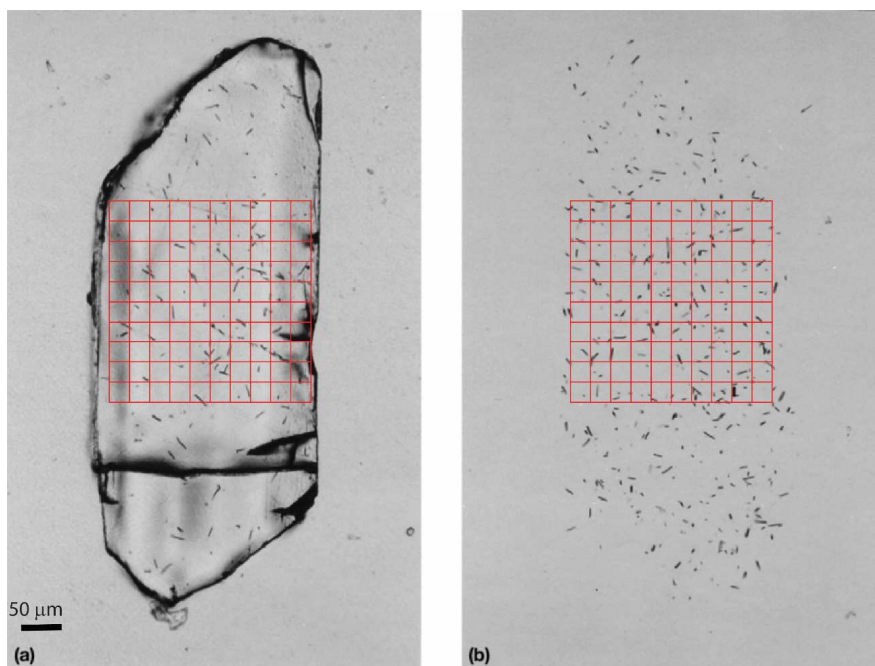




Software: Fast Fission Track Laboratory (FastFTLab)

MANUAL DE USUARIO



Mallas 10×10 utilizadas para contar el número de trazas de fisión espontáneas en el cristal de apatito e inducidas en la mica o detector (Tomada y modificada de Naeser y Naeser, 1989).

Desarrollado por

Oscar Y Vargas Pedraza
Mauricio A Bermúdez Cella
Jorge E Espíndola Díaz

Tabla de contenido

I.	Introducción	3
1.	Objetivo	3
2.	Requerimientos	3
3.	Descripción	3
4.	Instrucciones de Instalación	3
4.1	Prerrequisitos	4
5.	Antecedentes y Fundamentos Teóricos.....	6
	<i>Ajuste de Isócronas</i>	14
	<i>Promedio de los cocientes o "Mean Ratio"</i>	14
	<i>"Pooled Mean"</i>	15
II.	Opciones de la Aplicación FastFTLab	17
6.	Cálculo de edades	17
7.	Cálculo de la afluencia.....	18
8.	Cálculo del factor ζ	20
9.	Radialplot de Galbraith	20
10.	Test de Galbraith	23
11.	Futuros módulos	24
III.	Agradecimientos	25
IV.	Referencias.....	25

I. Introducción

1. Objetivo

Disminuir el tiempo de reducción de datos en los Laboratorios de Datación Termocronología por trazas de fisión mediante el cálculo de la afluencia, el factor de calibración Z, estimaciones de la edad (Pooled, Mean, Central e Isócrona) y error sobre la edad de un mineral usando la técnica de detector externo.

2. Requerimientos

- Computador con procesador Pentium II o superior
- Mínimo 128 Mb de RAM
- Navegador de internet
- Conexión a internet

3. Descripción

El software FastFTLab permite ahorrar tiempo en los laboratorios de termocronología por trazas de fisión en Colombia y en el mundo, principalmente porque facilita el proceso de reducción de los datos obtenidos del método de datación termocronológica por trazas de fisión bajo la modalidad de la técnica del detector externo (Wagner y van den Haute, 1992).

4. Instrucciones de Instalación

El software FastFTLab fue desarrollado con el propósito para correr como una aplicación dentro de un servidor, de forma tal que el usuario no tenga que instalar ninguna librería ni programa, el software fue desarrollado en el lenguaje open source Python®. Python está desarrollado bajo una licencia de código abierto aprobada por la Open Source Initiative (OSI; <https://opensource.org/licenses>), lo que hace que se pueda utilizar y distribuir libremente, incluso para uso comercial. La licencia de Python es administrada por la Python Software Foundation (<https://www.python.org/>).

Una vez se tenga formalmente el servidor en una página web no hará necesidad de instalar el programa, sin embargo, se proporcionan a continuación las instrucciones para su instalación.

FastFTLab es un software que corre usando lenguajes de programación de acceso libre o abiertos como Python. Para instalarlo la primera vez de forma individual en su computadora bajo ambiente Windows siga las siguientes instrucciones.

4.1 Prerrequisitos

Instale Anaconda en cualquiera de sus versiones Anaconda2 o Anaconda 3

Para esto vaya a: <https://docs.anaconda.com/anaconda/install/windows/>

Presione sobre 1. Download the Anaconda installer

Doble click sobre el instalador para comenzar la instalación

Una vez instalado Anaconda2 o 3, es necesario instalar las siguientes librerías

Django

Bootstrap4.0

pyRadialPlot-0.4

pdfkit

wkhtmltopdf para Windows (<https://wkhtmltopdf.org/downloads.html>)

Para Django, Bootstrap4.0, pyRadialPlot-0.4 y pdfkit la instalación se hace directamente desde el command prompt de Anaconda. Ir a Inicio->AnacondaX->Anaconda Prompt (Anaconda)

Una vez en el Anaconda Prompt tipear lo siguiente para instalar el Django:

```
Conda install -c anaconda django
```

Bootstrap4.0

```
conda install -c conda-forge django-bootstrap4
```

El pyRadialPlot-0.4 viene en el interior de la carpeta FastFTLab, colocar la carpeta descomprimida de FastFTLab entrar al directorio pyRadialPlot-0.4 moviéndose dentro del Anaconda command prompt y tipear:

```
python setup.py install --user
```

Para el pdfkit, en el mismo Anaconda command prompt

```
pip install pdfkit
```

El pdfkit necesita de otra librería llamada wkhtmltopdf, pero para instalarla en Windows es necesario descargar el archivo binario (.exe) de <https://wkhtmltopdf.org/downloads.html>

Una vez lo descargue y lo instale mediante doble click es necesario registrar el valor en el entorno de variables de Windows, siga con mucho cuidado las instrucciones en: <https://parzibyte.me/blog/2019/10/29/guia-instalacion-wkhtmltopdf/>

Finalmente, para correr FastFTLab, entre al directorio FastFTLab mediante el Anaconda command prompt y tipee la siguiente instrucción:

```
python manage.py runserver
```

si no hay problemas en la instalación debería salir el siguiente mensaje:

```
C:\Users\mabc8\FastFTLab\Infelplot\views.py changed, reloading.  
Watching for file changes with StatReloader  
Performing system checks...  
  
System check identified no issues (0 silenced).  
May 26, 2021 - 18:28:48  
Django version 2.2.5, using settings 'Infelplot.settings'  
Starting development server at http://127.0.0.1:8000/  
Quit the server with CTRL-BREAK.
```

En un navegador tipee la dirección que indique la ventana de Anaconda, en este caso 127.0.0.1:8000, ya el software está listo para trabajar.

Es posible que la primera vez salga un mensaje de warning indicando algo como lo siguiente:

```
You have 13 unapplied migration(s). Your project may not work properly until you apply the migrations for app(s)
```

En ese caso tipee lo siguiente:

```
Python manage.py migrate
```

NOTA: Todo lo anterior debe hacerlo una sola vez, si está abriendo el programa después de haber seguido los pasos anteriores sólo debe entrar al directorio FastFTLab y tipear:

```
python manage.py runserver
```

5. Antecedentes y Fundamentos Teóricos

La Técnica del Detector Externo (TDE) fue propuesta por Hurford y Green (1983), también se le conoce como Factor de Calibración ζ , como respuesta a una necesidad existente en la década de los ochenta en distintos laboratorios de termocronología que no tenían facilidad de irradiación de muestras en reactores nucleares.

Cuando los laboratorios tienen acceso directamente a reactores nucleares, puede emplearse directamente la ecuación práctica de edad (Bermúdez et al., 2005), la cual se deriva de la Ecuación Fundamental de Edad (EFE) del decaimiento radioactivo.

Sabiendo que el elemento radioactivo ^{238}U puede decaer de dos formas (Faure, 1986): por fisión nuclear y por emisión de partículas alfa (α), la constante de decaimiento total λ_d , viene dada por:

$$\lambda_d = \lambda_\alpha + \lambda_f$$

donde λ_α y λ_f son las constantes de decaimiento por emisión de partículas alfa y por fisión nuclear respectivamente. ($\lambda_\alpha = 1,55125 \times 10^{-10} \text{ años}^{-1}$ y $\lambda_f = 8,46 \times 10^{-17} \text{ años}^{-1}$)

Para determinar el número total de átomos de ^{238}U que han decaído según la Ecuación Fundamental de Edad (EFE) es necesario considerar aditivamente una expresión para cada tipo de decaimiento:

$$D = D_\alpha + D_f = \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_d} {}^{238}\text{N} [\exp(\lambda_d t) - 1] + \frac{\lambda_f}{\lambda_d} {}^{238}\text{N} [\exp(\lambda_d t) - 1] \quad (1)$$

En esta expresión ^{238}N es el número total de átomos de ^{238}U que están por decaer. De esta ecuación sólo es de interés la parte referente a la fisión nuclear, es decir, el segundo sumando. Asumiendo que cada átomo que se fisiona produce una huella espontánea, ($D_f = N_s$). Se tiene que:

$$N_s = \frac{\lambda_f}{\lambda_d} {}^{238}\text{N} [\exp(\lambda_d t) - 1] \quad (2)$$

Como el decaimiento por fisión nuclear es menor en siete órdenes de magnitud que el decaimiento por emisión de partículas alfa, puede decirse que $\lambda_d \approx \lambda_\alpha$ y, por lo tanto:

$$\frac{\lambda_f}{\lambda_d} \approx \frac{\lambda_f}{\lambda_\alpha}.$$

Despejando t de la ecuación (2) se obtiene:

$$t = \frac{1}{\lambda_{\alpha}} \ln \left(\frac{\lambda_{\alpha}}{\lambda_f} \frac{N_s}{^{238}N} + 1 \right) \quad (3)$$

En esta última ecuación, la variable que interesa conocer es t , y ésta depende de otras dos variables: el número de huellas espontáneas N_s y el número total de átomos ^{238}N al momento de fechar la roca. A partir de esta observación surge un problema matemático sencillo, determinístico (Bermúdez, 2002; Bermúdez et al., 2005), ya que hay dos variables desconocidas, éstas son: t y ^{238}N .

El conocer sólo N_s y desconocer ^{238}N equivale a desconocer, en la figura 1, cuál curva C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) que depende del valor ^{238}N representa el fenómeno particularmente estudiado.

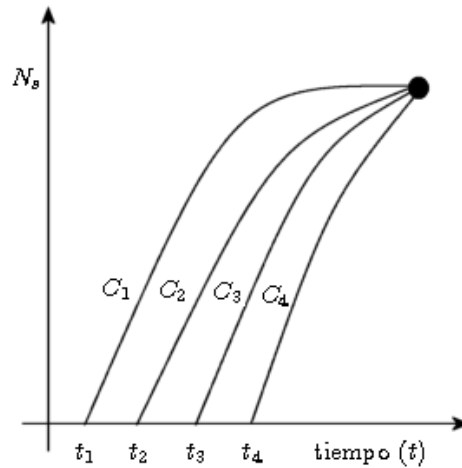


Figura 1: Problema determinístico derivado de la EFE.

(Tomado de Bermúdez, 2002)

Para poder hallar un único valor de t , es necesario al menos estimar ^{238}N . En la sección que sigue se explica cómo se procede para ello.

4.1 Huellas de fisión inducidas

La metodología estándar para obtener un estimado de ^{238}N es por medio de la irradiación de los minerales en un reactor nuclear (Wagner y Van Den Haute, 1992). Este procedimiento produce un decaimiento radioactivo por fisión nuclear generando huellas inducidas, las cuales se denotarán como N_i . Este número guarda estrecha

relación con la N en la ecuación (3). A nivel práctico no es sencillo obtener N_i , por lo tanto, a continuación, se darán algunos detalles de este procedimiento.

La fisión es generada por la colisión entre el flujo de neutrones ϕ y los átomos de ^{235}U debido a que la sección transversal σ de estos últimos es mayor a los de ^{238}U , usando la relación dada por:

$$N_i = {}^{235}\text{N} \sigma \phi \quad (4)$$

En virtud de que el cociente entre el número de átomos de ^{235}U y ^{238}U es constante (Wagner y Van Den Haute, 1992) es decir,

$$\frac{{}^{235}\text{N}}{{}^{238}\text{N}} = k$$

la ecuación (5) quedaría como:

$$N_i = {}^{238}\text{N} k \sigma \phi .$$

Al sustituir esta última en la ecuación (3) se obtiene una expresión para determinar la edad de la roca:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left(\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_f} \frac{N_s}{N_i} k \sigma \phi + 1 \right) \quad (5)$$

Así, es posible obtener la edad de la roca si se determinan el número de huellas espontáneas N_s , el número de huellas inducidas N_i y la afluencia de neutrones ϕ .

Para registrar las huellas inducidas N_i , se emplea un detector, el cual consiste en una mica de bajo contenido de uranio en contacto cerrado sobre la superficie de los granos previamente pulidos. En este detector, se graban las huellas inducidas producto de la irradiación en el reactor. Considerando la siguiente relación para la densidad superficial de huellas espontáneas ρ_s e inducidas ρ_i según sea el caso.

$$\rho_{s,i} = g_{s,i} N_{s,i} R_{s,i} \eta_{s,i} f(t)_{s,i} q_{s,i} \quad (6)$$

donde:

$g_{s,i}$ = factor de geometría

$N_{s,i}$ = número de huellas

$R_{s,i}$ = rango o longitud de las huellas

$\eta_{s,i}$ = factor de eficiencia de grabado

$q_{s,i}$ = factor de observación

$f(t)_{s,i}$ = factor de tiempo o de grabación prolongada

El factor de geometría $g_{s,i}$ tiene dos valores dependiendo de cómo se coloque el detector sobre la muestra, es decir:

$$g_{s,i} = \begin{cases} 1 & \text{Si cubre la parte superior del mineral.} \\ 2 & \text{Si no lo cubre.} \end{cases}$$

en el caso $g = 1$ se dice que la superficie es interna, y en el otro caso se dice que es externa (Wagner y Van Den Haute, 1992). En la figura 2 se aprecia cómo es colocado el detector sobre un grano del mineral apatito no alterado, según la geometría externa.

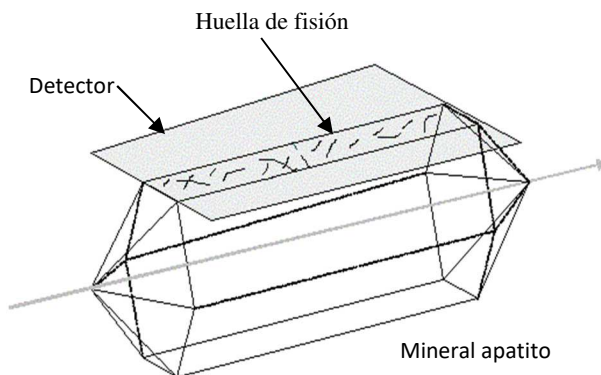


Figura 1. 1: Arreglo del detector según la geometría externa.

(Tomado de Bermúdez, 2002)

En la figura 3 pueden observarse las huellas espontáneas sobre un grano de circón y las huellas inducidas en la mica colocada sobre el grano.

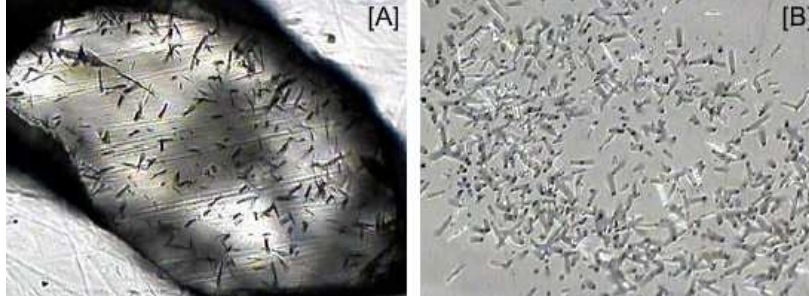


Figura 3. (A) Huellas de fisión espontáneas sobre un grano de circón, (B) sobre la mica.

(Tomada de Bermúdez et. al., 2004)

El factor de eficiencia de grabado $\eta_{s,i}$ es una constante que depende del *revelado* o exposición de los granos o de la mica a ácidos con el fin de ensanchar la huella, para poderla observar bajo el microscopio. El factor de observación $q_{s,i}$ también es una constante que depende de la distancia intraocular del observador. Por último, el factor de tiempo prolongado $f(t)$ es otra constante y ésta depende del tiempo empleado para revelar la huella.

Así, despejando N_s y N_i de la ecuación (6) y sustituyendo en (5) se obtiene, la *ecuación de edad para el MHF*:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left(\frac{\lambda_\alpha}{\lambda_f} \frac{\rho_s}{\rho_i} G k Q \sigma \phi + 1 \right) \quad (7)$$

donde $G = \frac{g_i}{g_s}$ se define como el factor de geometría y $Q = \frac{\eta_i f(t)_i q_i}{\eta_s f(t)_s q_s}$ como el

factor de procedimiento (Wagner y Van Den Haute, 1992). Cuando las huellas son reveladas y contadas bajo condiciones idénticas, $Q = 1$.

La expresión (7) aún tiene el problema de que la afluencia de neutrones ϕ para personas que no tienen acceso directamente a un reactor nuclear es desconocida. Para subsanar este problema, según Hurford y Green en 1983, desarrollaron una técnica la cual es conocida como Método de Calibración ζ ó Factor Z.

4.2 Método de Calibración ζ ó Factor Z

Consiste en irradiar varias muestras denominadas estándar, es decir, de edad conocida (t_c) por otros métodos de datación, intercaladas con el detector de bajo contenido de uranio y las muestras de edad desconocida. Asumiendo que la afluencia de neutrones

(ϕ) a utilizar en el reactor nuclear, es proporcional a la densidad (ρ_m) de ^{238}U , presente en el detector, se obtiene la siguiente relación:

$$\phi = B\rho_m$$

donde B es una constante de proporcionalidad conocida, llamando $\zeta = \frac{kQ\sigma B}{\lambda_f}$, la ecuación de edad (7) puede ser escrita como:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left(\lambda_\alpha \frac{\rho_s}{\rho_i} G \zeta \rho_m + 1 \right) \quad (8)$$

Para la muestra estándar, o de edad conocida (t_c) se tiene una ecuación similar a (1.29) de la cual Z es despejada, así:

$$\zeta = \frac{\exp(\lambda_\alpha t_c) - 1}{\lambda_\alpha \left(\frac{\rho_s}{\rho_i} \right)_c G \rho_m} \quad (9)$$

esta última expresión se conoce como “Factor Z ” o “Factor de Calibración ζ ”. La ecuación (8) es conocida como “Ecuación Práctica de la Edad para el Método de Huellas de Fisión”. En particular, las condiciones $G = \frac{1}{2}$ y $Q = 1$ son las usadas en el Laboratorio de Termocronología de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) para determinar la edad de las rocas.

Las muestras estándares, de edad conocida (Hurford, 2019), son usadas como técnica de calibración dentro del laboratorio, esto permite calcular el factor ζ de la ecuación (1). Los diferentes estándares que se pueden utilizar son los siguientes:

- Apatito de Durango con edades por K-Ar, de $31,4 \pm 0,5$ Ma.
- Apatitos y circones de la toba volcánica Fish Canyon con edad por K-Ar de $27,8 \pm 0,5$ Ma.
- Circones del miembro Buluk con edades por K-Ar de $16,4 \pm 0,2$ Ma.
- Circones de Dromedary Mountains con edades por K-Ar, de $98,7 \pm 0,6$ Ma.
- Circones de la riolita de Tardree con edades por K-Ar, de $58,7 \pm 1,1$ Ma.
- Circones de la toba volcánica Bishop al este de California con edades por K-Ar, de $74,0 \pm 0,6$ Ma.

Técnicas de conteo para estimar densidades

Las densidades de las huellas espontáneas e inducidas ρ_s y ρ_i se obtienen utilizando las siguientes expresiones (Green, 1981):

$$\begin{aligned}\rho_{sj} &= \frac{N_{sj}}{A_{sj}} \\ \rho_{ij} &= \frac{N_{ij}}{A_{ij}}\end{aligned}\quad (10)$$

donde N_{sj} y N_{ij} denotan la cantidad de huellas espontáneas e inducidas contadas en el j-ésimo cristal del mineral accesorio (apatito o circón) y A_{sj} , A_{ij} denotan el área del j-ésimo cristal donde se realizó el conteo de las huellas. Para realizar tal conteo existen diversas técnicas, aquí sólo se mostrará la Técnica del Detector Externo ya que es el más utilizado por los investigadores del área, según la creencia, de que, al contar las huellas inducidas sobre la misma área ocupada por el grano en la mica, no se presentan los problemas de heterogeneidades de uranio en la muestra.

4.3 Técnica del Detector Externo (TDE)

Consiste en tomar un separado de minerales accesorios (apatitos, circones, esfenas, etc.) cementarlos sobre un portaobjetos usando para ello una resina y un endurecedor, y pulirlos con la finalidad de exponer su superficie interna para luego revelar las huellas espontáneas N_s . Luego, este montaje es cubierto con una película de mica de muy bajo contenido de uranio con la finalidad de ser irradiado y así estimar N_i . Separando esta mica del primer montaje y revelándola, se obtienen las huellas inducidas.

Luego con mucho cuidado y precisión pueden ubicarse, sobre los granos, las huellas espontáneas y las huellas inducidas justo en las mismas coordenadas sobre la mica. De esta manera, como las huellas espontáneas e inducidas son contadas exactamente sobre la misma área se tiene, tomando el cociente de las expresiones (10) y sustituyéndolo en la ecuación de edad (8) se obtiene para cada grano de mineral la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}t &= \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln(\lambda_\alpha R G \zeta \rho_m + 1) \\ R &= \frac{N_{sj}}{N_{ij}}\end{aligned}\quad (11)$$

Para el conteo de las huellas espontáneas e inducidas N_{sj} y N_{ij} del j-ésimo cristal se emplea una malla 10×10 (dentro del ocular del microscopio) la cual puede ser

apreciada en la figura 4 para el caso del cristal y la mica. Esta última técnica combina las ventajas de analizar las muestras grano a grano con el hecho de que las huellas espontáneas e inducidas son reveladas y contadas en montajes separados, lo que permite revisar rápidamente los valores de ρ_s y ρ_i , además de discriminar entre fuertes heterogeneidades en las distribuciones de las huellas, las cuales pueden ser imputadas a errores experimentales o a posibles mezclas de eventos tectotérmicos.

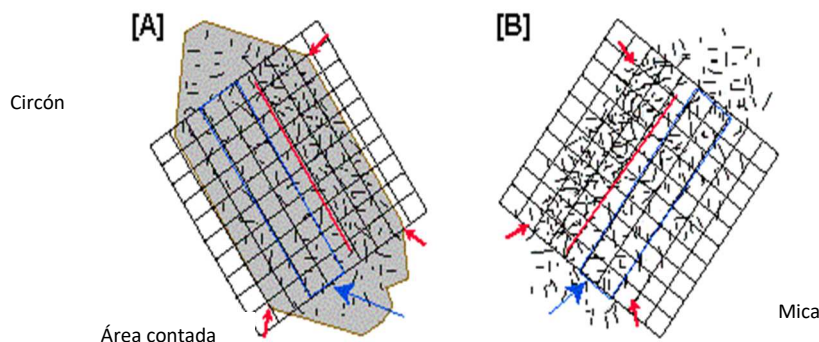


Figura 4. Mallas 10×10 de conteo usadas para estimar ρ_s y ρ_i según la TDE: (A) en un grano de circón, (B) en la mica colocada en contacto cerrado sobre el mismo grano.

(Tomada de Bermúdez *et al.*, 2005)

1.4 Metodología convencional para el cálculo de edades mediante Termocronología por trazas de fisión

La ecuación para determinar la edad de un evento tectotérmico está dada por la expresión (11) mencionada en la sección anterior, pero para poder proporcionar la edad del evento completo y no las edades individuales de los granos es necesario

determinar un estimado del cociente $\left(\frac{N_s}{N_i}\right)$ de esta ecuación. Existen tres estimadores convencionales para determinar la edad del evento: la isócrona, el promedio de los cocientes (mean ratio), el estimador pooled y la edad-central, de éstos el más usado es el pooled y la edad-central, aunque prácticamente es muy poca la diferencia entre ellos, y generalmente sus estimaciones yacen dentro del error estimado sobre la edad (Green, 1981).

La metodología convencional (Bermúdez (2002), Bermúdez (2005)) usada en la mayoría de los laboratorios de Termocronología en el mundo consiste en lo siguiente:

Uso del test de Galbraith para verificar que la muestra que supuestamente proviene de un solo evento tectotérmico rápido proviene de una misma concentración de uranio, es decir, no constituye una mezcla de variables Poisson, si llegara a

presentarse tal mezcla, de acuerdo con la metodología convencional no podría ser calculada la edad ya que se introduciría cierto grado de error sobre esta.

Este test fue propuesto en 1980 (Galbraith, 1981) y se basa en la Distribución Chi-cuadrado (X^2) y el criterio de Pearson's este test se calcula con:

$$X = \sum_{j=1}^n \frac{(N_{sj} - \overline{N}_{sj})^2}{\overline{N}_{sj}} + \sum_{j=1}^n \frac{(N_{ij} - \overline{N}_{ij})^2}{\overline{N}_{ij}}$$

donde:

$$\overline{N}_{sj} = \frac{N_s}{N_s + N_i} (N_{sj} + N_{ij})$$

$$\overline{N}_{ij} = \frac{N_i}{N_s + N_i} (N_{sj} + N_{ij})$$

son los valores ajustados, suponiendo que n es el número de muestras o granos contados. En caso de que los datos provengan de una sola Distribución de Poisson, la X tiene una Distribución X^2 con $n - 1$ grados de libertad. Galbraith sugiere un nivel de confiabilidad de 95%, es decir, $\alpha = 0,05$.

Una vez que la muestra ha sido aceptada de acuerdo a este test, se procede a determinar la edad del evento de acuerdo a los estimados del cociente de la ecuación (11) de la siguiente manera:

1. Cálculo de la edad del evento tectotérmico por los estimadores convencionales:

Ajuste de Isócronas

Consiste ((Green, 1981), (Burchart, 1981)) en hacer una regresión lineal con intercepto igual a cero de los pares (N_i , N_s). Se considera el intercepto igual a cero asumiendo que si no existe ^{238}U no deberían existir huellas. La pendiente de esta recta es considerada como el estimador de R y las incertidumbres para este método pueden ser calculadas de la manera usual.

Esta pendiente es sustituida por el cociente $\left(\frac{N_s}{N_i} \right)$ en la ecuación (11).

Promedio de los cocientes o "Mean Ratio"

Consiste (Green, 1981) en tomar el promedio de los cocientes $\frac{N_s}{N_i}$, es decir:

$$\overline{\left(\frac{N_s}{N_i}\right)} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{N_{sj}}{N_{ij}}$$

Nuevamente este estimador es sustituido por el cociente $\left(\frac{N_s}{N_i}\right)$ en la ecuación 4.1 y se obtiene la edad mean ratio del evento.

“Pooled Mean”

Consiste (Burchart, 1981) en dividir el total de las huellas espontáneas entre el total de las huellas inducidas, es decir:

$$\overline{\left(\frac{N_s}{N_i}\right)} = \frac{\sum_{j=1}^n N_{sj}}{\sum_{j=1}^n N_{ij}}$$

Análogamente que en los dos casos anteriores este estimador es sustituido por el cociente:

$$\left(\frac{N_s}{N_i}\right)$$

En la ecuación (11) y se obtiene la edad pooled del evento.

Edad Central.

La edad central es calculada usando un algoritmo específico (Galbraith & Laslett, 1993; Galbraith, 2005), el cual toma el peso (w_j) sobre las observaciones N_s y N_i . Así el estimado de R está dado por:

$$\bar{R} = \frac{\eta}{1-\eta}$$

donde:

$$\eta = \frac{\sum_{j=1}^n w_j N_{sj}}{\sum_{j=1}^n w_j}$$

Actualmente, este es el estimador más utilizado para la ecuación de edad porque en muchos casos converge numéricamente al estimador de máxima verosimilitud para el cociente R (Galbraith, 2005).

Cálculo del error sobre la edad estimada

Seguidamente al cálculo de la edad, se determina el error (Galbraith, 2005) sobre la edad estimada utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma(t) = t \sqrt{\frac{1}{N_s + 0,5} + \frac{1}{N_i + 0,5} + \frac{1}{N_D} + \left(\frac{\sigma(\zeta)}{\zeta}\right)^2} \quad (12)$$

En esta última expresión N_D es el número de trazas totales contadas sobre los vidrios dosímetros, y $\sigma(\zeta)$ es la desviación estándar del factor de calibración ζ .

Aunque existen distintas fórmulas para el cálculo del error ellas son equivalentes matemáticamente (Bermúdez et al., 2004). La expresión (12) es una de las ecuaciones más usadas.

II. Opciones de la Aplicación FastFTLab

6. Cálculo de edades

Los estimadores de la edad antes mencionados (mean, isócrona, pooled y central) son calculados directamente a través del uso de la interfaz mostrada en la Figura 5.

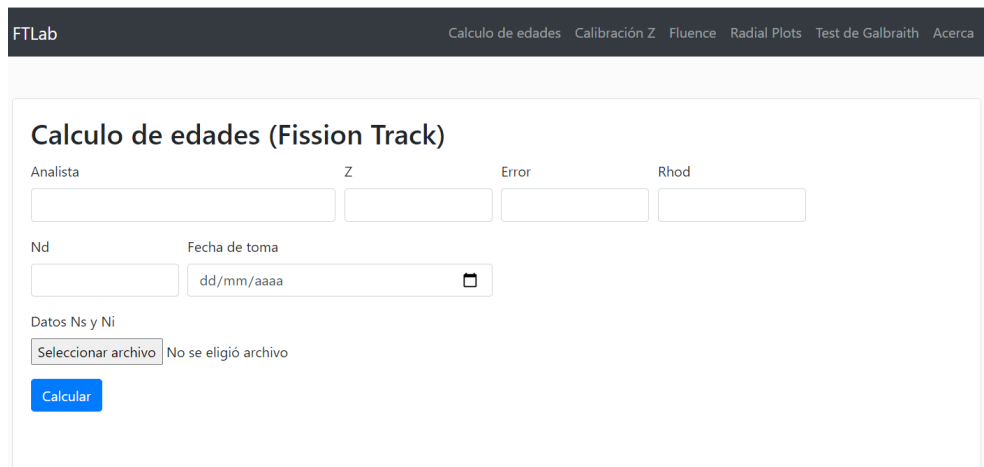


Figura 5. Menú para el cálculo de las edades del software RFTLab

Menú de navegación: El menú permite desplazarse entre los diferentes módulos que posee el sitio web, cálculo de edades, calibración ζ , opciones gráficas y cálculos de la afluencia.

Entre los distintos campos del software destacan:

Analista: En este campo se ingresa el nombre de la persona interesada, analista o laboratorista que desea realizar los cálculos

ζ : Corresponde al valor de ζ para el estándar utilizado en el laboratorio.

Error: Es el error estimado sobre el factor de calibración ζ a partir de muestras estándar.

Rhod: El valor de Rhod (ρ_d) calculado previamente para el vidrio correspondiente.

Nd: es el número de trazas totales contadas sobre los vidrios dosímetros

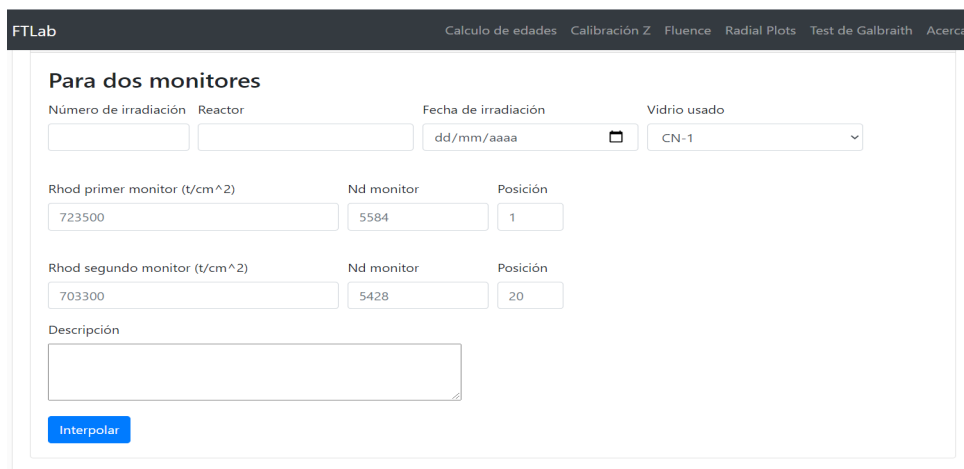
Fecha de toma: se refiere a la fecha en la que se analizan las muestras

Datos Ns y Ni: Seleccionamos el archivo que contiene los datos Ns y Ni en formato CSV es decir separados por comas “,”.

Al pulsar en el botón de calcular se generan dos archivos descargables “edades.csv” y “reporte.pdf”. En el archivo “edades.csv” se encuentran los valores calculados de las edades: *Central*, *Mean*, *Pooled* e *Isócrona* con sus respectivos errores. En el archivo “reporte.pdf” se muestra la salida gráfica la cual incluye: dos regresiones lineales, una con intercepto cero y la otra con intercepto diferente de cero, además del gráfico Radial Plot de Galbraith (Galbraith, 1998a, 1998b, 1994).

7. Cálculo de la afluencia

Para el módulo del cálculo de la afluencia se proporciona la interfaz mostrada en la Figura 6. En esta sección se interpola la afluencia para dos monitores, es decir los vidrios del tope y de la base.



FTLab

Calculo de edades Calibración Z Fluence Radial Plots Test de Galbraith Acerca

Para dos monitores

Número de irradiación: Reactor: Fecha de irradiación: ☐ Vidrio usado:

Rhod primer monitor (t/cm^2): Nd monitor: Posición:

Rhod segundo monitor (t/cm^2): Nd monitor: Posición:

Descripción:

Figura 6. Módulo de la aplicación RFTLab para el cálculo de la afluencia entre dos vidrios monitores.

Los campos necesarios para calcular los valores de Rhod y Nd para n vidrios se describen a continuación.

Número de irradiación: Es el código que se usa para describir la irradiación de las muestras en el reactor generalmente es 1-REAC-2018, que significa irradiación 1 de 2018 en el reactor REAC.

Reactor: El nombre o una corta descripción del reactor utilizado para la irradiación.

Fecha de irradiación: Se selecciona la fecha en la que se realizó la irradiación.

Vidrio usado: El dosímetro o vidrio con concentración de uranio conocida, permite estimar la afluencia de neutrones termales usada en el reactor, los vidrios generalmente se colocan en el tope, la base y el centro de que se usó para el tope y la base.

Rhod monitor: Densidad de trazas inducidas calculadas sobre los vidrios dosímetros, es decir el tope y la base respectivamente.

Nd monitor: El valor Nd previamente calculado para el vidrio monitor del tope y de la base, respectivamente.

Posición: Se ingresan las posiciones de los monitores, el primero, el del tope, suele ser 1 y el de la base varía según la cantidad de muestras que contenga el paquete irradiado

Descripción: Texto complementario que puede ser agregado para complementar la descripción de la afluencia que se está calculando.

Al oprimir el botón de interpolar se genera un archivo descargable en formato .CSV con la posición de las n muestras que conforman el paquete de irradiación, la distancia entre los vidrios, los valores de Nd para cada vidrio, los valores Rhod para cada vidrio y su error, tal como se muestra en la Figura 7.

	A	B	C	D	E	F
1	INTERPOLATED TRACK DENSITY USING A PAIR OF GLASS STANDARDS					
2	Date:	8/11/2020				
3	Irradiation number:	1				
4	Reactor:	ATOM-45				
5	Irradiation date:	11/11/2020				
6	Glass:	CN-1				
7	Description:	UNA DESCRIPCION				
8	monitor label	Position	Distance(%)	Nd	RhoD(t/cm ²	RE[RhoD](%)
9	First Monitor	1	0.0	5584	723500	1.34
10		2	5.3	5576	722437	1.27
11		3	10.5	5568	721374	1.21
12		4	15.8	5559	720311	1.15
13		5	21.1	5551	719247	1.1
14		6	26.3	5543	718184	1.05
15		7	31.6	5535	717121	1.02
16		8	36.8	5527	716058	0.99
17		9	42.1	5518	714995	0.97
18		10	47.4	5510	713932	0.96
19		11	52.6	5502	712868	0.96
20		12	57.9	5494	711805	0.97
21		13	63.2	5485	710742	0.99
22		14	68.4	5477	709679	1.02
23		15	73.7	5469	708616	1.06
24		16	78.9	5461	707553	1.11
25		17	84.2	5453	706489	1.16
26		18	89.5	5444	705426	1.22
27		19	94.7	5436	704363	1.29
28	Second Monit	20	100.0	5428	703300	1.36

Figura 7. Ejemplo de matriz de salida al calcular la densidad de trazas sobre los vidrios monitores para todo el paquete de irradiación.

El cálculo de errores sobre estándares, y la interpolación de las densidades del monitor fueron inspiradas de los códigos desarrollados en BASIC por el Dr. Mark Brandon de la Universidad de Yale.

8. Cálculo del factor ζ

Para el factor de calibración ζ se presenta en la Figura 8 una imagen de la aplicación. El factor de calibración ζ se deriva usando la ecuación (9) proporcionada en la sección de antecedentes y fundamentos teóricos.

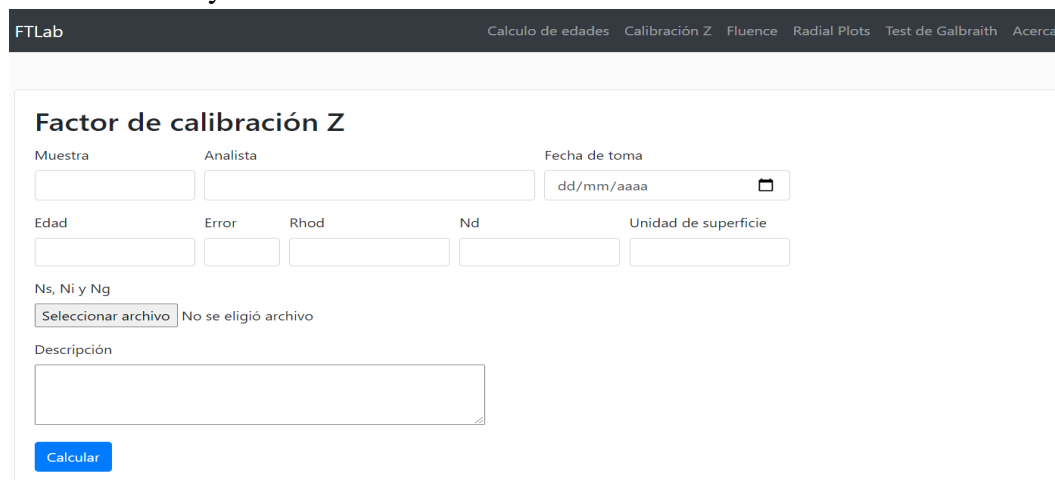


Figura 8. Ejemplo de la interfaz para el cálculo del factor ζ .

A continuación, se describen los elementos que conforman este módulo de la interfaz para el cálculo de ζ :

Muestra: El número de la muestra al que se le desea calcular el factor de calibración ζ .

Analista: Nombre de la persona que está interesada en calcular el factor de calibración ζ .

Fecha de toma: Seleccionamos la fecha en la que se realiza el cálculo de ζ

Edad: Valor de la edad del estándar utilizado para estimar ζ

Error: Error sobre la edad del estándar

Rhod: Valor de Rhod para calcular el factor ζ en 10^5 trazas/cm².

Nd: Valor de Nd para calcular el factor ζ .

Unidad de superficie: Valor para el área de conteo en 10^{-6} cm².

Ns, Ni y Ng: Datos en formato CSV para calcular el factor de calibración ζ .

Descripción: Se usa en caso de que se desee complementar la descripción del cálculo.

Al dar click en el botón calcular se genera un archivo CSV con datos, entre otros los valores de ζ *Pooled*, *Mean* y *Central*.

9. Radialplot de Galbraith

La grafica radial es un método grafico para mostrar y comparar observaciones que tienen diferente precisión. Para el calculo de estos datos se presenta una interfaz como

se muestra en la figura 9. La rutina para el radialplot de Galbraith fue generada por Romain Beucher (<https://github.com/rbeucher/pyRadialPlot>), y está disponible en Github, el resto de funciones fueron generadas por los autores de FastFTLab a partir de las referencias citadas al final de este manual.

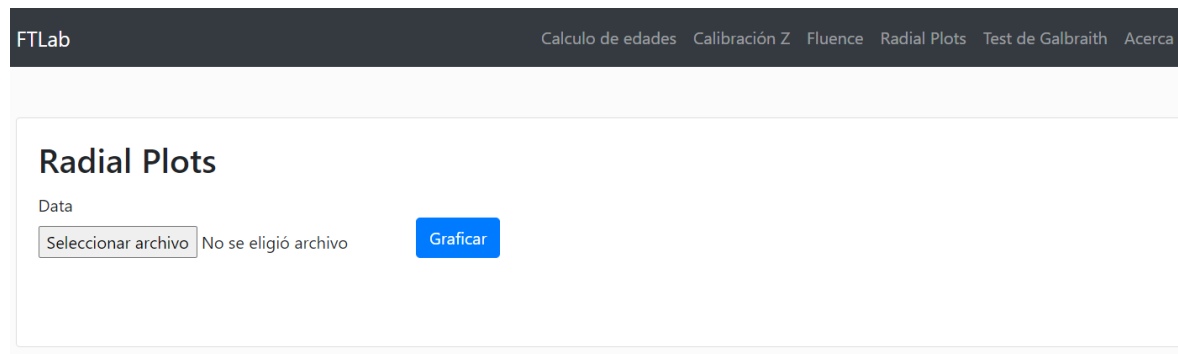


Figura 9. Interfaz para la generación de los radialplot.

Los gráficos generados por este modulo se presentan en la figura 10.

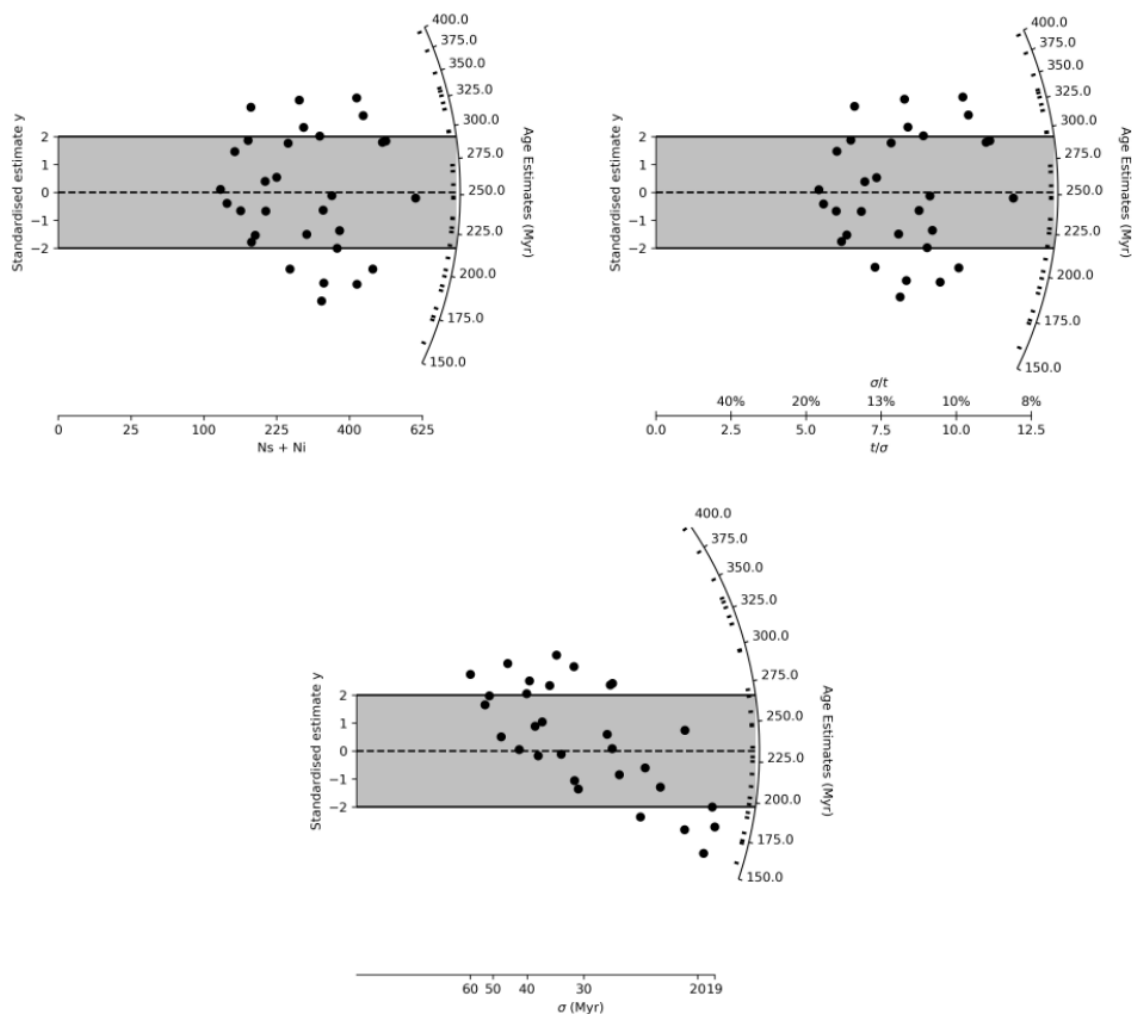


Figura 10. Radialplots.

Para generar estos datos es necesario ingresar un archivo en formato CSV con las variables organizadas como se muestra en la figura 11. Es muy importante que los datos estén organizados exactamente igual a como se muestra en la figura, para con esto obtener los resultados deseados de otra manera el software no reproducirá ningún gráfico.

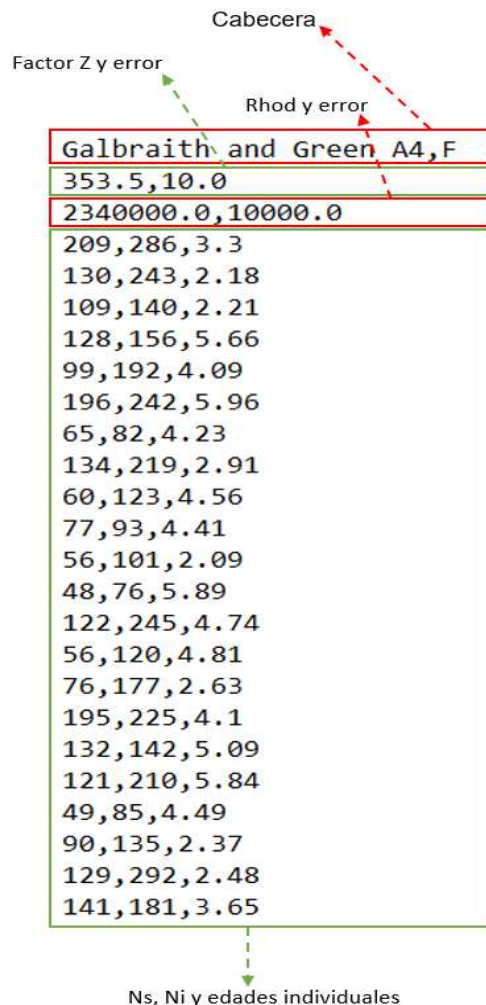


Figura 11. Formato de datos para el cálculo de los radialplot.

10. Test de Galbraith

Uso del test de Galbraith para verificar que la muestra que supuestamente proviene de un solo evento tectotérmico rápido proviene de una misma concentración de uranio, es decir, no constituye una mezcla de variables Poisson. Mire la sección 4.4 de la sección I.

Para este modulo se presenta la interfaz de la figura 12.

FTLab

[Calculo de edades](#)
[Calibración Z](#)
[Fluence](#)
[Radial Plots](#)
[Test de Galbraith](#)
[Acerca](#)

Test de galbraith

Ns y Ni

No se eligió archivo

Prob.: 7.9211 Prob.(%): 27.4379 Response: PASS!

Figura 12. Interfaz

Para realizar el test de Galbraith el usuario deberá ingresar un archivo en formato CSV con la columna de los Ns y los Ni. Es importante que el archivo tenga en la cabecera el nombre de las columnas tal como se muestra en la figura 13.

```
Ns,Ni
10,113
4,26
2,26
2,30
1,25
4,62
6,81
5,57
4,42
```

Figura 13. Ejemplo de input de datos para el test de Galbraith

11. Futuros módulos

- Discriminación de edades mixtas
- Algoritmo de p-partición
- Función de densidad de probabilidad compuesta
- Impresión de reporte de edades individuales, Test de Galbraith, Radial Plot y función de distribución de edades de granos.

III. Agradecimientos

Agradecemos a los Proyecto SGI DIN 2666 y 3104 que permitieron el desarrollo de esta aplicación.

IV. Referencias

Bardsley, W.E. (1983): "Test and Models for Fission-Track Data". Math. Geol., Vol. 15, No. 5.

Bermúdez, M. (2002): "Estudio de métodos estadísticos para la datación de material rocoso utilizando huellas de fisión". Universidad Central de Venezuela, Tesis de Maestría, Caracas, Venezuela, 92 p.

Bermúdez, M., Alson, P., y Mora, J. (2004): "Equivalencia entre las diversas fórmulas del cálculo de errores de la edad determinada por el método de huellas de fisión". Revista de la Facultad de Ingeniería, Volumen 19, N° 1, pp. 119-123. Caracas, Venezuela.

Bermúdez, M., Alson, P., y Mora, J. (2005): "Ecuación Fundamental de la Edad para la datación de minerales y su adaptación a la ecuación práctica para el método de huellas de fisión". Revista de la Facultad de Ingeniería, Volumen 20, N° 2. Caracas, Venezuela.

Bermúdez, M. A., Glotzbach, C., & Alson, P. (2015). A new Poissonian algorithm for the determination of fission-track ages. Computers & Geosciences, 76(0), 141-150. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.12.007>

Bermúdez, M.A., Flores-Ferrín, M. (2019). Aplicaciones de la termocronología por trazas de fisión en Venezuela: Estado actual, perspectivas y visión integradora. Boletín de Geología UIS, 41 (3), 175-200.

Bigazzi, G., Bonnadonna, F., and Hadler, J.C. (1986): "Contribution to Statistics in Fission Track Counting". Nucl. Tracks, Vol. 11, No. 3, pp. 123-136, Great Britain.

Bowman, A.W. and Azzalini, A. (1997): "Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: The Kernel Approach with S-Plus Illustrations". Oxford Statistical Science Series, 18, 194 p.

Brandon, M.T. (1996): "Probability Density Plot for Fission-Track Grain-Age Samples". Radiation Measurements, Vol. 26, No. 5, pp. 663-676, Great Britain.

Brandon, M.T. (1992): "Decomposition of Fission Track Grain Age Distributions". American Journal of Science, Vol. 292, October 1992, pp. 531-564

Burchart, J. (1981): "Evaluation of uncertainties in Fission Track Dating: Some Statistical and Geochemical Problems". Nucl. Tracks, Vol. 5, Nos. 1/2, pp. 87-92, Great Britain.

Campbell, I. H., Reiners, P. W., Allen, C. M., Nicolescu, S., Upadhyay, R. (2005). He-Pb double dating of detrital zircons from the Ganges and Indus Rivers: Implication for quantifying sediment recycling and provenance studies, Earth and Planetary Science Letters 237, 402-432.

Cox, D.R (1969): "The Analysis of Binary Data". Methuen & CO LTD, London, 141 p.

Devore, J. (1998): "Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias". Cuarta edición. Internacional Thompson Editores. 712 p. México, D.F.

Faure, G. (1986); "Principles of Isotope Geology". Second Edition. New York, John Wiley & Sons, 589 p.

Fleischer, R. L., Price, P. B., and Walker, R. M. (1964): "Fission-track ages of zircons". Journal of Geophysical Research, 69, 4885-4888.

Friedlander, G., Kennedy, J.W and Miller, J.M. (1964): "Nuclear and Radiochemistry". (2nd. ed.), Chapter 6, pp 166-190, Wiley, New York.

Galbraith, R.F. (1981): "On Statistical Models for Fission Track Counts". Math. Geol., Vol. 13, No. 6, USA.

Galbraith, R.F. (1982): "Statistical Analysis of Some Fission-Track Counts and Neutron-Fluence Measurements". Nucl. Tracks, Vol. 6, No. 2/3, pp. 99-107, Great Britain.

Galbraith, R.F. (1986): "Statistical Analysis of C.W. Naeser's Fish Canyon Zircon Data". Nucl. Tracks Radial. Meas. (Int. J. Radial. Appl. Instrum., Part. D), Vol. 11, No. 6, pp. 295-300, Great Britain.

Galbraith, R. F. (1988a). Graphical display of estimates having differing standard errors. Technometrics, 30(3), 271-281.

Galbraith, R. F. (1988b). A note on graphical presentation of estimated odds ratios from several clinical trials. *Statistics in Medicine*, 7(8), 889–894.

Galbraith, R. F. (1990). The radial plot: graphical assessment of spread in ages, *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 17, 207-214.

Galbraith, R. F. (1994). Some applications of radial plots. *Journal of the American Statistical Association*, 89(428), 1232–1242.

Galbraith, R. F. (2005). *Statistics for Fission Track Analysis*. Interdisciplinary Statistics. <https://doi.org/10.1201/9781420034929>

Galbraith, R.F., and Laslett, G.M. (1985): “Some Remarks on Statistical Estimation in Fission-Track Dating”. *Nucl. Tracks*, Vol. 10, No. 3, pp. 361-363, Great Britain.

Galbraith, R.F., and Green, P.P. (1990): “Estimating the Component Ages in A Finite Mixture”. *Nucl. Tracks Radial. Meas. (Int. J. Radial. Appl. Instrum., Part. D)*. Vol. 17. No. 3. pp. 197-206. Great Britain.

Galbraith, R.F., and Laslett, G.M. (1993): “Statistical Models for Mixed Fission Track Ages”. *Nucl. Tracks Radial. Meas.*, Vol. 21. No. 4. pp. 159-170. Great Britain.

Galbraith, R. F., Roberts, R. G., Laslett, G. M., Yoshida, H. and Olley, J. M. (1999). Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I, experimental design and statistical models, *Archaeometry*, 41, 339-364.

Ghailou, D., and Chambaudet, A. (1981): “Statistics on Uranium Fission-Track Counting”. *Nucl. Tracks*, Vol. 5, Nos. 1/2, pp. 93-98, Great Britain.

Green, P.F. (1981): “A New Look at Statistics in Fission Track Dating”. *Nucl. Tracks*. Vol. 5. No. 1/2. pp. 77-86, Great Britain.

Green P. F. (1985): “Comparison of zeta calibration baselines for fission-track dating of apatite, zircon and sphene”. *Chemical Geology*, 58, 1-22.

Haack, U. (1973): “The influence of the uranium distribution on the error of fission track ages of garnets”, *Abstr. Geochronol. Isotope Geol. (3rd. Europ. Colloq. Geochronol. Cosmochronol. Isotope Geol, Oxford)* p. 9.

Hurford, A. J., and Green, P. F. (1983): “The zeta age calibration of fission-track dating”. *Chem. Geol., Isot. Geosci.*, 41, 285-312.

Hurford, A. J. and Hammerschmidt, K. (1985): “ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar dating of the Bishop and Fish Canyon Tuffs: calibration ages for fission track dating standards”. Chem. Geol. (Isot. Geosci.), 58, 23-32.

Hurford, A. J. and Watkins R. T. (1987): “Fission-track age of the tuffs of the Buluk Member, Bakate Formation, Northern Kenya: A suitable fission-track age standard”. Chemical Geology, 66, 209-216.

Hurford, A. J. (2019). An Historical Perspective on Fission-Track Thermochronology. In M. G. Malusà & P. G. Fitzgerald (Eds.), Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology (pp. 1–24). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-89421-8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89421-8)

Johnson, N.M., McGee, V.E and Naeser, C.W. (1979) “A Practical Method of Estimating Standard Error of Age in the Fission-Track Dating Method”. Nucl. Tracks, Vol. 3, pp. 93-99, Great Britain.

Jonckheere, R. and Van den haute, P. (2002): “On the efficiency of fission-track counts in an internal and external apatite surface and in a muscovite external detector”. Radiat. Meas. 35, 29-40.

Jonckheere, R. (2003): “On the densities of etchable fission tracks in a mineral and co-irradiated detector with reference to fission-track dating of minerals”. Chemical Geology, 200, 41-58.

Kendall, M. and Stuart, A., 1958, “The advanced theory of statistics, distribution theory”. Vol.1, Charles Griffin & Company Limited, London, 433 p.

McGee, V.E. and Johnson, N.M., 1979, “Statistical treatment of experimental errors in the fission track dating method”. Math. Geol., Vol.11, No.3, USA.

McGee, V.E., Johnson, N.M., and Naeser, C.W., 1985, “Simulated fissioning of uranium and testing of the fission-track dating” Nucl. Tracks, Vol.10, pp. 365-379, Great Britain.

Mendenhall, W., Scheaffer, R. and Wackerly, D. (1981): “Mathematical Statistics with Applications”. Second Edition, Duxbury Press, 686 p. Boston, Massachusetts.

Mendenhall, W. y Sincich, T. (1997): “Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias”. Prentice Hall Hispanoamericana, 1182 p. México, D.F.

Naeser, C.W., Gleadow, A.J., and Wagner, G.A. (1981): "Standardization of Fission-Track Data Reports". Nucl. Tracks, Vol. 3, pp. 133-136, Great Britain.

Naeser, G.W., Zimmermann, R.A., and Cebula, G.T. (1981): "Fission-Track Dating of Apatite and Zircon: An Interlaboratory Comparison". Nucl. Tracks, Vol. 5, No. 1/2, pp. 65-72, Great Britain.

Silverman, B.W. (1985): "Density Estimation for Statistics and Data Analysis". Chapman & Hall, New York, 175 p.

Vermeesch, P. (2009). RadialPlotter: A Java application for fission track, luminescence and other radial plots. Radiation Measurements. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.05.003>

Vermeesch, P. (2019). Statistics for Fission-Track Thermochronology. In M. G. Malusà & P. G. Fitzgerald (Eds.), Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology (pp. 109–122). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.

Wagner, G., and Reimer, G. M. (1972): "Fission-track tectonics: the tectonic interpretation of fission tracks apatite ages". Earth Planet. Sci. Lett., 14, 263-268.

Wagner G., and Van Den Haute P. (1992): "Fission Track Dating". Solid Earth Sciences Library, Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 285 p.