

CALIBRACIÓN DEL SEPARADOR MAGNÉTICO DE ALTA INTENSIDAD MAGNET-LIFT MLH (13) 111-5 PARA SU USO EN EL LABORATORIO DE TERMOCRONOLOGÍA DE LA UCV

MAURICIO A., BERMÚDEZ-CELLA Y RAQUEL C., ANAYA[†]

[†]Laboratorios de Termocronología y Geomatemáticas, Departamento de Geología, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. e-mail: mbermude@euler.ciens.ucv.ve

Recibido: mayo de 2006

Recibido en forma final revisado: agosto de 2007

RESUMEN

En este artículo se presenta la calibración del separador magnético de alta intensidad Magnet-lift MLH (13) 111-5 existente en el Laboratorio de Termocronología de la Universidad Central de Venezuela con la finalidad de separar magnéticamente minerales pertenecientes a areniscas y muestras graníticas para su posterior fechado por el método de huellas de fisión. Los resultados obtenidos de esta calibración fueron aplicados a una muestra de 10 kilogramos pertenecientes a una concentración inicial de minerales de la Formación Betijoque del flanco norte de Los Andes Venezolanos. Se concluye que el Magnet-lift presenta amplias ventajas con respecto a los separadores magnéticos convencionales y además optimiza el tiempo de procesamiento de rocas detríticas que posteriormente serán fechadas por el método de datación empleado en este laboratorio con el fin de discriminar la edad del último evento tecto-térmico ocurrido en la zona de estudio.

Palabras clave: separación magnética, susceptibilidad magnética, Método de Huellas de Fisión, Técnica del Detector Externo, concentración y beneficio de minerales, minerales pesados.

CALIBRATION OF A HIGH INTENSITY MAGNET-LIFT MLH (13) 111-5 MAGNETIC SEPARATOR FOR USE IN THE THERMOCHRONOLOGY LABORATORY OF THE UCV

ABSTRACT

In this article we present the calibration of a high intensity Magnet-lift MLH (13) 111-5 magnetic separator located in the Thermochronology Laboratory of the Universidad Central de Venezuela with the purpose of magnetically separating minerals of sandstone and granite samples to be subsequently subjected to the fission track dating method (FTDM). The results of this calibration were applied to 10 kilogram sample belonging to an initial concentration of minerals of Betijoque's Formation on the north flank of Venezuelans Andes. We conclude that the Magnet-lift presents a number of advantages with regard to conventional magnetic separators as well as optimizing the preparation time of detritic rocks for their dating by the fission track method.

Keywords: magnetic separation, magnetic susceptibility, Fission Tracks Dating Method (FTDM), External Detector Technique (EDT), concentration and benefit of minerals, heavy minerals.

INTRODUCCIÓN

El separador magnético isodinámico Frantz, calibrado por Hess en 1959, se emplea comúnmente en la práctica para la discriminación de minerales, que posteriormente serán fechados por el Método de Huellas de Fisión (MHF). La principal desventaja de este equipo, debido a sus características de construcción, es que no posee capacidad

suficiente para el manejo de grandes volúmenes de minerales provenientes de sedimentos (sólo 100 grs), las cuales, son las características de la mayoría de las muestras empleadas en el Laboratorio de Termocronología de la UCV (>2 Kg). Para tal fin, se dispone en este laboratorio, de un separador magnético de alta intensidad denominado Magnet-lift MLH (13) 111-5, que procesa un mayor volumen de muestras. El único problema que presentaba hasta la fecha, es que no

había sido incorporado a la práctica rutinaria del laboratorio por no estar calibrado para las separaciones magnéticas de minerales pesados (apatito, circón, esfena) provenientes de muestras de sedimentos y rocas, lo cual ocasionaba que el proceso de datación de estas últimas empleara una mayor cantidad de tiempo.

A partir de esta problemática, en Anaya (2004) se emplearon diecisiete de los minerales más importantes considerados por Hess (1959) para calibrar el Magnet-lift. Estos minerales fueron reconocidos previamente mediante principios de mineralogía óptica y por estudios de difracción de rayos X. Posteriormente, se construyeron curvas de calibración, para cada caso, obteniendo parámetros óptimos para la separación magnética en el caso de muestras formadas por un mineral.

Los resultados obtenidos fueron aplicados a mezclas, dos a dos, de los minerales considerados para la calibración del equipo, así como, a un conjunto de minerales previamente concentrados mediante el Sistema Automatizado de Separación de Minerales Pesados (SASMP) provenientes de sedimentos de la Formación Betijoque del flanco norte de Los Andes venezolanos. Los fundamentos de esta concentración inicial pueden verse en el trabajo de Bermúdez *et al.* (2006).

Los minerales discriminados en el Magnet-lift fueron nuevamente reconocidos por análisis de difracción de rayos X, obteniéndose una óptima separación de estos de acuerdo con Hess (1959), con la única diferencia, de que el tiempo de procesamiento en este último fue notablemente reducido (de dos semanas a tres días).

En este trabajo, se presentan curvas de calibración del equipo y a partir de ellas se tratan de obtener expresiones matemáticas, con el fin de estimar estadísticamente los parámetros más importantes del equipo.

ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es de práctica común el uso de herramientas matemático-estadísticas con el fin de optimizar los equipos de separación magnética. Estos procesos permiten obtener parámetros ideales para operar los equipos bajo ciertas condiciones.

La separación de minerales pesados o accesorios es de gran importancia para la datación de eventos tecto-térmicos por el método de huellas de fisión. Esta separación se hace por diferentes métodos, entre los más usados están: la separación por densidad, por gravedad y la separación magnética; esta última se puede hacer tanto en seco como en húmedo. Para la separación magnética en seco se utilizan

varios equipos que actualmente se encuentran en el mercado, siendo el Frantz uno de los más usados. Éste, al igual que el separador de alta intensidad Magnet-lift, se encuentran en el Laboratorio de Termocronología y son mostrados en la figura 1.

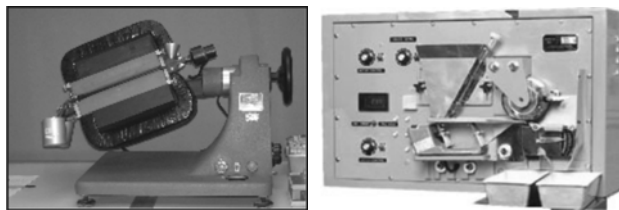


Figura 1. (A) Separador Magnético Frantz L-1 y (B) Separador Magnet-lift existentes en el Laboratorio de Termocronología de la UCV.

El separador magnético Frantz, en comparación con el Magnet-lift presenta algunas desventajas tales como: la poca capacidad en el manejo de grandes volúmenes (aproximadamente 3 kilogramos de muestra en el Magnet-lift, en comparación con 100 gramos en el Frantz), y la baja intensidad, (máximo 2.2 Amperes, en comparación con 3 Amperes en el Magnet-lift).

El equipo a calibrar, se encuentra en el Laboratorio de Termocronología de la UCV desde 1996 sin recibir mantenimiento, y fue utilizado por Chiquito (1999) para la disminución de hierro por métodos magnéticos en arenas silíceas, trabajo en el cual se alcanzaron las especificaciones requeridas para hacer fibra de vidrio y filtrado de aguas, pero no para hacer vidrio. También se realizó una aplicación de separación magnética para la concentración de minerales pesados de areniscas pertenecientes a las formaciones Trujillo y Misoa en el trabajo de Coronado y Rey (2003).

METODOLOGÍA

Para la calibración del equipo Magnet-lift MLH (13)111-5 se efectuó la siguiente secuencia de pasos, los cuales son resumidos en forma gráfica en la figura 2:

- 1) Se hizo un compendio de referencias bibliográficas y manuales del equipo.
- 2) Se recolectó el mayor número de minerales basándose en la tabla empleada por Hess (1959).
- 3) Se identificaron los minerales bajo microscopio de acuerdo con el estudio de sus propiedades ópticas.
- 4) Se reconocieron los mismos minerales mediante difracción de rayos X.

- 5) Los minerales fueron triturados en morteros y tamizados entre mallas 60 y 80 recolectando el no pasante malla 80.
- 6) Se seleccionaron 100 granos de cada uno de los minerales y se procesaron por el Magnet-lift, variando cada uno de los parámetros del equipo.
- 7) Mediante la recuperación y conteo de los granos discriminados por el equipo, se construyeron curvas de calibración y se realizó una estimación estadística de parámetros.
- 8) Se mezclaron los minerales dos a dos, de manera que pudieran ser fácilmente reconocidos bajo el microscopio óptico y de esta manera, se validaron las curvas y tablas de calibración obtenidas en el paso anterior.
- 9) Se aplicaron estos resultados a muestras de minerales previamente concentrados de areniscas pertenecientes a la Formación Betijoque del flanco norte de Los Andes venezolanos.
- 10) Por último, se realizó un reconocimiento de los minerales discriminados mediante el Magnet-lift por difracción de rayos X.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA APLICADOS AL EQUIPO MAGNET LIFT CARPCO MODELO MLH (13)111-5

Al momento de realizar una separación, la muestra que será procesada deberá estar en el carril vibratorio, dispuesta a pasar por el entre hierro, en ese momento es cuando se analizan los principios de la separación magnética, así, las fuerzas que actúan sobre una partícula dependen en mayor o menor medida del campo magnético generado por el equipo. En el caso particular del separador Carpc MLH(13) 111-5, las fuerzas que operan son: fuerza magnética (F_m), fuerza gravitacional (F_g), fuerza centrífuga (F_c) y la fuerza de empuje (F_e).

Otros fenómenos físicos que se deben tener presentes son:

- 1) La existencia del campo magnético de alta intensidad generado en el entre hierro, el cual es producido por una serie de discos magnéticos y no magnéticos.
- 2) La susceptibilidad magnética (X_m), puesto que a través de este concepto se entiende el comportamiento de los granos en el separador magnético. De esta forma, se deben reconocer dos tipos de partículas, las primeras que presentan susceptibilidad magnética $X_m \gg 1$ y las segundas con susceptibilidad magnética $X_m < 1$.

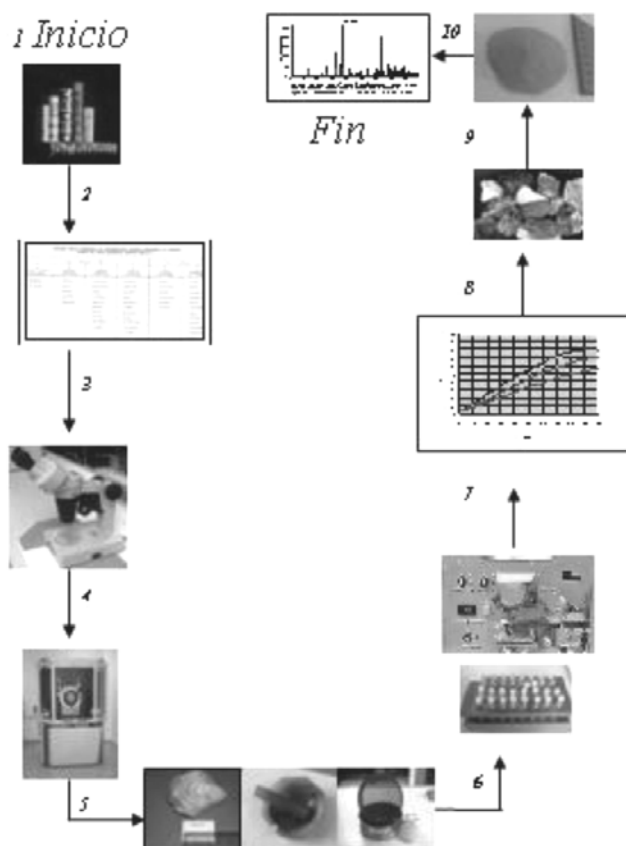


Figura 2. Metodología aplicada para la calibración del Magnet-lift en forma de diagrama de flujo. (Tomada de Anaya (2004)).

En la figura 3, se aprecia el comportamiento de una partícula dentro de un campo magnético con $X_m \gg 1$. En esta situación se presentan tres momentos: en el momento 1, la acción de F_m no consigue vencer las fuerzas en competencia, pero F_e vence a la fuerza haciendo que se desplacen las partículas. En el momento 2, la partícula se dispone a seguir la trayectoria magnética lo que implica que las fuerzas en competencia fueron vencidas por F_m .

En el momento 3, las partículas están adheridas al rodillo lo cual indica una mayor fuerza magnética (F_m) logrando vencer la fuerza gravitacional (F_g). A partir de este instante, entra en juego la fuerza centrífuga (F_c), por lo tanto, para que ocurra la separación debe ocurrir que:

$$F_m > F_g + F_c$$

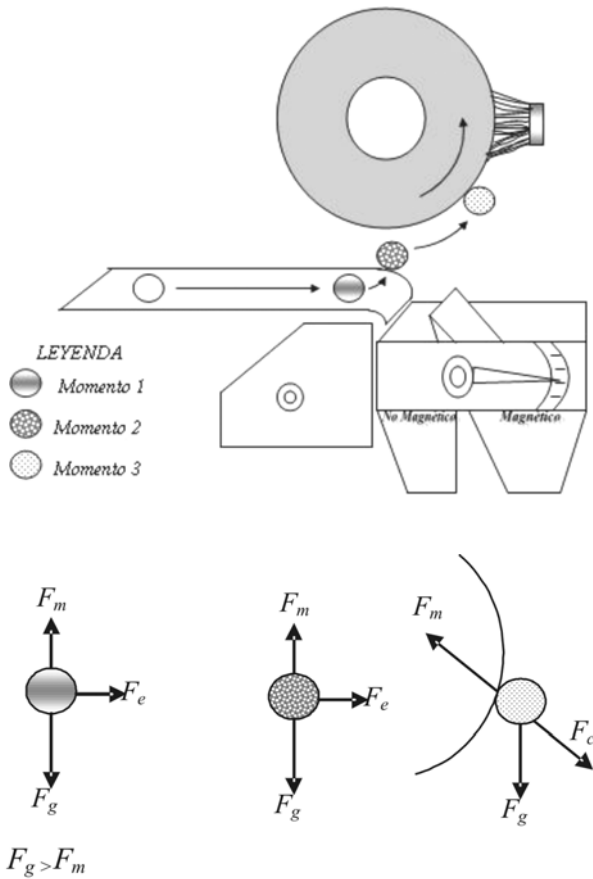


Figura 3. Comportamiento de las partículas en el Magnet-lift con susceptibilidad positiva $X_m \gg 1$. (Tomada de Anaya (2004)).

Anteriormente se presentó el comportamiento de las partículas con $X_m \gg 1$, dentro de un campo magnético. Los materiales que se presentan en este rango son los ferromagnéticos y paramagnéticos, respectivamente. A continuación se presenta el comportamiento de las sustancias con $X_m < 0$, las cuales están representadas por

los materiales diamagnéticos (Sánchez, 1965). Entre las sustancias con susceptibilidad muy baja se tienen: la pirita, la fluorita y el cuarzo, entre otros. En la figura 4, se ilustra el comportamiento de una partícula de baja susceptibilidad magnética al pasar por el equipo. También se muestra, el diagrama de cuerpo libre para este caso.

Para el caso de la figura 4, las sustancias con baja susceptibilidad magnética no se adhieren al rodillo inducido por lo que presentan una trayectoria de deflexión. Pero son afectadas por el campo inducido, dichas perturbaciones se observan en la trayectoria que éstas siguen, por lo que existen dos posibles recorridos: El primero, en donde los granos caen una vez que salen del carril vibratorio en el lado de los no magnéticos. El segundo, en donde por pequeñas inclusiones magnéticas en los granos y por la fuerza de empuje, las partículas se desvían llegando al lado magnético.

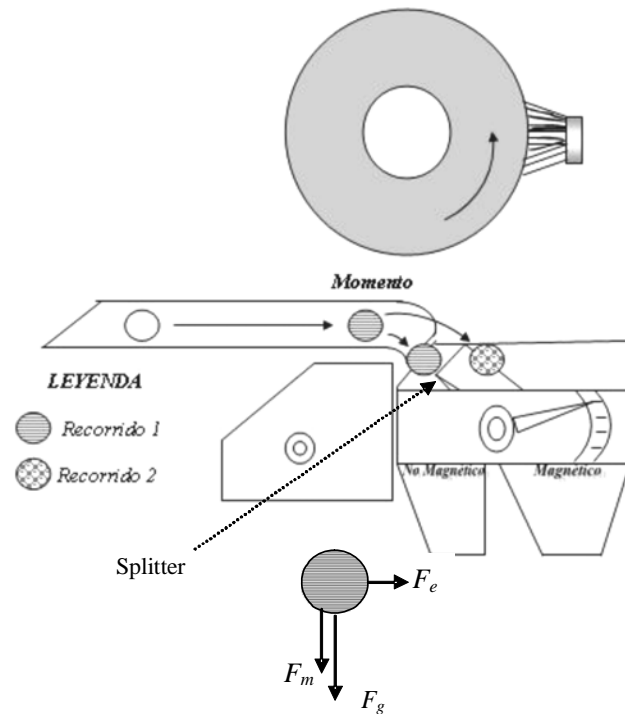


Figura 4. Comportamiento de las partículas en el Magnet-lift con susceptibilidad positiva $X_m < 0$. (Tomada de Anaya (2004)).

Existen numerosas variables que ocasionan este último recorrido, una de ellas, sería la apertura del *splitter* (compuerta que permite pasar los minerales hacia los conductos magnéticos y no magnéticos (figura 4), la tasa de alimentación y la magnitud de la fuerza magnética debido a que el vector de fuerza magnética es mayor a medida que se aumenta el campo, produciendo un mayor empuje.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO MAGNET LIFT CARPCO MODELO MLH (13)111-5

En la figura 5, se enumeran las partes fundamentales del separador magnético Carpco modelo MLH (13) 111- 5.

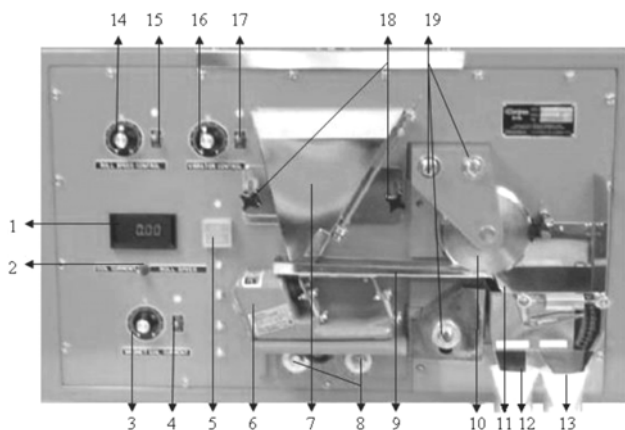


Figura 5. Partes del separador magnético Magnet-lift.

1. Medidor de velocidad y amperímetro
2. Selector del medidor de velocidad y amperímetro
3. Control de corriente
4. Interruptor del control de corriente
5. Interruptor de encendido y apagado del equipo
6. Motor de vibración
7. Tolva alimentadora
8. Tornillos de ajuste del carril vibratorio
9. Carril vibratorio
10. Rodillo
11. Separador manual (Splitter)
12. Salida minerales no magnéticos
13. Salida minerales magnéticos
14. Control de velocidad del rodillo
15. Interruptor del control de rodillo
16. Control de vibración
17. Interruptor del control de vibración
18. Tornillos de ajuste de la tolva
19. Tornillo de ajuste de los imanes

De todas estas partes, sólo mencionaremos la utilidad de las más importantes:

Tolva

Es una pieza de acero con una capacidad de 1016 cm³ (62"), donde se coloca la muestra a separar, presenta dos tornillos de ajuste (número 7 en la figura 5), los cuales permiten moverla y adaptarla a las especificaciones requeridas.

Bandeja o carril vibratorio

Este dispositivo es el encargado de transportar la muestra desde la tolva hasta el rodillo inducido, consta de un carril de acero inoxidable el cual es puesto a vibrar por un motor ubicado en la parte inferior del mismo y posee un control donde se gradúan las vibraciones y así también la tasa de la muestra. La separación existente entre la tolva y la bandeja es de 1 mm.

Rodillo inducido

Es un cilindro rotativo que consta de un conjunto de discos magnéticos y no magnéticos. Dicho dispositivo se encuentra entre dos polos de un circuito electromagnético, las laminaciones magnéticas son afectadas por el campo que induce el electroimán, provocando regiones con un alto gradiente magnético y la fuerza magnética para la separación.

Sus dimensiones son 50 mm de ancho y 127 mm de diámetro. Tiene un control independiente con el que se ajusta la velocidad angular (número 14 en la figura 5), éstas van desde 0 hasta 245 rpm. Es importante, considerar la separación que existe entre el rodillo inducido y la bandeja vibratoria. Esta separación debe ser 2,5 veces el tamaño del grano que será procesado, para esto, existe un juego de ocho regletas que trae el equipo, las cuales están identificadas por colores (figura 6) según su espesor, variando desde 1 mm. (reglas de color oscuro) hasta 0,5 mm. (reglas de color claro).

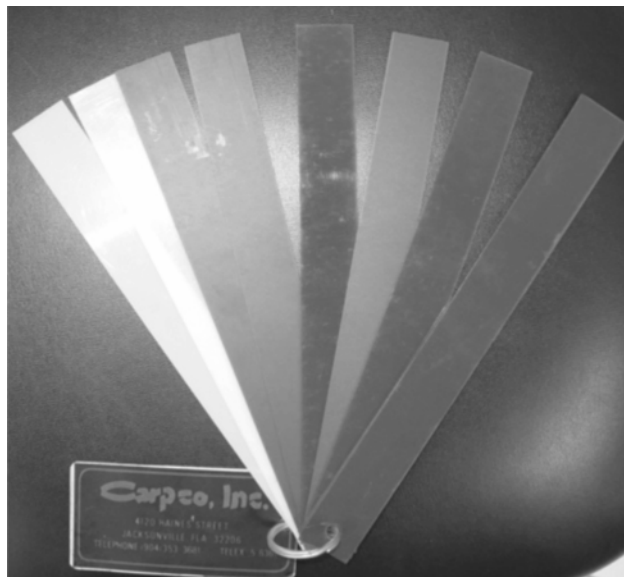


Figura 6. Regletas de calibración de la distancia entre el rodillo y el canal vibratorio.

Electroimán

Este produce un campo magnético debido a una corriente

eléctrica, que puede ser regulada por un control independiente (número 2 en la figura 5), logrando obtener un campo inducido de hasta 1,6 teslas, en la parte inferior del rodillo.

De acuerdo a la intensidad de corriente empleada, la apertura entre los electroimanes y el rodillo inducido, se puede conseguir un campo magnético conforme a la intensidad de corriente, empleando las curvas de calibración del equipo (ver manual de instrucciones del equipo, Carpcó, 1996).

«Splitter» o separador

Es un dispositivo mecánico (número 11 en la figura 5) que permite la separación de minerales con diferentes susceptibilidades magnéticas, la cantidad de material es controlada por la posición del splitter, el cual se puede graduar para obtener la mayor pureza de material magnético o no magnético. Este mecanismo consta de una lámina dispuesta de manera vertical que divide la trayectoria del material, el ajuste se da mediante un tornillo micrométrico para calibrar la apertura, la cual está dada en grados sexagesimales variando desde 0 hasta 50°. El splitter, se gradúa midiendo la apertura del ángulo en sentido antihorario con respecto a la vertical.

CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

Para calibrar el equipo se utilizaron minerales puros identificados por estudios de difracción de rayos X y por propiedades ópticas, los minerales seleccionados se escogieron en base a la tabla de calibración del separador magnético Frantz dada por Hess (1959), representada por la tabla 1.

Tabla 1. Minerales separados por el Frantz de acuerdo a Hess (1959).

Pendiente del equipo 20°				Pendiente del equipo 5°.	
A	B	C	D	E	F
Magnéticos (Amperaje)					
Altamente magnéticos	0.4	0.8	1.2	1.2	1.2
Magnetita	Ilmenita	Horblenda	Diopsido	Esfena	Circón
Pirrotita	Granate	Hipersteno	Tremolita	Leucóxeno	Rutilo
	Olivino	Augita	Enstatita	Apatito	Anatasa
	Cromita	Actinolita	Espinela	Andalucita	Brookita
	Cloritoide	Estaurólita	Estaurólita	Monacita	Pirita
		Epidoto	(Clara)	Xenotina	Corindón
		Biotita	Moscovita		Topacio
		Clorita	Zoisita		Fluorita
		Turmalina	Clinozoisita		Cianita Silimanita
		(Oscura)	Turmalina		Anhidrita
			(Clara)		Berilo

Para calibrar el separador Magnet-lift, se seleccionaron 100 granos de cada uno de los 17 minerales resaltados en negro existentes en la tabla 1. El tamaño del grano de estos minerales se consideró fijo entre 60 y 80 de apertura de malla.

Todas las pruebas realizadas por Anaya (2004) permiten afirmar que las variables más importantes a considerar son: amperaje (debido a la susceptibilidad magnética de cada mineral), velocidad del rodillo, y la tasa de alimentación.

Esta calibración fue dividida según el tipo de propiedad o respuesta magnética de cada mineral. A continuación, se mostrará un ejemplo de la calibración de cada uno de estos tipos de minerales.

Ferromagnéticos

Se utilizaron aquellos minerales con susceptibilidad magnética mayores a 1, como: la magnetita, pirrotita.

Magnetita

Se efectuó una corrida del equipo, a diferentes velocidades de la rueda: 5, 10, 20, 40 y 50 rpm y con aperturas del splitter de 10°, 25° y 35°, respectivamente. En el caso particular de velocidad 5 rpm y considerando las tres aperturas nombradas anteriormente se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la discriminación para la magnetita a 5 rpm, con aperturas de 10, 25 y 35°.

Velocidad de la rueda: 5 rpm					
Apertura 10°		Apertura 25°		Apertura 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
96	0,20	99	0,20	100	0,20
99	0,40	100	0,40	100	0,40
100	0,60	100	0,60	100	0,60
100	0,80	100	0,80	100	0,80
100	1,00	100	1,00	100	1,00
100	1,20	100	1,20	100	1,20
100	1,40	100	1,40	100	1,40
100	1,60	100	1,60	100	1,60
100	1,80	100	1,80	100	1,80
100	2,00	100	2,00	100	2,00
100	2,20	100	2,20	100	2,20
100	2,40	100	2,40	100	2,40
100	2,60	100	2,60	100	2,60
100	2,80	100	2,80	100	2,80

En esta tabla se observa, que existe muy poca variabilidad en los resultados a medida que se incrementa el ángulo de apertura del splitter. Nótese también, que por ser la magnetita un mineral altamente magnético apenas con 0,20 Amp, y una apertura de 35° ya se obtienen los 100 granos separados del mineral. En contraste, con una apertura de 10° del splitter se necesita un mayor amperaje (0,60 Amp.) para poder separar la misma cantidad de granos.

Las curvas de producción del equipo para este mineral

pueden ser apreciadas en la figura 7. Cuando la velocidad de la rueda se aumenta a 50 rpm, las curvas de producción vienen dadas por la ecuación $y = 100$, es decir una recta constante, debido a que los minerales se separan mucho más rápido y no hay variación entre los ángulos de apertura del splitter. Por esta razón, no se muestra el análisis de regresión lineal.

Paramagnéticos

Entre ellos: hornblenda, turmalina, diópsido y granate. Aquí se mostrarán a continuación los resultados para el granate.

Granate

El granate utilizado para este estudio es de tipo almandino, así, los resultados para este caso particular a 5 rpm son mostrados en la tabla 3. En ésta, se aprecia que a medida que se aumenta el ángulo de apertura del splitter la separación de los granos es mucho mejor, observando para 35° de apertura, que se han discriminado 87 granos con un amperaje de 0,60. En contraste, con el mismo amperaje se

obtienen 58 y 64 granos para ángulos de 10 y 25°, respectivamente. Al final de esta tabla se observan las ecuaciones de las curvas polinomiales ajustadas, nótese que la diferencia entre ajustes es muy pequeña.

Análogamente al caso anterior se obtuvieron las curvas de calibración del equipo para este mineral mostradas en la figura 8, las líneas de color negro con rombos, cuadrados y triángulos corresponden a una apertura del splitter de 10°, 25° y 35°, nótese que la curva negra con triángulos alcanza un punto de inflexión o «quiebre» con mayores valores de granos separados, que las otras curvas, esto significa que el equipo tiene una mayor tasa de producción en la separación de granate con esa apertura. Con el fin de validar esto, se efectuaron los análisis de regresión polinomial de tercer grado, a cada una de las curvas de producción del equipo según la apertura del splitter, las cuales fueron presentadas en la tabla 3.

Al aumentar la velocidad de la rueda, se mantiene esta misma conclusión, la diferencia radica en que la apertura del splitter se va haciendo cada vez menos significativa.

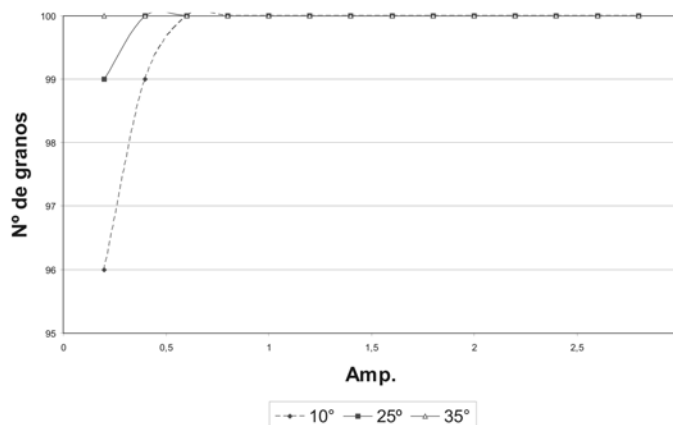


Figura 7. Curvas de producción del equipo para la magnetita a 5 rpm.

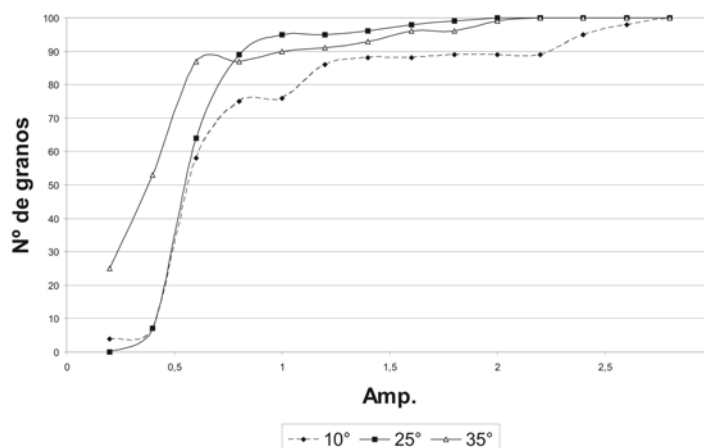


Figura 8. Curvas de producción del equipo para el granate a 5 rpm.

Tabla 3. Resultados de la discriminación para el granate a 5 rpm, con aperturas de 10, 25 y 35°.

Velocidad de la rueda: 5 rpm					
Apertura 10°		Apertura 25°		Apertura 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
4	0,20	0	0,20	25	0,20
7	0,40	7	0,40	53	0,40
58	0,60	64	0,60	87	0,60
75	0,80	89	0,80	87	0,80
76	1,00	95	1,00	90	1,00
86	1,20	95	1,20	91	1,20
88	1,40	96	1,40	93	1,40
88	1,60	98	1,60	96	1,60
89	1,80	99	1,80	96	1,80
89	2,00	100	2,00	99	2,00
89	2,20	100	2,20	100	2,20
95	2,40	100	2,40	100	2,40
98	2,60	100	2,60	100	2,60
100	2,80	100	2,80	100	2,80
$y = 15,92x^3 - 93,51x^2 + 183,81x - 30$		$y = 18,61x^3 - 113,75x^2 + 223,15x - 40$		$y = 18,95x^3 - 104,66x^2 + 183,89x - 5$	
R ² = 0,9441		R ² = 0,9362		R ² = 0,9274	

En la tabla 4, se muestran los resultados de la calibración al aumentar la velocidad de la rueda a 50 rpm. Puede apreciarse en esta tabla que a partir de un amperaje de 0,60 se separan 74 granos de granate, en contraste con las aperturas de 10 y 25°, respectivamente. Al final de esta tabla, puede apreciarse las ecuaciones y los errores cuadráticos de los ajustes polinomiales realizados a las curvas de producción. Nótese en esta tabla que casi no hay diferencia entre los errores cuadráticos por lo que la curva óptima de producción mostrada en la figura 9 viene dada por aquella curva que con un mínimo amperaje produzca la mayor cantidad de granos separados, como en el caso de la curva negra denotada con triángulos correspondiente a una apertura de 35°. En esta figura se aprecia que todas las curvas convergen y están muy cercanas entre sí.

Tabla 4. Resultados de la discriminación del mineral granate a 50 rpm, con aperturas de 10, 25 y 35°.

Velocidad de la rueda: 50 rpm					
Apertura 10°		Apertura 25°		Apertura 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
1	0,20	0	0,20	22	0,20
16	0,40	7	0,40	37	0,40
58	0,60	54	0,60	74	0,60
81	0,80	82	0,80	86	0,80
88	1,00	91	1,00	92	1,00
95	1,20	94	1,20	94	1,20
99	1,40	97	1,40	96	1,40
100	1,60	99	1,60	99	1,60
100	1,80	100	1,80	100	1,80
100	2,00	100	2,00	100	2,00
100	2,20	100	2,20	100	2,20
100	2,40	100	2,40	100	2,40
100	2,60	100	2,60	100	2,60
100	2,80	100	2,80	100	2,80
$y = 19,17x^3 - 117,48x^2 + 231,52x - 46,06$		$y = 19,74x^3 - 121,29x^2 + 239,79x - 52,07$		$y = 16,12x^3 - 95,84x^2 + 183,07x - 12,49$	
R ² = 0,9802		R ² = 0,963		R ² = 0,9723	

Diamagnéticos

Entre estos minerales se tienen: apatito, topacio, corindón y esfena. Aquí se mostrarán los resultados para el primero y el último de los minerales mencionados anteriormente, debido a que son de interés en las aplicaciones del método de huellas de fisión (Wagner y Van den Haute, 1992) utilizado en el Laboratorio de Termocronología de la UCV.

Apatito

Para calibrar el equipo con este mineral se utilizaron dos muestras de apatitos, uno azul y otro de color marrón ambos de la localidad de Ontario, Canadá. Motivado a que en los casos anteriores las mejores tasas de producción del equipo fueron con la apertura de 35°, se utilizó una apertura de 33° para los minerales de muy poca susceptibilidad magnética. También se utilizaron diferentes velocidades de la rueda, los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 5.

En la figura 10 se representan los resultados obtenidos en la tabla 5 en forma de curvas de producción del equipo, nótese que por ser un mineral diamagnético, su susceptibilidad es muy baja y por tal razón, es difícil tratar de hacer una separación adecuada de este mineral. Las curvas de esta figura se comportan un poco caóticas, no hay un orden y no se puede concluir que parámetro es mejor que el otro, en el mejor de los casos las curvas que representan velocidades de rueda de 10 y 20 rpm, a 2.5 Amperes son las que aparentemente logran una mayor cantidad de granos discriminados, pero el comportamiento para este mineral es completamente aleatorio.

Esfena

En contraste, con el mineral apatito, la esfena tuvo una mejor respuesta magnética, los resultados obtenidos para este mineral a 5 rpm, son presentados en la tabla 6.

En la tabla 6, se aprecia una mayor cantidad de granos separados a muy poco amperaje (0,2 Amp.), y esto es alcanzado con una apertura del splitter de 35°. Sin embargo, al realizar análisis de regresión polinomial, mostrados al final de esta tabla, se observa para esta apertura un error cuadrático de 0,9212, mientras que para 25° éste es de 0,9027 en contraste con la apertura de 10° donde el error es de 0,9832, la discrepancia entre errores, se debe a que los ajustes realizados a las primeras dos curvas fueron lineales, mientras que para 10° fue polinomial. Estos resultados son mostrados en la figura 11, donde se aprecia que el mejor rendimiento es alcanzado con una apertura del splitter de 35° y un amperaje entre 2 y 2.5 amp. Al aumentar la velocidad de la rueda a 50 rpm se obtuvieron resultados similares.

Los resultados de las diferentes separaciones realizadas con el equipo según la respuesta magnética de los minerales son mostrados en la tabla 7.

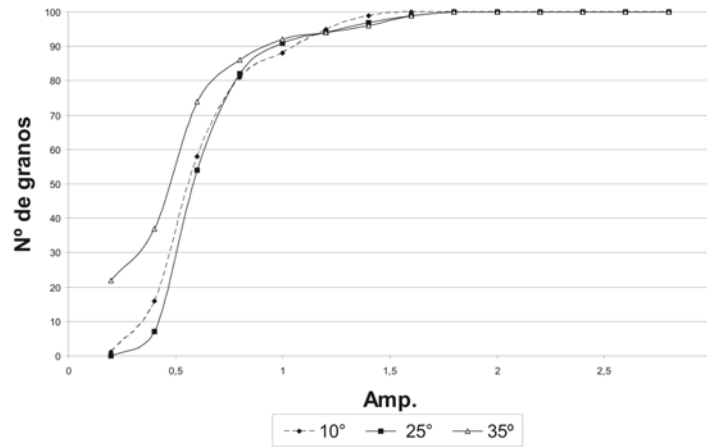


Figura 9. Curvas de producción del equipo para el granate a 50 rpm.

Tabla 5. Resultados de la discriminación del mineral apatito con aperturas de 33° y velocidades de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 rpm.

Apertura 33°											
5 rpm		10 rpm		20 rpm		30 rpm		40 rpm		50 rpm	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
17	0,2	12	0,2	11	0,2	11	0,2	12	0,2	11	0,2
14	0,4	12	0,4	14	0,4	13	0,4	12	0,4	15	0,4
14	0,6	12	0,6	16	0,6	14	0,6	12	0,6	15	0,6
13	0,8	15	0,8	17	0,8	14	0,8	13	0,8	17	0,8
13	1,0	20	1,0	19	1,0	14	1,0	11	1,0	20	1,0
14	1,2	20	1,2	17	1,2	14	1,2	16	1,2	17	1,2
14	1,4	20	1,4	15	1,4	16	1,4	18	1,4	18	1,4
15	1,6	18	1,6	15	1,6	20	1,6	19	1,6	18	1,6
16	1,8	17	1,8	13	1,8	20	1,8	22	1,8	18	1,8
18	2,0	20	2,0	13	2,0	17	2,0	22	2,0	18	2,0
16	2,2	22	2,2	13	2,2	15	2,2	20	2,2	17	2,2
19	2,4	23	2,4	20	2,4	18	2,4	18	2,4	16	2,4
20	2,6	24	2,6	29	2,6	21	2,6	16	2,6	16	2,6
20	2,8	24	2,8	29	2,8	23	2,8	16	2,8	17	2,8
$y=2,23x + 12,58$		$y=3,13x + 12,37$		$y=3,36x + 11$		$y = 4,67x + 11,49$		$y = 3,56x + 11,08$		$y = 2,51x + 13,58$	
$R^2 = 0,5596$		$R^2 = 0,5162$		$R^2 = 0,4309$		$R^2 = 0,8151$		$R^2 = 0,7236$		$R^2 = 0,7662$	

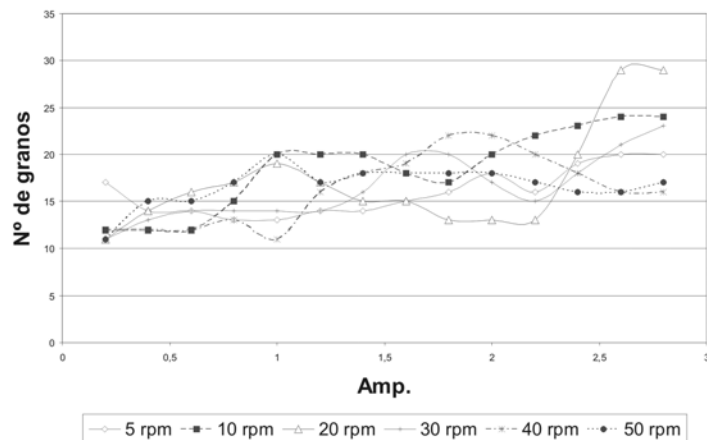


Figura 10. Curvas de producción del equipo para el mineral apatito con una apertura del splitter de 33°.

Para separar minerales se recomienda empezar por los ferromagnéticos ya que estos se separan con poca intensidad (0,2-1) Amp, o simplemente con un imán de mano. Después se procede a separar los paramagnéticos según los rangos sugeridos para estos en la tabla 7, los minerales resultantes después de estos procedimientos serán diamagnéticos, por lo que, se recomienda una mejor depuración mediante otro tipo de separación posterior a la magnética, como por ejemplo: separación por densidades.

Cada uno de los ensayos realizados para calibrar el equipo se realizaron una sola vez, sin embargo, en el laboratorio se encuentran cada una de las muestras en el caso de que algún usuario desee a futuro, evaluar la reproducibilidad del método y calcular los errores de tipo experimental asociados a la calibración.

Tabla 6. Resultados de la discriminación del mineral esfena a 5 rpm, con aperturas de 10, 25 y 35.

Velocidad de la rueda: 5 rpm					
Apertura 10°		Apertura 25°		Apertura 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
0	0,20	0	0,20	37	0,20
0	0,40	0	0,40	40	0,40
0	0,60	0	0,60	42	0,60
0	0,80	0	0,80	45	0,80
5	1,00	8	1,00	45	1,00
11	1,20	11	1,20	46	1,20
13	1,40	18	1,40	50	1,40
18	1,60	27	1,60	64	1,60
35	1,80	35	1,80	69	1,80
40	2,00	48	2,00	82	2,00
48	2,20	80	2,20	85	2,20
48	2,40	82	2,40	93	2,40
64	2,60	85	2,60	95	2,60
75	2,80	89	2,80	98	2,80
$y=11,47x^2-5,07x$		$y=38,78x-23$		$y=23,32x+30$	
$R^2=0,9832$		$R^2=0,9027$		$R^2=0,9212$	

Tabla 7. Resultados óptimos de la calibración del equipo para diferentes minerales.

Mineral	Respuesta magnética	rpm	Splitter	Amp.
Magnetita	Ferromagnética	5	25°	0,2
Pirrotita	Ferromagnética	40	35°	1,16
Augita	Fuertemente paramagnético	10	25°	1,01
Almandino	Paramagnético	40	35°	1,08
Hornblenda	Paramagnético	5	35°	1,48
Estaurolita	Paramagnético	10	35°	1,49
Turmalina	Paramagnético	50	35°	1,76
Diopsido	Débilmente Paramagnético	20	35°	2,80
Esfena	Diamagnético	50	35°	2,80
Corindón	Diamagnético	10	33°	2,80
Topacio	Diamagnético	40	33°	2,80
Apatito	Diamagnético	10	33°	2,80
Cianita	Diamagnético	10	33°	2,80
Anhidrita	Diamagnético	40	33°	2,80
Berilo	Diamagnético	5	33°	2,80
Pirita	Diamagnético	20	33°	2,80
Fluorita	Diamagnético	20	33°	2,80

APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS

Mezcla

Con la finalidad de validar los parámetros de calibración obtenidos en la calibración monomineral, se procedió a mezclar aquellos minerales que podían discriminarse fácilmente según sus propiedades ópticas. En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos para el caso de una mezcla de esfena (diamagnético) con diopsido (débilmente paramagnético). El número de granos mostrado en esta tabla corresponden a granos de diopsido remanentes en el contenedor de minerales magnéticos, mientras los granos de esfenas quedaron en el no magnético.

Separación magnética de minerales detríticos de arenas pertenecientes a la Formación Betijoque, Estado Trujillo.

Los resultados obtenidos anteriormente fueron aplicados a 10 kilogramos de una concentración primaria de minerales mediante el SASMP, pertenecientes a 50 kilogramos de areniscas de la Formación Betijoque, Estado Trujillo, el lector puede revisar el trabajo de Bermúdez *et al.* (2006) para ampliar la información sobre esta concentración primaria.

A cada fracción magnética saliente del separador según los diversos amperajes, se le aplicó un reconocimiento por difracción de rayos X, con la finalidad de determinar los minerales que fueron separados.

En la tabla 9, se resumen los resultados obtenidos de los análisis de difracción realizados a los minerales discriminados por el equipo a diferentes amperajes, velocidades de la rueda (rpm) y apertura del splitter de 33°. También aparecen fragmentos de rocas y cuarzos a diferentes amperajes.

Tabla 8. Resultados de la discriminación del mineral diopsido a 50 rpm, en una mezcla con granos de esfenas usando aperturas del splitter de 10, 25 y 35°.

Esfena mezclada con Diopsido a 50 rpm					
Apertura 10°		Apertura 25°		Apertura 35°	
Granos	Amp	Granos	Amp	Granos	Amp
0	0,20	0	0,20	33	0,20
0	0,40	0	0,40	36	0,40
0	0,60	2	0,60	36	0,60
3	0,80	3	0,80	37	0,80
3	1,00	8	1,00	42	1,00
16	1,20	11	1,20	50	1,20
19	1,40	14	1,40	57	1,40
24	1,60	20	1,60	58	1,60
29	1,80	26	1,80	61	1,80
37	2,00	33	2,00	68	2,00
59	2,20	42	2,20	69	2,20
61	2,40	57	2,40	70	2,40
70	2,60	65	2,60	75	2,60
73	2,80	78	2,80	89	2,80

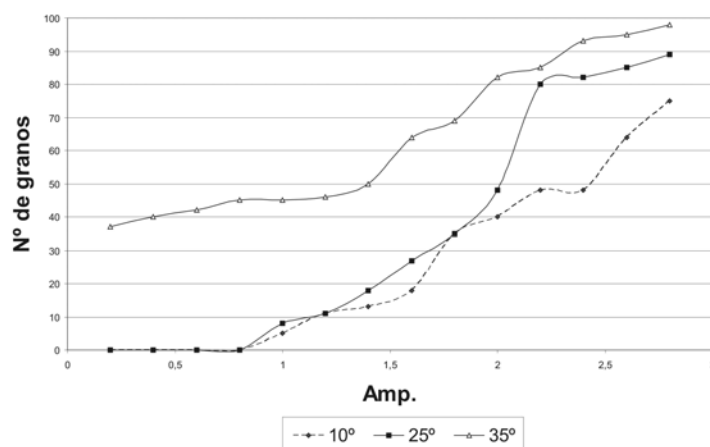


Figura 11. Curvas de producción del equipo para el mineral esfena con una velocidad de rueda de 5 rpm.

Tabla 9. Minerales más representativos discriminados por el equipo según los análisis de difracción de rayos X realizados a la muestra.

Mineral	rpm	Amperaje
Magnetita	3	0.05
Ilmenita	5	0.2
Clinozoisita	5	0.2
Almandino	5	0.2
Biotita	5	0.2
Hornblenda	5	0.6
Turmalina	5	0.6
Esfena	5	1.4
Apatito	5	1.4
Circón	5	1.4

CONCLUSIONES

Mediante el separador magnético Magnet-lift, es posible obtener grandes cantidades de minerales pesados pertenecientes a rocas sedimentarias en muy poco tiempo en comparación con otros separadores, lo cual optimiza el proceso de concentración de minerales con la finalidad de fechar eventos tectotérmicos por el método de huellas de fisión.

Los resultados permiten concluir que a mayor velocidad de la rueda, la variable apertura del splitter no afecta para nada el proceso de separación, esto puede ser el resultado de los efectos de la aceleración centrípeta de la rueda sobre el campo magnético inducido del separador. La condición ideal del equipo en la separación de minerales magnéticos, es una apertura del splitter de 35° y 20 rpm de velocidad de la rueda.

Para muestras no magnéticas o poco magnéticas la producción del equipo es un poco caótica, como en el caso del apatito, para estos casos, se recomienda comenzar la separación de los minerales más magnéticos y posteriormente ir incrementado el campo magnético para aquellos con poca susceptibilidad magnética. En el caso del apatito, este

aparecerá en la fracción magnética a muy altos amperajes lo que coincide con los resultados obtenidos por Hess en 1959 para el separador Frantz.

El tamaño de grano es un factor muy importante al momento de concentrar minerales magnéticos con el separador Magnet-lift, en particular, para este equipo, a pesar de que los ensayos realizados aquí fueron sólo para un tamaño de grano entre 60 y 80, se recomienda a futuro, realizar ensayos con otras granulometrías a fin de estudiar la sensibilidad del equipo y la forma como varía los resultados aquí obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

A Bahjat Khoshaba de Meridian Geosciences LTD, Vancouver-Canadá por sus recomendaciones y comentarios. Al Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela por facilitarnos el reconocimiento de los minerales.

REFERENCIAS

- ANAYA, R. (2004). «Calibración del Separador Magnético de Alta Intensidad Magnet-lift MLH (13) 11-5 y comparación con el Separador Isodinámico Frantz, para la concentración de grandes volúmenes de minerales accesorios pertenecientes a rocas sedimentarias de las Formaciones Isnotú y Betijoque del Estado Trujillo» Escuela de Geología Minas y Geofísica, UCV, Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- BERMÚDEZ, M., MORA, J., GONZÁLEZ, A., NAVARRO, W., LECUE, P. Y AGOSTINI, A. (2006). Diseño, Construcción y Calibración de un Sistema Automatizado para la Separación de Minerales Pesados (SASMP). Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV, Vol. 21, N°3, pp. 41-49.
- CHIQUITO, D. (1999). Disminución por Métodos Magnéticos de los niveles de Hierro en arenas síliceas provenientes de las arenas del pozote, Tinaquillo, Estado Cojedes.

Escuela de Geología Minas y Geofísica, UCV, Trabajo Especial de Grado. Inédito.

CARPCO. (1996). Operating Instructions, High-Intensity Lift-Type. Magnetic Separator, Model MLH (13) 111-5. Carpc, Inc. Jacksonville, Florida U.S.A.

CORONADO Y., Y REY, J. (2003). Aplicación del método de Huellas de Fisión basados en la Técnica del Detector Externo en Apatitos Detríticos de las Areniscas Pertencientes a la Formaciones Trujillo y Misoa aflorantes en la Quebrada Albarico al NO del Edo. Lara. Escuela de Geología Minas y Geofísica, UCV, Trabajo Especial de Grado. Inédito.

HESS, H. H. (1959). Notes on operation of Frantz Isodynamic Magnetic Separator: S.G. Frantz Co. Instrument Instruction Booklet, p. 1-6.

SÁNCHEZ, V. (1965). Materiales Magnéticos. Primera edición, Madrid. Montecorvo. P 190 p.

WAGNER G. & VAN DEN HAUTE P. (1992). Fission track dating. Netherlands: Solid Earth Sciences Library, Kluwer Academic Publishers.