-plutónico son a su vez más jóvenes que el batolito que los originó (McDowell y Clabaugh, 1979).

Las rocas ígneas más antiguas se presentan principalmente cerca de Mazatlán (100 m.a. Henry 1972, Fredrickson 1974). Las correlaciones indican que tanto el batolito como las rocas volcánicas corresponden a la misma edad (McDowell y Feizer 1977) y por tanto representan un solo evento magmático.

Estudios geocronológicos de Rb-R y U-Pb (Henry, 1975) establecieron un intervalo de magmatismo que abarca de 100 a 45 m.a.

La interrupción del magmatismo de 45 a 34 m.a. se puede interpretar como una migración del magmatismo hacia el interior del continente (Clark et. al., 1978). Según Gabelman y Trevisetti (1969) las alteraciones que presenta la SMO en su parte oeste observada principalmente de las andesitas se originó por la cantidad de intrusivos que cortan la Sierra, lo que da un ambiente favorable para la formación de yacimientos minerales.

#### **COMPLEJO VOLCÁNICO SUPERIOR.**

El Complejo Volcánico Superior (SVS) consiste principalmente de tobas riolíticas a riolíticas depositadas en capas subhorizontales, las cuales representan una parte importante del magmatismo circumpacífico (McDowell y Feizer, 1977). Este grupo forma una parte importante de la Provincia Volcánica de la SMO, la cual incluye cuerpos aislados de rocas similares en bloques inclinados por fallamientos en ambos flancos de la sierra (McDowell y Feizer, op. cit.).

El espesor de estas ignimbritas llega a ser mayor de los 1000m en algunas áreas. Por otra parte McDowell y Clabaugh (1979) consideran que el número de calderas que originó estos inmensos volúmenes de roca, debió haber sido de entre 300 a 400, con diámetros que podían alcanzar los 30 y 40 km.

#### **b) DESCRIPCIÓN DE LA LOCALIDAD DEL CERRO DE MERCADO**

El yacimiento del Cerro de Mercado está localizado aproximadamente a 3

km. al norte de la ciudad de Iruanao, su posición geográfica es 24°03' latitud norte y 5°31' longitud oeste (Fig. 18). Fisiográficamente el Cerro de Mercado se encuentra en el extremo este de la SMO y los límites de la Mesa Central. La localidad se caracteriza por ser una de las estructuras más prominentes del valle de Guadiana, el cual cubre una extensa planicie que desciende gradualmente hacia el SE de la capital y se levanta en otras direcciones, presentando amplios entrantes entre las inmediaciones de las montañas que lo rodean. La altura media de las planicies es de 1800 m.s.n.m., destacándose entre ellas el Cerro de Mercado, con una altura de 195 m sobre la planicie. El drenaje del valle se hace principalmente por el río del Tunal que corre al S de la ciudad y los afluentes de este se localizan en la vertiente W-E de la SMO (ríos Chico, Canatán y Suchil, que forman al río Mezquital el cual a su vez corta a la Sierra para desembocar en el Océano Pacífico).

El área circundante al Cerro de Mercado se caracteriza por presentar una topografía en etapa juvenil a madura inicial.

El área se presenta dentro de una secuencia de rocas volcánicas silíceas conocidas como grupo Carpintero, este está formado por las rocas extravasadas por la Caldera de Chupaderos hace 31 m.a. (Lyons, 1968). El Grupo Carpintero descansa sobre una secuencia de tobas silíceas y sedimentos aún no bien documentados, y está limitado por afloramientos de caliza del Cretácico, los cuales se presentan en el área de Iruanao bajo una secuencia de tobas soldadas (Lyons, op. cit.).

Se ha documentado que el vulcanismo silícico continuó en el área dos millones de años después de la erupción de la Caldera de Chupaderos (Swanson et al., 1978). La última actividad magmática documentada ha sido la de los Basaltos Metates de 12 m.a. ocurridos por un fallamiento distensivo (Swanson, op. cit.).

#### 1) ESTRATIGRAFÍA

El área que ocupa el yacimiento del Cerro de Mercado y sus alrededores.

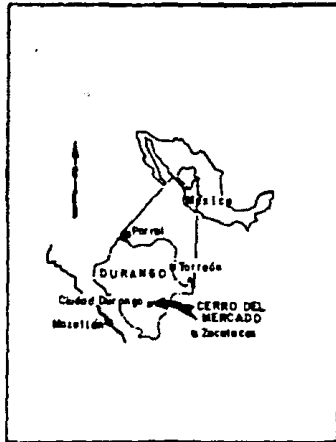


Fig .18.Localización del Cerro del Mercado  
(Lyons, James I.,1958 )

<b>U N A M</b>	
<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
<b>TESIS PROFESIONAL</b>	
<b>TREVINO y VALERO '80</b>	

se encuentra localizado en una caldera (Figura 19), estructura derivada del colapsamiento volcánico. La estratigrafía del área la componen en su totalidad rocas volcánicas que corresponden a lo que se ha denominado como Supergrupo Volcánico Superior.

El horizonte donde se encuentra el yacimiento corresponde a la formación Cacaria, la cual forma parte del grupo Carpintero. Este grupo está constituido principalmente por tobas riolíticas cuyos componentes esenciales son: fenocristales de sanidino, cuarzo, plagioclasa, hornblenda y magnetita.

Las formaciones que componen a este grupo son: la formación Aguila, formación Cacaria y formación Santuario.

La formación Cacaria se encuentra únicamente dentro de la caldera y se divide en tres miembros (Figura 20) que son:

1) Miembro Leona: Constituido por tobas riolíticas con una edad K-Hr de 30.6 m.a. (McDowell y Keizer, 1977).

2) Miembro Cerro de Mercado: En este miembro se encuentra el yacimiento del Cerro de Mercado cuyas apatitas han sido fechadas por trazas de fisión anteriormente (Naeser et. al. 1961) resultando una edad de 30 m.a.

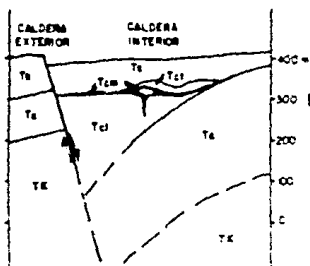
3) Miembro Tinaja: Constituido principalmente por flujo de cuarzo-latita formada durante las últimas etapas de emplazamiento del miembro Cerro de Mercado.

La formación Cacaria sobreyace concordantemente a la formación El Aguila, esta se diferencia del miembro Leona únicamente por el tamaño de los fenocristales ya que la composición es la misma. La formación El Aguila tiene una edad reportada K-Hr de 30.6 m.a. (McDowell y Keizer, 1977).

La formación Santuario sobreyace a la formación Cacaria, esta consiste al igual que el miembro Tinaja, en un derrame de cuarzo-Latita con una edad de K-Ar (McDowell y Keizer, op.cit.) de 30 m.a.

## 2) MINERALOGÍA

La Paragénesis que forma la mena de hierro del yacimiento tiene tres componentes esenciales que son: magnetita, hematita y magnetita. Los



ESTRATIGRAFIA - GRUPO CARRINERO

GRUPO CARRINERO	Ts	Fm. Sarrucro - 30.3 m s.
	Tci	Miembro Tinajas
	Tcm	Miembro Cerro del Mercado - 30 m s.
	Tci	Miembro Llanos - 30.7 m s.
	Te	Fm. Aguile - 30.8 m s.
	TK	Sedimentación Volcánica y Sedimentos

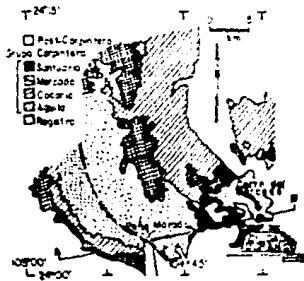
(McDowell y Keller, 1977  
 y Keller y Fackler, 1975)

Fig. 19 Sección diagramática de la caldera Chupaderos, demostrando relaciones entre varias unidades del Grupo Carrinero.



Fig. 20 Mapa geológico y sección del lado suroeste de la Caldera Chupaderos que muestra la distribución y localización estratigráfica de los depósitos de hierro conocidos.

(Lopez-Jimenez, 1981)



U N A M
FACULTAD DE INGENIERIA
TESIS PROFESIONAL
TREVINO y VALERO '90

cuales se presentan como cristales pseudomórficos octaédricos y dodecaédricos.

El miembro Cerro de Mercado presenta cristales bien formados de óxidos de hierro con hábito amigdaloidal, lo que evidencia que los óxidos masivos de hierro y la martita reemplazaron a la magnetita original.

Se encuentran también cristales romboédricos de hematita los cuales son pseudomorfos de la magnetita. En menor cantidad se encuentra goethita en amigdalas con martita, la goethita al igual que la magnetita es un mineral primario del yacimiento.

La roca encajonante presenta gran alteración principalmente limonita, diópsida cuerpos masivos de piroxeno. Algunas diópsidas y zeolitas coexisten con pequeñas cantidades de apatita y magnetita. El cuarzo no es muy común y se presenta relleno de cavidades conjuntamente con zeolitas y hematita.

Un interés especial presenta la apatita del Cerro de Mercado. Esta fluorapatita se presenta coexistiendo con la mena de hierro del yacimiento, con magnetita, martita, hematita incluso llega a presentar pequeñas inclusiones de estos minerales en su estructura.

La ocurrencia principal de las apatitas es como relleno de fisuras y cavidades en martita. En algunos casos la apatita ocurre en forma de vetillas en donde se asocia con cuarzo, calcedonia y zeolita. En el yacimiento se pueden encontrar cristales calidad gema de apatita de hasta 3 cm de largo y 1.5 de ancho con excelente desarrollo.

La composición química de la apatita del Cerro de Mercado Young, 1969, es la siguiente:

CaO	55.68 %	Cl	traza.
MgO	00.68 %	O	10ppm.
$F_2O_3$	41.04 %	F	3.50%
$CO_2$	00.03 %	$H_2O$	0.13%

### 3) GENESIS DEL YACIMIENTO.

El origen del yacimiento del Cerro de Mercado ha sido explicado con varias y diversas teorías, lo que provocó que durante mucho tiempo la

génesis del yacimiento haya estado en controversia .

El origen vulcanogenético ha sido la teoría más aceptada. Sin embargo, se ha aceptado también que hayan existido otros procesos reemplazamientos e intrusiones magmáticas respaldado esto por las texturas de reemplazamiento presentes en el yacimiento.

según James I Lyons (1988), los principales eventos que dieron origen al yacimiento son:

a) La violenta erupción de tobas con alta concentración en óxidos de hierro.

b) La erupción de lavas con alto porcentaje de magnetita.

c) La alteración de los óxidos a hematita.

El cuerpo mineralizado que compone al Cerro de Mercado fue probablemente originado a partir de un magma rico en cloruros, fluoruros, agua y otros componentes en menor proporción, dando por resultado que los óxidos de hierro cristalizaran en forma de magnetita. Por lo que corresponde a las lavas, estas al desgasificarse, produjeron cavidades que fueron rellenas posteriormente por cristales de apatita y hematita. La fase gaseosa que cristalizó produjo que las fracturas fueran rellenas con calcita y piroxeno.

Existen evidencias en cuanto a la forma de emplazamiento de algunos óxidos de hierro los cuales se presentan como hojas superpuestas depositadas en superficies erosionadas, por las que se explica el origen vulcanogenético del yacimiento. Para entender con mayor claridad la génesis del yacimiento es preciso estudiar con mayor atención los procesos volcánicos que en él se desarrollaron.

Por otra parte, dataciones radiométricas por K-Ar realizadas por McIowell y Leiser (1977), indican que tanto las tobas que están por arriba (formación Santuario, 30.3 m.a.) y debajo del miembro Cerro de Mercado (formación El Águila, 30.3 m.a.) definen claramente la edad de la mineralización.

Las apatitas del Cerro de Mercado presentan un alto grado de cristalización y pureza, y ya que la zona no ha sufrido recalentamientos posteriores ni existe algún proceso tectónico posterior que haya afectado a la zona, se utilizó en ellas el método



de fechado por trazas de fisión (Naeser y Fleischer, 1975) esperando encontrar la edad de cristalización de las rocas volcánicas del área. La edad obtenida es concordante con la obtenida anteriormente por K/Ar por lo que la apatita del Cerro de Mercado puede ser usada como estándar para fechamientos posteriores por trazas de fisión.

#### DI) EVOLUCION TECTONICA

La tectónica de la parte occidental de Norte América se inicia en el Paleozoico Tardío con la convergencia de la paleoplaca Farallón con el antiguo cratón de Norte América. Este arco magnético en el Cretácico Medio Superior forma ya un frente desde el Sb de Sinaloa a través de la margen continental y se relaciona hasta sus límites norte, con los batolitos de California y la Sierra Nevada de los E.U.

El magmatismo originado por este arco, se inicia en la margen continental, hace 140 m.a. e inicia su migración hacia el continente alejándose de la trinchera (Mc Dowell y Liabaugh, 1979).

Entre los 120 y 90 m.a. dicho arco migra lentamente en dirección oriental a una velocidad de 7 cm/año, sus principales manifestaciones son el emplazamiento de numerosos cuerpos intrusivos, acompañados de un vulcanismo andesítico que forma lo que es el grupo volcánico Inferno, el cual tuvo un cese abrupto en su magmatismo hace 45 m.a., seguido por una fuerte erosión, en la que se rellenaron los valles formados con detritos continentales. Para Coney y Reynolds (1977), el hiatus magnético fue producto del fin de la orogénesis Laramide, la reorganización de las placas y su disminución en la convergencia, hace 40 m.a. que dió por resultado un acrecentamiento del ángulo de incidencia, provocando la regresión de la zona de generación del magma al oeste, posiblemente por la migración del arco magnético hacia el oriente a una velocidad de 5 cm al año, avanzando la selectincha hacia los 10 m.a. Este fenómeno está representado por el intenso y espectacular vulcanismo explosivo ignimbritico, riolítico y riolodacítico que corona a toda la secuencia andesítica anterior, con algunos cuerpos intrusivos graníticos. Hacia los 30 m.a. se tiene la fragmentación de la placa Farallón, produciéndose los movimientos rotacionales que

originan los grabens que afectan a las lignimitas durante un ranso que va de Mioceno al Plioceno (Mc Dowell y Claibough, 1977). A partir del Plioceno, Baja California se convierte en parte de la Placa Pacifica, generándose así el Golfo de California asociado al sistema de fallas San Andrés, así mismo la emisión de basaltos alcalinos (formación Metates) característicos de márgenes distensivos, distribuidos a lo largo de Sonora, Sinaloa, Durango, Nayarit, Jalisco y Baja California, heredados de una tectónica de fracturamiento Terciario.

## X. DISCUSION DE RESULTADOS.

### a) PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

Los procesos a seguir en la obtención de una edad por el método de trazas de fisión como se mencionó anteriormente son principalmente: el método del detector externo y el método poblacional. En el presente trabajo se utilizaron ambos procedimientos en la calibración del método, además se utilizó también una variante del método poblacional que se denomina método de la Población-substracción.

El objetivo de seguir caminos diferentes para obtener una edad de trazas de fisión, es el comparar y corroborar resultados.

### b) METODO DEL DETECTOR EXTERNO

El procedimiento requerido para el uso de este método se ilustra en la figura (14). Después del corte, pulido y grabado se procedió al conteo de trazas. Las trazas fósiles fueron contadas directamente sobre la superficie del cristal, fotografía (1).

El conteo de trazas inducidas se efectuó en los detectores externos que fueron colocados para este fin, fotografía (2).

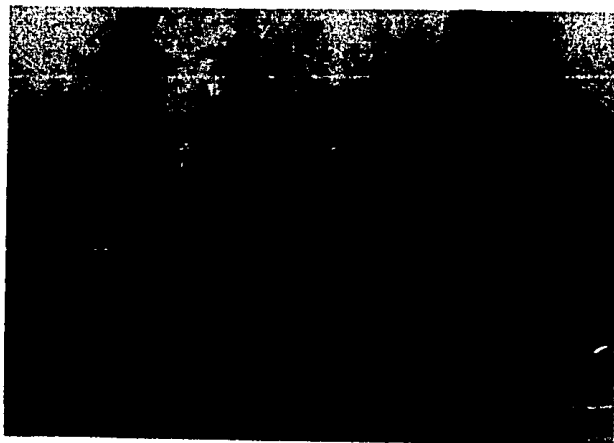
Las trazas de fisión de los átomos del <sup>235</sup>U que atraviesan la superficie del cristal se registran en el detector externo. Sin embargo, ahí sólo se registra el 50% de las fisiones ocurridas en la superficie debido a una geometría 1π. Por esta razón es necesario que la densidad inducida contada en el detector externo sea multiplicada por dos, alcanzando con esto una geometría 4π. El detector se coloca sobre la superficie como se indica en la figura (11).

### 1) CORTE

En cristales grandes (> 1 cm) de apatita del Cerro de Mercado se realizaron cortes a diversos ángulos con respecto al eje cristalográfico "C", y cortes paralelos al mismo (Figura 22). Posteriormente se procedió a hacer el análisis de sus trazas de fisión. El objetivo del experimento fue observar como variaba la densidad de trazas tanto fósiles como inducidas en cada corte y como se refleja esto en el cálculo de la edad.



Fotografía 1. Trazas de fisión en apatita orientadas a 30°.



Fotografía 2. Trazas de fisión inducidas en detector externo (muscovita) orientadas a 30°.

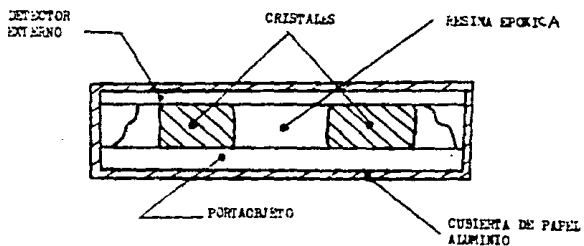
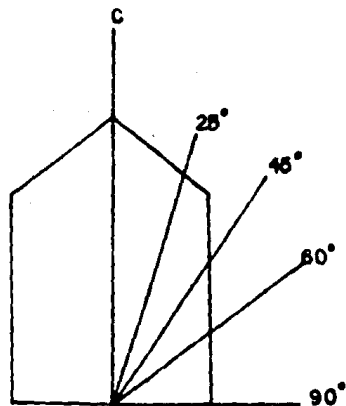
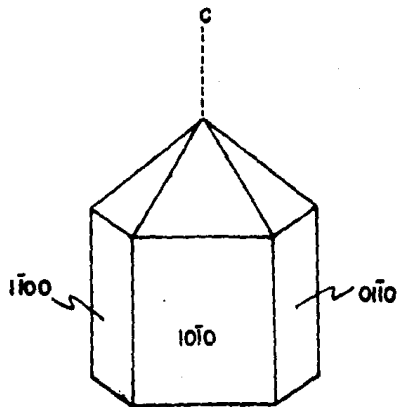
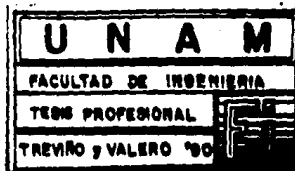


FIGURA No. 21 FORMA DE COLOCACION DEL DETECTOR EXTERNO SOBRE LOS CRISTALES, PARA CUANTIFICAR LAS TRAZAS DE FISION INDUCIDAS DURANTE LA IRRADIACION EN EL REACTOR.

<b>U N A M</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA	
TESIS PROFESIONAL	
TREVINO y VALERO '80	



Figura(22). Se muestra los diferentes cortes hechos en la apéxite del Carro de Mercado, tanto paralelos al eje "C" como variando el ángulo con respecto a éste.



## 2) MONTAJE Y PULIDO

Los diferentes cortes se montaron en resina epóxica y se pulieron. El pulido consistió en las siguientes etapas:

Primeramente se desbastaron las superficies con lija del número 320 y se asentaron con la del número 600. Posteriormente se pulieron con pasta de diamante de  $9 \mu$  y el pulido final se obtuvo con pasta de  $1 \mu$ .

## 3) GRABADO

Las superficies pulidas se grabaron en una solución al 5% de HNO<sub>3</sub> a temperatura ambiente durante 80 s.

Para evitar errores se grabaron las diferentes superficies en la misma solución y casi simultáneamente, esto para tenerla a la misma temperatura y porque la concentración de la solución puede variar con el tiempo y como la densidad de trazas es función tanto de la concentración de la solución como del tiempo es importante trabajar con las mismas condiciones de grabado.

## RESULTADOS OBTENIDOS.

Los resultados arrojados por este procedimiento indican que existe una variación de registro de trazas tanto fósiles como inducidas según la orientación cristalográfica del corte.

En la tabla (4) se muestran las diferentes orientaciones de los cortes y la densidad de trazas (fósiles e inducidas) observadas en cada una de ellas. Es notable la diferencia que existe en el registro de trazas, sobresaliendo el hecho de que el mayor número de trazas se registra en la superficie orientada a  $90^\circ$  de "C" ( $\rho_f = 1.34 \times 10^5$  y  $\rho_i = 1.48 \times 10^5$ ), sin embargo, el corte a  $45^\circ$  de "C" registra la menor densidad de trazas fósiles y la mayor densidad de trazas inducidas ( $\rho_f = 0.8 \times 10^5$  y  $\rho_i = 1.84 \times 10^5$ ).

Las densidades tanto de trazas fósiles como inducidas obtenidas en las orientaciones paralelas a "C" son relativamente homogéneas debido probablemente a que el arreglo cristalino de ellas es el mismo.

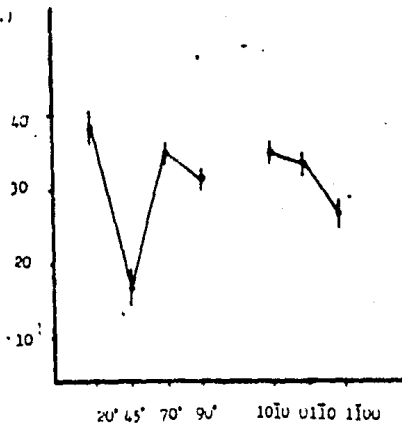
Esta variación de registro de trazas tiene efectos directos en el cálculo de la edad de cada una de las superficies (Fig.23, tabla 5).

Las edades calculadas en las orientaciones a  $45^\circ$  y  $20^\circ$  de "C" son las





Edad (m.a.)



Orientación del corte

Figura (23). Gráfica en donde se muestra la variación de la edad con respecto a la orientación del corte en la apatita del Cerro de Mercado.

**U N A M**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**TESIS PROFESIONAL**

**TREVINO y VALERO '80**

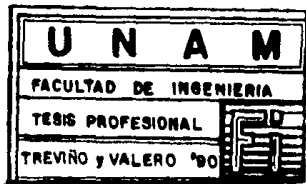
Orientación  
del corte

Edad (m.a.)  $\pm$   $\sigma$

1010	35.69	$\pm$ 2.17
0110	33.62	$\pm$ 2.55
1100	26.31	$\pm$ 2.10
20'	38.93	$\pm$ 4.75
45'	16.24	$\pm$ 1.165
70'	35.96	$\pm$ 4.94
90'	32.14	$\pm$ 1.805

Edad total =  $31.27 \pm 2.8$  m.a.

Tabla (5). En esta tabla se muestra la diferencia en las edades calculadas en cada uno de los cortes hechos en la apita del Cerro de Mercado y la edad total calculada para ésta por el método del detector externo.



más anómalas de todas ellas, ya que existe una diferencia de cerca de 15 m.a y 8 m.a respectivamente comparadas con la edad de 30 m.a esperada. Las otras edades calculadas (i.e. 70<sup>0</sup>, 90<sup>0</sup>, etc...) son relativamente homogéneas pues tienen una ligera variación con la edad esperada.

No obstante esta variación de edades, la edad total calculada para la apatita del Cerro de Mercado obtenida por este procedimiento es de 31.27 ± 2.8 m.a.

### c) METODO POBLACIONAL

El flujo de neutrones  $\phi$  es una variable esencial en la ecuación de la edad, para obtener ésta, se requiere irradiar un estándar de edad conocida y vidrios cuyo contenido de uranio es bien conocido. Con estos estándares se determina además del flujo de neutrones  $\phi$  el parámetro zeta  $\zeta$  que permite evitar el uso de la constante de fisión  $\lambda_f$ . Sin embargo, en este trabajo solo se utilizaron estándares de apatita (cuyo tipo es Fish Canyon, Colorado, E.U.A.) cuya edad por trazas de fisión es de 26.5 m.a. concordante con edades de K-Ar, pues en el momento de la realización del mismo no se contaba con los vidrios estándares.

Para el conteo de las trazas de la apatita de la toba Fish Canyon se utilizó el método de la población, debido al tamaño de los cristales (200-600 micras), figura (13).

Para realizar los experimentos de laboratorio se dividió la muestra de estándar en dos grupos A y B, el grupo A se reservó para calcular la densidad de trazas fósiles ( $p_f$ ), el otro se sometió a calentamiento continuo durante 5 horas, a una temperatura de 500°C, para con esto obtener un bombardeo total de trazas fósiles, posteriormente se sometió al grupo B a un flujo de neutrones térmicos durante 110 segundos en el reactor nuclear del ININ, en Salazar, México (Salazar, comunicación personal).

Los dos grupos de cristales fueron pulidos y grabados en HNO<sub>3</sub> al 5% durante 80 segundos y temperatura ambiente. El siguiente paso consistió en el conteo de trazas fósiles en el grupo A, e inducidas en el grupo B para determinar  $p_f$  y  $p_i$  respectivamente.

## RESULTADOS OBTENIDOS.

Los resultados obtenidos en el conteo de trazas en la apatita estándar con el método poblacional son los siguientes:

$$p_1 = 1.4 \times 10^5 \text{ trazas / cm}^2$$

$$p_2 = 1.75 \times 10^5 \text{ trazas / cm}^2$$

y conociendo que la edad del estándar es de 28.5 m.a de la ecuación de la edad se tiene :

$$t = 5 \cdot 10^{-8} \cdot p_2 / p_1 \cdot \phi$$

sustituyendo valores y despejando  $\phi$  se obtiene :

$$\phi = 1.125 \times 10^{14} \text{ neutrones/cm}^2 \cdot \text{s}$$

siendo este el flujo de neutrones térmicos utilizado para la realización de este trabajo.

### D) MÉTODO DE LA POBLACION - SUSTRACCION.

Para obtener la edad de la apatita del Cerro de Mercado por el método de la población-sustracción, se trituró un cristal de apatita hasta obtener un tamaño entre 75 y 250 micras, el procedimiento de montaje, pulido y grabado fue el mismo que se aplicó en el método del detector externo y en el de la población.

La muestra se dividió en dos grupos A y B, el grupo A se reservó para obtener la densidad de trazas fósiles, el grupo B se irradió en el reactor nuclear para producir fisiones inducidas.

Ambos grupos se grabaron simultáneamente obteniendo en el grupo A la densidad de trazas fósiles y en el grupo B la densidad de trazas fósiles más inducidas. Posteriormente la densidad de trazas inducidas se obtiene sustrayendo las trazas fósiles del grupo A de la densidad

de trazas fósiles más inducidas del grupo B.

#### RESULTADOS OBTENIDOS.

La densidad obtenida en el grupo A, es decir, la densidad de trazas fósiles fue :  $p_a = 1.1109 \times 10^9$  trazas /  $cm^2$

mientras que la densidad de trazas fósiles más inducidas calculada en el grupo B fue :  $p_a + p_i = 2.415 \times 10^9$  trazas /  $cm^2$

de esta manera la densidad de trazas inducidas se obtuvo de :

$$p_i = (p_a + p_i) - (p_a)$$

$$p_i = 2.415 \times 10^9 - 1.1109 \times 10^9$$

$$p_i = 1.355 \times 10^9 \text{ trazas / } cm^2$$

La edad final obtenida con este método fue de  $30.06 \pm 4.22$  millones de años .

#### e) CONTEO DE TRAZAS Y ESTADISTICA

El conteo de trazas tanto fósiles como inducidas se realizó en un microscopio óptico con un objetivo de inmersión de 125 x. El ocular utilizado fue de 10x, por lo que las trazas fueron observadas a una amplificación real de 1250 aumentos.

El observar las trazas a menor o mayor aumento depende de las condiciones de grabado, esto es, si se graba con un mayor tiempo al que se usó en este trabajo, las trazas serán visibles a menores aumentos (a unos 500x), sin embargo, algunas trazas se deformarán por efecto del grabado llegando a verse afectada la superficie pulida. La retícula utilizada en el conteo tiene 1 cm por lado y se divide en 4 pequeños cuadros, cada uno de ellos con 0.5 cm por lado. El área real que se observa con la retícula y el objetivo de 125 x es de  $1.74 \times 10^{-6} cm^2$ .

La estadística utilizada es la que se menciona en el capítulo VII.

#### f) DISCUSION

Definitivamente se observó que existe una diferencia en el registro de trazas tanto fósiles como inducidas en cada plano cristalino, esto probablemente debido a la anisotropía de grabado con respecto al

arreglo cristallino de cada una de ellas. Esto quiere decir que la densidad de trazas observadas es función además de los elementos mencionados anteriormente en este trabajo, del ángulo de corte, como se muestra en la tabla (4). Es importante hacer notar que estas variaciones también se ven influenciadas por la agudeza visual de cada investigador. Como se ve en la figura 24, se efectuaron conteos de los mismos cristales por diferentes observadores, resultando una diferencia considerable en las densidades calculadas, sin embargo, ambos conteos siguen la misma tendencia como se muestra en la figura 23. Este error se elimina si las trazas fósiles e inducidas son contadas por el mismo investigador. Esta variación de registro de trazas según la orientación del ángulo de corte tiene efectos directos en el cálculo de la edad (Tabla 5 y figura 23).

Sin embargo, al calcular la edad promedio utilizando las edades obtenidas de cada una de las superficies, se determinó una edad de  $31.27 \pm 4.8$  m.a. la cual concuerda notablemente con la esperada, esto significa que el error por detección se reduce haciendo varias mediciones en diferentes superficies del mismo cristal.

Lo anterior se confirmó al datar la misma apatita con el método de la población-substracción, pues al triturar la muestra y montar varios granos en una misma lámina, se aseguró tener una gran variedad de orientaciones cristalográficas al azar, y al calcular la edad de cada una de ellas el error por detección se redujo, como consecuencias se obtuvo una edad de  $30.63 \pm 4.8$  m.a.

Es importante hacer notar que en el método del detector externo las densidades de trazas fósiles e inducidas se deben contar en la misma área, pues en la gran mayoría de los casos, los minerales presentan una distribución heterogénea de uranio.

En el desarrollo y determinación de la edad de la apatita del Cerro de Mercado por el método del detector externo los conteos de trazas fósiles e inducidas no se llevaron a cabo en la misma área, es decir, no se siguió el procedimiento establecido para la obtención de la edad, pues los conteos se realizaron en varias áreas y no en una sola como ortodoxamente se debe aplicar el método. Sin embargo, las edades

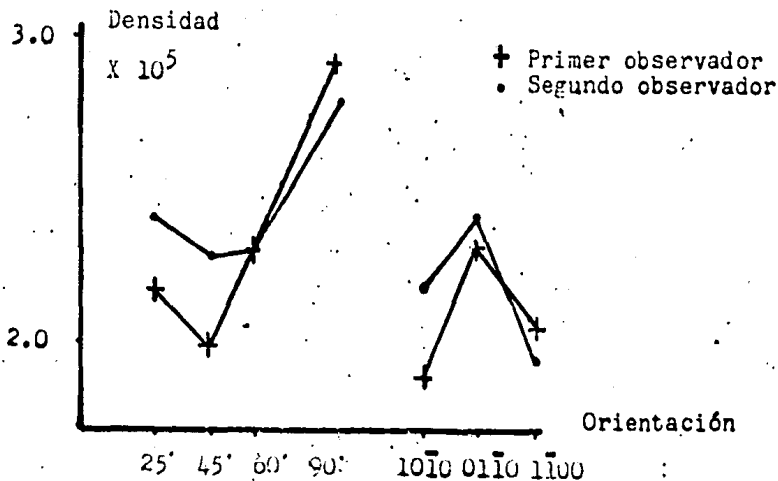
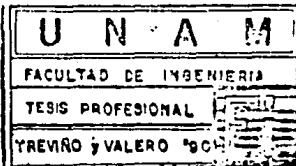


Figura 24. Gráfica donde se muestra la diferencia de registro de trazas según la orientación de la cara y según el observador. Las densidades de trazas son de fósiles mas inducidas en la apatita del C. de Mercado.



obtenidas con este procedimiento no significan que no sean correctas. Por el contrario, son correctas porque a diferencia de muchas otras muestras de apatita, la apatita del Cerro de Mercado tiene una extraordinaria homogeneidad en la concentración de uranio. Por esta razón el hacer los conteos de trazas ( fósiles e inducidas ) en diferentes áreas, no significó fuente de error. Esto se confirmó al calcular la edad de la misma apatita con el método de la población-substracción y obtener una edad notablemente parecida con la esperada .



## XI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### a) CONCLUSIONES

Las muchas y variadas aplicaciones del método de fechado por trazas de fisión hacen que tenga un atractivo especial para los geocronólogos y esto se demuestra en la gran cantidad de trabajos de aplicación de esta técnica en todo el mundo.

Durante el trabajo desarrollado en las apatitas del Cerro de Mercado se observó que existe una variación en el registro de densidades de trazas tanto fósiles como inducidas dependiendo de la orientación de la superficie del cristal. Esta variación es debida probablemente a que existe una anisotropía de grabado con respecto al arreglo cristalino de las superficies. Sin embargo, este efecto ha sido poco estudiado a la fecha. El reflejo de esta variación tiene efectos directos en las edades calculadas ya que éstas se obtienen directamente del conteo de las densidades de trazas.

Para hacer el cálculo de la edad se utilizó la media estadística de las edades de cada uno de los cristales, obteniendo con ello una edad compatible con las edades obtenidas anteriormente por K-Ar ( $31.27 \pm 2.8$  m.a.). Esto hace suponer que el error por detección se reduce cuando se utilizan varias superficies con diferentes orientaciones del mismo cristal. Lo anterior se comprobó cuando se aplicó el método población - sustracción con el cual se obtuvo una edad de  $30.63 \pm 4.22$  m.a.

El método de fechado por trazas de fisión presenta ventajas y desventajas, dentro de las primeras se pueden mencionar las siguientes:

1) Bajo costo, ya que sólo se necesita obtener una lámina delgada de muestra para aplicar el método.

2) El rango de aplicación del método es amplio ya que se pueden obtener edades muy jóvenes hasta edades del Sistema Solar.

3) Se aplica a una gran cantidad de materiales (Cristales y vidrios).

4) Se puede utilizar cuando el método de  $^{14}\text{C}$  deja de ser preciso ( $4 \times 10^4$  años) y hasta donde el método de K-Ar deja de ser laborioso ( $1 \times$

10<sup>6</sup> años)

- 5) Se pueden datar muestras muy pequeñas, (mayores de 75  $\mu$ ).
- 6) Se obtiene una edad de cada cristal o grano.
- 7) Las edades son relativamente fáciles de obtener.

Por otro lado las desventajas presentes en el método son las siguientes:

- 1) En ocasiones es difícil datar muestras muy jóvenes ( $t < 1 \times 10^5$  años).
- 2) Cuando una muestra presenta bajas concentraciones de uranio el método es difícil de aplicar.
- 3) Cuando el tamaño del cristal es menor de 75  $\mu$  el trabajo se dificulta.

4) Cuando una muestra presenta borrado parcial de trazas las edades que se obtienen son anómalas, por lo que es necesario aplicar la corrección de la meseta.

5) Se necesita tener acceso a un reactor nuclear, en México existe sólo un reactor nuclear el cual se encuentra en el ININ, Salazar, México. Existen diferentes campos donde se puede aplicar el método de trazas de fisión, las principales ciencias en donde se utiliza son las siguientes:

Geología: reconstrucción de historias térmicas (Balcazar, 1990) determinación de velocidades de levantamientos corticales, velocidades de apertura del suelo oceánico y evaluación de cuencas sedimentarias, entre otras.

Antropología: Datación de instrumentos hechos por el hombre, determinar la autenticidad de reliquias arqueológicas (vasijas, esculturas, armas, etc.)

Ciencias del espacio: Datación de meteoritos y tectitas y datación de muestras lunares.

El hecho de que la apatita del Cerro de Mercado haya sido fechada por trazas de fisión y por correlaciones de edades <sup>40</sup>K-<sup>40</sup>Ar anteriormente, y el que estos resultados sean concordantes con los 30 m.a. esperados, significa que el procedimiento tanto experimental como estadístico fueron correctos y los errores mínimos.

Como la apatita del Cerro de Mercado es parte de la paragénesis del yacimiento, pues las relaciones texturales así lo indican, se puede concluir que la edad de formación de la mena de hierro es de 30 m.a.

Un nuevo campo de aplicación de la técnica es la evaluación de cuencas petroleras. de esta manera se cree que la implantación del método puede ser de mucho valor para nuestro país ya que es de sobra decir lo importante que es la industria petrolera en México. Este tipo de estudios es mucho más complicado de lo que se cree y el hecho de que ya se pueda aplicar este método para fechar, es el primer paso de una larga etapa de aprendizaje sobre la técnica.

#### b) RECOMENDACIONES .

a) Si se desea fechar un megacristal, existe el problema de elegir la superficie a estudiar ya que se sabe que existe una variación de densidad con respecto a la orientación del corte, por lo que es recomendable triturar el cristal y aplicar el método de la población .

b) Las trazas fósiles e inducidas deben ser contadas en la misma superficie del cristal y por el mismo observador.

c) El borrado de trazas facilita la metodología de trabajo. al irradiar la muestra después del borrado se simplifica el conteo ya que sólo se grabarán trazas inducidas.

d) Se recomienda aplicar un flujo de neutrones del orden de  $10^{10}$  neutrones/cm<sup>2</sup>/s pues garantiza un número de fisiones suficientes para ser contadas, además de que ayuda a determinar la imagen del cristal en la superficie del detector externo.

e) Debe tenerse cuidado en las etapas de montaje y pulido ya que los resultados dependen en cierta manera de este proceso. Se recomienda que el montaje se efectúe con alguna resina que no sea exotérmica pues como se mencionó anteriormente la estabilidad de la traza depende principalmente de la temperatura. Es necesario, dejar una superficie plana y con el menor número posible de defectos pues éstas pueden ser confundidas con trazas después del proceso de grabado.

f) Las condiciones de grabado deben ser constantes, esto porque la densidad de trazas puede variar considerablemente. Las superficies donde se contarán las trazas fósiles e inducidas se deben grabar simultáneamente para evitar errores.

g) Se recomienda utilizar vidrios estándares en un fechamiento posterior, ya que con el uso de estos se obtiene una mayor precisión en la valoración de las edades.

## BIBLIOGRAFIA.

Anderson, R.N. 1981. Cenozoic Motion of the Cocos Plate relative to the Asthenosphere and cold spots. *Geol. Soc. Amer. Bull.* V.85, p. 165-180.

Atwater, T., 1970. Implications of Plate Tectonics for Cenozoic Tectonic evolution of Western North America. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, V.81, p.3513-3536.

Balcázar, G.M., 1970. Aplicaciones de Solid State Nuclear Track Detectors to Nuclear Physics and Dosimetry. PhD Thesis, The University of Birmingham.

Balcázar, G.M., 1983. Versatile Irradiation Chamber to perform experiments with SSNTD. *The Nucleus* 20, p.73 .

Balcázar, G.M., 1990. Posible evaluación del Potencial Petrolero por Trazas de Fisión en apatitas. V Seminario IMP-IIIE-ININ sobre Especialidades Tecnológicas. Cuernavaca Morelos, Mayo 1990.

Balcázar, G.M., 1990. Curso de Posgrado. Facultad de Ingeniería UNAM. México D.F., inédito.

Bhandari, S.G., Lal, I.G., Rajagdasan, A.S., Tambhane, A.S. and Venkatavaradan, V.S., 1971. Fission fragment tracks in Apatite: Recordable track lengths. *Earth Planet. Sci. Lett.* 13, p. 191-199.

Bignazzi, G., 1981. The problem of the decay constant  $\lambda_{df}$  of Uranium-238. *Nuclear Tracks*, 5, p. 35-44.

Chailion, D. and Chambaudet, A., 1984. Statistics on Uranium fission-track counting. *Geoph. Res. Lett.*, V.11, p. 65-72.

Clark, F.F., Damon, P.E., Schutte, S.R. and Shaffiqullah, M., 1978. Magmatismo en el norte de México en relación con los yacimientos metalíferos. *Geomimet*, No. 106, p. 40-71.

Coney, P., 1976. Plate tectonics and the Laramide Orogeny New Mexico. *Geological Society Spetial Publication*. No 6, p. 5-10.

Coney, P.J. and Reynolds, S.J., 1977. Cordilleran Benioff Zone. *Nature* 5, V.270, p. 340-362.

Crozac, G., Haack, U., Hair, M., Maurette, M., Walker, R. and Woolum, D., 1970. Nuclear tracks studies of ancient Solar radiations and dynamic Lunar surface processes. *Proc. Apollo 11 Lunar. Sci. Conf.* 3. 2051-2080. New York.

de Fleischer et. al. 1975.

Dante, J.M.Z., 1984. Geología de la República Mexicana. INEGI-UNAM, México D.F., p. 1-27.

Demant, A. and Robin, C., 1975. Las fases del vulcanismo en México: una síntesis en la relación con la evolución geodinámica en el Cretácico. Revista del Instituto de Geología, UNAM. No. 75 (1), p. 70-83.

Durrani, S.A. and Bull, R.K., 1987. Solid State Nuclear Track Detection. Pergamon Press, 1a. Edición, 304 p.

Faure, G., 1977. Principles of Isotope Geology. John Wiley and Sons, New York, 464 p.p.

Fleischer, R.L. and Price, P.B., 1964. Techniques for geological dating of minerals by chemical etching of fission fragment tracks. Geochim. Cosmochim. Acta 28, p. 1705-1714.

Fleischer, R.L. and Price, P.B., 1964a. Decay constant for spontaneous fission of U-238. Phys. Rev. 130, B63-4.

Fleisher, R.L., Price, P.B. and Walker, R.M., 1975. Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications. University of California Press, Berkley, USA., 605 p.p.

Fleisher, R.L., Price, P.B. and Walker, R.M., 1965. The ion explosion spike mechanism for formation of charge particle track in solids. J. Appl. Phys., 36, 3645-4652.

Flerov, G.N. and Petrzhal, N.A., 1940. Spontaneous fission of uranium. J. Phys. USSR 3, 275-280.

Frederikson, G., 1974. Geology of the Mazatlan Area, Sinaloa, western Mexico. Ph. D. Dissert., Austin, University of Texas, 209 p. (Int McDowell and Keiser, 1977, p. 1480).

Gabelman, J.W. and Knevzevski, S.V., 1969. Regional Metallotectonic zoning in Mexico. Soc. Mining Eng. A.I.M.E. Trans., V. 24, p. 113-128.

Gastil, G., Morgan, G. and Krummenacher, D., 1981. The Tectonic History of Peninsula California. (In: Dante-Moan, 1984, p. 12).

Gerling, E.J., Schukolyulov, Y.A. and Makarochin, B.A., 1959. Determination of the Half life of the spontaneous uranium-238 disintegration from the helium content of uranium minerals. Radiokhimiya 1, 223-226.

Gleadow, J.W. and Duddy, I.R., 1981. A natural long term track annealing experiment for apatite. Nuclear Tracks, 5, p. 169-174.

Green, P.F., Iuddy, I.R., Gleadow, A.J.W., Tingate, P.R. and Laslett, G.M., 1985, Fission Track annealing in Apatite: Track Length measurements and the form of the Arrhenius plot. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, V.10, p. 323-328.

Henry, C.D., 1972, K-Ar Chronology of the Granitic Batholithic complex, Sinaloa, Mexico. M.A. Tesis. (In McDowell and Keiser 1977, p.1481).

Henry, C.D., 1975, Geology and Geochronology of the Granitic Batholithic complex, Sinaloa, Mexico. Ph.D. Disert. (In McDowell and Keiser 1977, p. 1481).

Hurford, A.J. and Green, P.F., 1981, Standards, dosimetry and the Uranium 238 decay constant: A Discussion. Nuclear Tracks, 5, p. 73-75.

Khan, H.A. and Durrani, S.A., 1980, Measurements of spontaneous fission decay constant of U-238 with mica solid state track detector. Radiat. Effects 17, p. 133-135.

Krishnaswami, S., Lal, P., Prambhu, N. and Tamhane, S., 1971, Olivines: Revelation of tracks of charged particle. Science 174, p. 287-291.

Lal, D., Muralli, A.V., Rajan, E.S., Tamhane, A.S., Lorin, J.C. and Fellac, P., 1968, Techniques for proper revelation and viewing of etch-tracks in meteoritic and terrestrial minerals: Earth and Planetary Sciences Letters, V.5, p. 111-119.

Lyons, J.I., 1988, Volcanogenetic Iron Ore of Cerro de Mercado and its setting within the Chupaderos Caldera, Durango, Mexico. Econ. Geol., V. 83, 1886-1906.

McDougall, J.D., 1976, Fission Track Dating., Scientific American, V. 235, No. 6, p. 114-122.

McDowell, F.W. and Clabaugh, S.E., 1979, Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation with the tectonic history of western Mexico. Geol. Soc. Amer. Special Paper 180, p. 113-124.

McDowell, F.W. and Keiser, P.R., 1977, Timing of Mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlan, Mexico. Geol. Soc. Amer. Bull., V.78, p. 1479-1487.

Naeser, C.W. and Dodge, C.W.F., 1969, Fission track age of accessory minerals from granitic rocks of the Central Sierra Nevada Batholithic, California. Geol. Soc. Amer. Bull. 80, p. 2201-2212.

Naeser, C.W., 1976, Fission track dating. U.S. Geol. Survey, Open File Report 70-180.

Naeser, C.W. and Fleisher, R.L., 1970. Age of the youngest lava del Mercado, Mexico: A problem for fission track annealing corrections. *Geophysical Research Letters*, V. 1, p. 47-50.

Naeser, C.W., Zimmerman, R.A., and Gebula, G.T., 1981. Fission track dating of apatite and zircon: an interlaboratory comparison. *Earth Tracks*, V.5, p. 65-72.

Naeser, C.W., 1983. Fission track dating of Quaternary events. *Geol. Soc. of Amer. Special Paper* 217, p.1-11.

Price, P.B. and Walker, R.M., 1962. Fossil tracks of charged particles in mica, and the age of minerals. *Journal of Geophysical Research*, V.69, No.16, p. 4847-4861.

Price, P.B. and Walker, R.M., 1962a. Observation of fossil particle tracks in natural mica. *Nature* 196, p. 732.

Price, P.B. and Walker, R.M., 1962b. Chemical Etching of charged particle tracks. *J. Appl. Phys.* 33, p. 3407-12.

Raz, E., 1964. Landforms of Mexico. 2nd. ed. Cambridge Univ. Press, de McMillan, Leipzig, 1970.

Roberts, J.W., Gold, R. and Arment, P.L., 1970. Spontaneous fission decay constant of uranium-238. *Phys. Rev.* 174, 1402-4.

Sill, E.C.W. and Barnes, R.F., 1957. Elimination of fission fragment tracks with an electron microprobe. *Science*, Mag. 4, 370-371.

Spädevelter, A. and Hahn, E., 1967. Die Rotationszähler und einige Anwendungen. *Helv. Phys. Acta*, 40, 1053-1059.

Strooper, D. and Wagner, G.A., 1969. Correction of thermal lowered fission track age of tellurite. *Earth Planets. Sci. Lett.* 5, p. 461-469.

Strooper, D. and Feld, M., 1984. Toward a new tool in hydrocarbon resource evaluation: the potential of the apatite fission track chronothermometer. I.F.F. Techn. Pamphlet.

Swanson, E.R., Keizer, R.F., Lyons, J.I. and Clough, P., 1978. Tertiary volcanism and tectonic development near Inveready Hill, Sierra Madre Occidental, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 89, p. 1177-1189.

Thiel, F. and Herr, W., 1976. The uranium-238 spontaneous fission decay constant redetermined by fission tracks. *Earth Planets. Sci. Lett.* 30, 50-6.



Young, E. J., Myers, A.T., Hanson, E.L. and Conklin, N.M., 1969. Mineralogy and geochemistry of fluorapatite from Cerro de Mercado, Durango, Mexico; U. S. Geol. Survey Prof. Paper 650-D, p. D84-D93.

Wagner, G.A. and Reimer, 1973. Fission track length reductions in minerals and the thermal history of rocks. American Nuclear Science Transactions, v.15, p.127-128.