

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS

“Separación eléctrica de minerales de tierras raras”

Para obtener el Título Profesional de:
INGENIERO FÍSICO

Elaborado por:
JOEL BENJAMIN OCHOA VERA

Asesor:
Dr. ABEL AURELIO GUTARRA ESPINOZA

Lima - Perú

2016

*Dedico este trabajo
a mi familia,
en especial a mi madre,
Elvita Vera,
con todo mi amor*

Agradecimientos

Ante todo quiero agradecer a Dios por permitirme investigar en este tema tan interesante y profundo como es la separación de minerales de tierras raras por campo eléctrico, y no solo eso, sino también tener éxito en ello.

Quiero agradecer a mi familia y amigos, por el apoyo constante durante todo este tiempo. Muchas veces no es fácil investigar si uno no tiene apoyo emocional y económico.

El éxito de este trabajo no solo impera en mi esfuerzo y dedicación, como a veces el orgullo podría hacernos creer, sino también en el aporte de mi profesor, el Dr. Abel Gutarra, quien tuvo la idea de separar eléctricamente los minerales, y yo me dispuse a investigar e implementarlo. Su orientación ha sido clave para llevar nuestro trabajo con estrategia y rigurosidad. Por eso también quiero agradecerle de manera sincera por haber contribuido en mi formación como investigador.

Adicionalmente, quiero agradecer a todo el equipo académico del proyecto subvencionado por FINCyT Convenio No. 128-PNICP-PIAP-2015 “Innovaciones de técnicas físicas y químicas para el procesamiento de minerales de tierras raras en el Perú”, en especial a Elizabeth Carrera, quien ha aportado sus conocimientos de mineralogía al proyecto al encontrar la asociación de Feldespato-K con Monacita. Asimismo, agradecer al Ing. Julio Uza por brindarnos el acceso al laboratorio de procesamiento de minerales en la facultad de ingeniería geológica, minera y metalúrgica FIGMM de la universidad.

Agradezco además la colaboración del Dr. José Díaz y Mg. Clemente Luyo, por la operación del microscopio electrónico de barrido SEM, así como también a la facultad de ciencias por las facilidades del caso.

Por supuesto, cómo no agradecer al Sr. Farfán y al Sr. Quinde, equipo técnico - mecánico de la facultad de ciencias, quienes me ayudaron a construir el prototipo de separador eléctrico cuando recién empezaba este proyecto.

Gracias a todos.

Resumen

El presente proyecto consiste en separar eléctricamente minerales, en especial, de tierras raras. El separador eléctrico funciona básicamente con un rotor cilíndrico metálico conectado a tierra, que mantendrá una diferencia de voltaje del orden de kilovoltios con un electrodo ionizante. Este electrodo generará una zona de iones, los cuales cargarán a los minerales que luego serán descargados en el rotor. Los minerales son separados, debido a su conductividad eléctrica, en zonas llamadas conductora, mediana y no conductora.

Se empezó construyendo un separador eléctrico de rotor con alto voltaje, se analizó las variables que influyen en la separación como la velocidad angular, la posición del electrodo ionizante y la posición del alimentador de mineral o tolva. A más velocidad angular, mayor cantidad de material se depositaba en la zona conductora. Adicionalmente, se observó que el tamaño de partículas aumentaba en la zona no conductora, mediana y conductora crecientemente, reportándose los valores de: $(84,6 \pm 22,2) \mu m$, $(159,4 \pm 27,6) \mu m$ y $(218,2 \pm 36,4) \mu m$ respectivamente. El separador funcionó correctamente ya que separó arena gruesa, mostrando mayor concentración de minerales de Rutilo, Ilmenita, Magnetita en la zona conductora, mientras que concentró Kaolinita y Actinolita en la zona no conductora.

Posteriormente se trabajó con un separador eléctrico comercial CARPCO. Antes de trabajar con los minerales de tierras raras de un yacimiento de Cusco, se analizó cómo influyen las variables como velocidad angular, la diferencia de voltaje y la velocidad de vibración del alimentador. Adicionalmente, se realizó un análisis ICP para saber la concentración en ppm de elementos de tierras raras en las muestras, mostrando así que el mineral R-032 era el que tenía mayor concentración que los demás. Por otro lado se midió la resistencia eléctrica de la muestra R-053 a diferentes tamaños de partículas, donde se obtuvo que en un tamaño de $<75,150> \mu m$, la resistencia eléctrica de la zona conductora era $1,58 G\Omega$, mientras que en la zona no conductora fue de $3,67 G\Omega$. Por otro lado cuando se trabajó en un tamaño de $<150,250> \mu m$, las resistencias fueron de $1,61 G\Omega$ y $4,25 G\Omega$ en las zonas

conductora y no conductora respectivamente. Esto fue necesario para saber si la separación era congruente.

Finalmente se trabajó con el mineral R-032. Se realizó un estudio de microscopía electrónica de barrido (SEM) a la muestra, encontrándose que los minerales de tierras raras (Monacita-La, Monacita-Ce) estaban asociados al Feldespato-K ortoclasa. Adicionalmente, se separó eléctricamente a diferentes tamaños concentrando Feldespato-K Ortoclasa y Dolomita en la zona no conductora, y Hematita en la zona conductora. Por lo tanto el separador eléctrico tuvo éxito al concentrar minerales de tierras raras (Monacita) en la zona no conductora asociado al Feldespato-K Ortoclasa.

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	1
Capítulo 2. Fundamento teórico	2
2.1. Teoría de la carga del mineral por bombardeo de iones	3
2.1.1. Carga superficial del mineral con un electrodo positivo	3
2.1.2. Carga superficial del mineral con un electrodo negativo	4
2.2. Dinámica de la partícula cargada	7
2.3.1. Fuerzas sobre la partícula cargada	8
2.3.2. Cálculo de la conductividad mínima	9
2.3.3. Cálculo de la velocidad angular crítica	11
2.3.4. Cálculo del tamaño mínima de partícula	12
2.3.5. Ángulo de separación	12
2.3.6. Factor de adherencia	13
2.3. Teoría sobre la conductividad eléctrica de minerales y rocas	13
Capítulo 3. Procedimiento experimental	16
3.1. Prototipo de separador eléctrico	16
3.1.1. Generación de alto voltaje	16
3.1.2. Equipamiento	18
3.2. Separador eléctrico CARPCO	20
3.2.1. Funcionamiento del separador eléctrico CARPCO	20
3.2.2. Partes del separador eléctrico CARPCO	22

Capítulo 4. Resultados experimentales	24
4.1. Análisis de mineral arena gruesa separado por el prototipo	24
4.1.1. Influencia de la posición del electrodo y de la tolva	24
4.1.2. Tamaño promedio de la partícula según su posición	27
4.1.3. Identificación de minerales por difracción de rayos X (DRX)	30
4.2. Análisis de minerales de un yacimiento de tierras raras separados por el separador eléctrico comercial CARPCO	31
4.2.1. Influencia de la vibración, voltaje y velocidad angular en la separación	31
4.2.2. Contenido de elementos de tierras raras en las muestras de minerales de un yacimiento de Cusco	32
4.2.3. Separación de minerales que componen la muestra R-053 a diferentes tamaños de partícula	34
4.2.4. Resultados de difractogramas de las muestras minerales separadas R-053 y R-032 a diferentes tamaños de partícula	35
4.2.5. Análisis de muestra R-032 por microscopía electrónica de barrido (SEM)	39
Capítulo 5. Discusión	47
5.1. Separación con el prototipo de separador eléctrico	47
5.2. Separación con el separador eléctrico CARPCO	48
Capítulo 6. Conclusiones	52
6.1. Separación con el prototipo de separador eléctrico	52
6.2. Separación con el separador eléctrico CARPCO	52
Capítulo 7. Sugerencias para trabajos a futuro	53
Capítulo 8. Referencias bibliográficas	54
Anexos	55

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

La separación de partículas por alto voltaje ha sido revisada y mejorada durante décadas desde 1947 cuando R. Johnson [1] lo patentó en E.E.U.U. Esta técnica de separación tiene diversas aplicaciones en rubros tales como la industria alimenticia al separar tallos y hojas, en la separación de minerales con valor económico así como en el reciclaje de circuitos electrónicos impresos que contienen cobre. Muchos investigadores han dedicado parte de su vida a la investigación de los procesos de separación eléctrica como Svoboda y Dascalescu [1-6], quienes tienen trabajos significativos desde los 90's, enfocándose en optimizar el proceso mediante métodos computacionales o análisis teóricos y experimentales. Este proceso de separación podría aplicarse a diversos minerales extraídos en Perú.

1.2. Objetivos

1. Diseñar y construir un prototipo de separador eléctrico de rotor con alto voltaje.
2. Separar y analizar componentes de una muestra de arena usando el prototipo construido.
3. Analizar la separación de minerales de tierras raras provenientes de Cusco usando un equipo separador eléctrico comercial.

Capítulo 2. Fundamento teórico

La separación electrostática se basa en la aplicación de una fuerza eléctrica a partículas minerales cargadas. El proceso de separación se puede explicar con la ayuda del gráfico que se muestra en la figura 2.1.

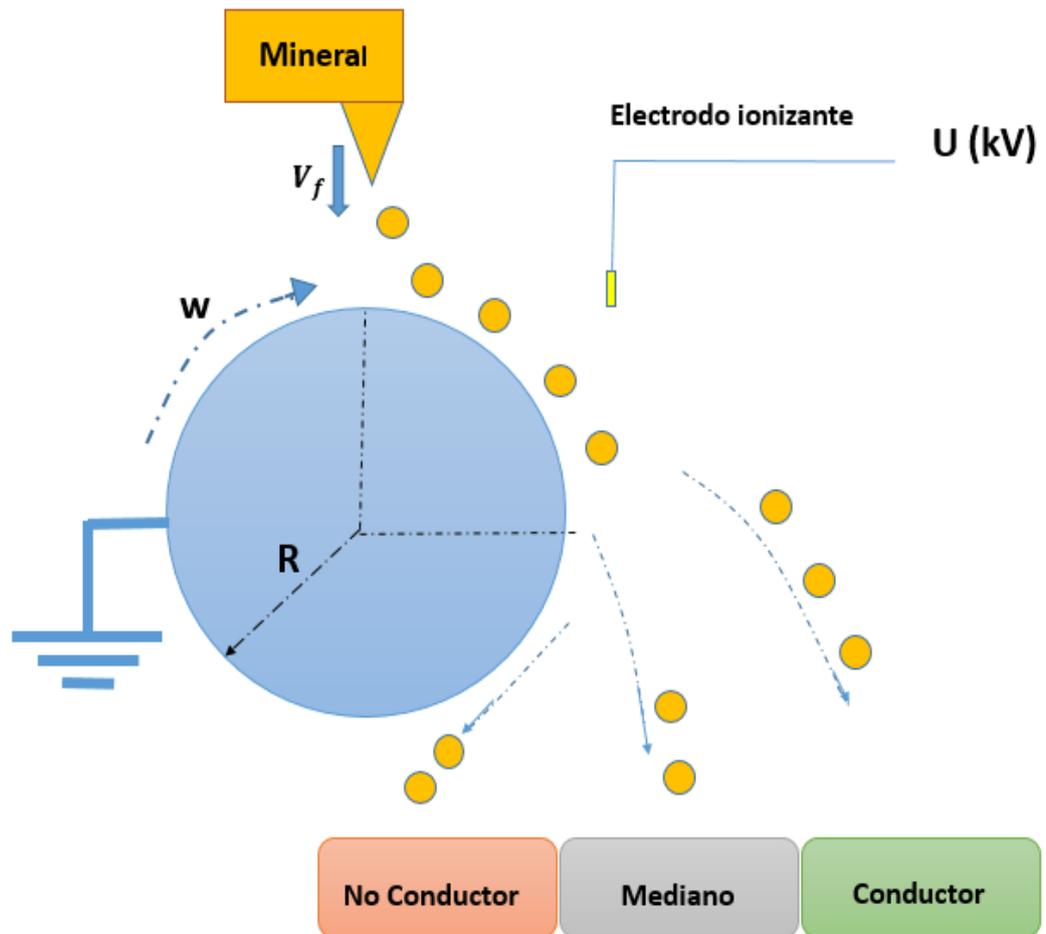


Figura 2.1. Esquema del proceso de separación de minerales que consta del rotor conectado a tierra, la fuente de alto voltaje, electrodo de corona y los espacios donde se depositarán las partículas.

En la separación electrostática, las partículas pueden ser cargadas por 3 mecanismos: por fricción (triboelectricidad), por inducción y bombardeo de iones. Este último proceso es el más significativo.

2.1. Teoría de la carga del mineral por bombardeo de iones [6,7]

2.1.1. Carga superficial del mineral con un electrodo positivo

Cuando un fotón UV del ambiente, cuya energía es mayor que la energía de ionización de las moléculas componentes del aire, incide sobre un átomo neutral, este átomo ionizado libera un electrón, que al ser acelerado por el campo eléctrico ioniza otro átomo neutro, generando un ion positivo (el cual es repelido por el mismo electrodo positivo) y otro electrón, generándose de esta manera una avalancha de electrones, y una región llena de iones positivos como se observa en la figura 2.2.

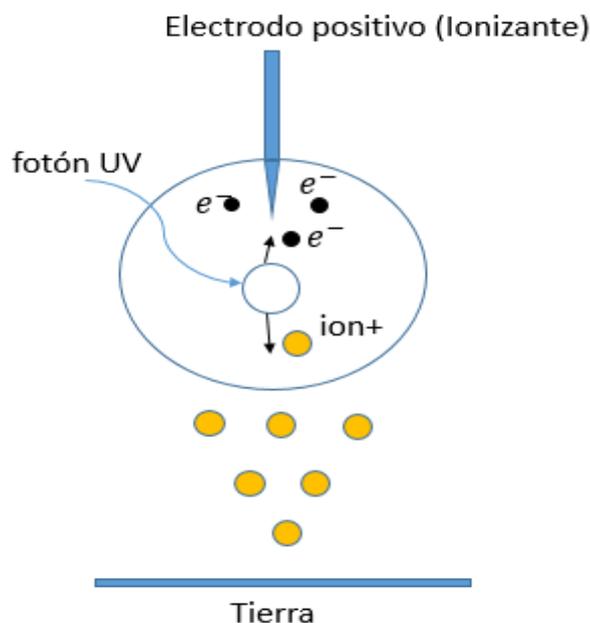


Figura 2.2. Esquema del mecanismo de ionización en un electrodo positivo.

Cuando una partícula atraviesa la zona de iones positivos, se carga con polaridad positiva por bombardeo de iones, y se dirige hacia el rotor debido al campo eléctrico. Cuando la partícula hace contacto con el rotor conectado a tierra, ocurre una transferencia de carga de forma análoga a la de un circuito RC. Algunos materiales, con una alta conductividad, transferirán su carga al rotor rápidamente siendo eyectadas del rotor debido a que disminuye la fuerza imagen (eléctrica) que la mantenía atraída a la superficie de rotor, depositándose así en la zona conductora. Otros materiales, con baja conductividad, tardarán más en transferir

su carga, por lo tanto se desprenderán del rotor hacia la zona no conductora, debido a que la fuerza imagen empezará a resaltar en este proceso como se puede observar en la figura 2.3.

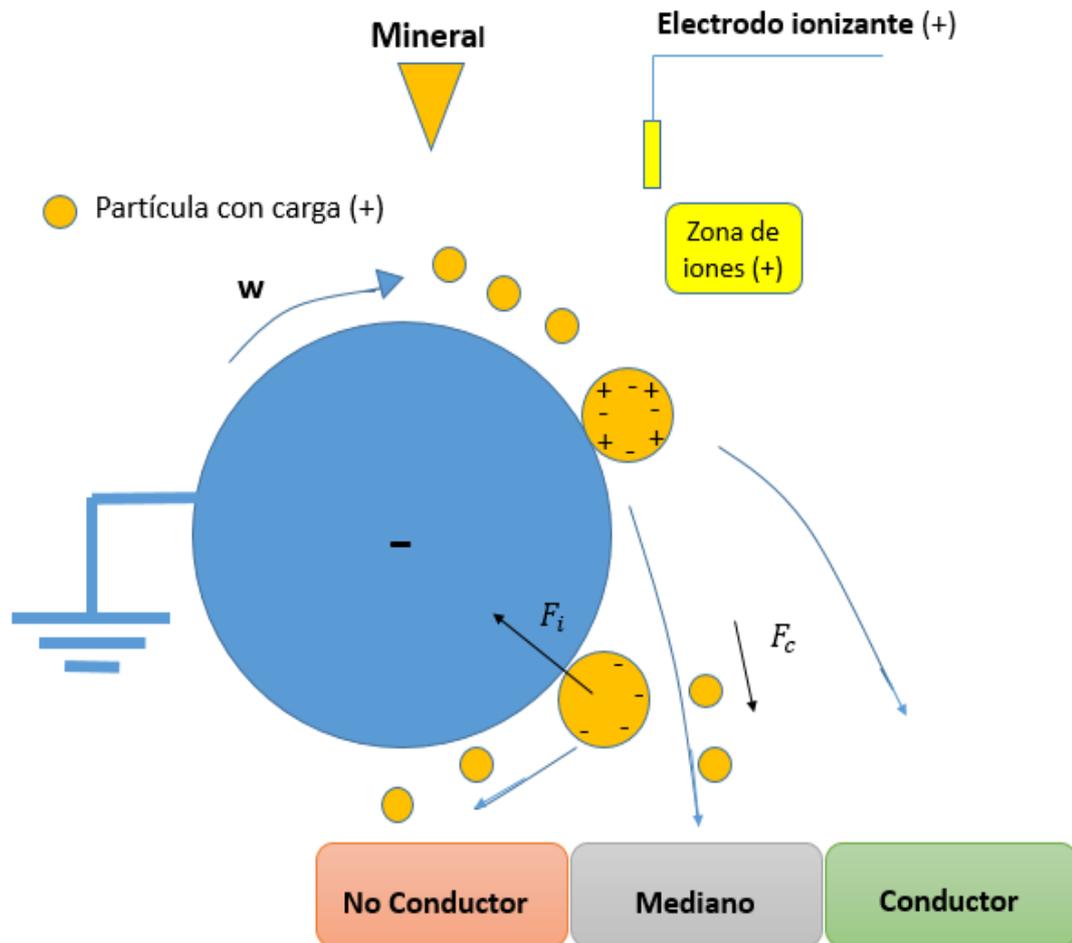


Figura 2.3. Proceso de carga del mineral usando un electrodo positivo.

2.1.2. Carga superficial del mineral con un electrodo negativo

Cuando un fotón del rango UV cuya energía es mayor que la función trabajo del cobre (material del electrodo), incide sobre su superficie, se liberan electrones (efecto fotoeléctrico), algunos con alta y otros con baja energía cinética. Los que adquieren alta energía cinética, ionizan los átomos neutros cercanos al electrodo ionizante generando una zona de iones positivos, los cuales son atraídos por el electrodo ionizador negativo; mientras que los que adquieren baja energía

cinética, al ser repelidos por el electrodo ionizante de la misma polaridad, se alejan de esta zona de iones positivos llegando a una zona de átomos neutros, los cuales se combinan con estos electrones generando una zona de iones negativos. Por lo tanto se tiene dos zonas, una de iones positivos y otra de iones negativos como se ve en la figura 2.4.

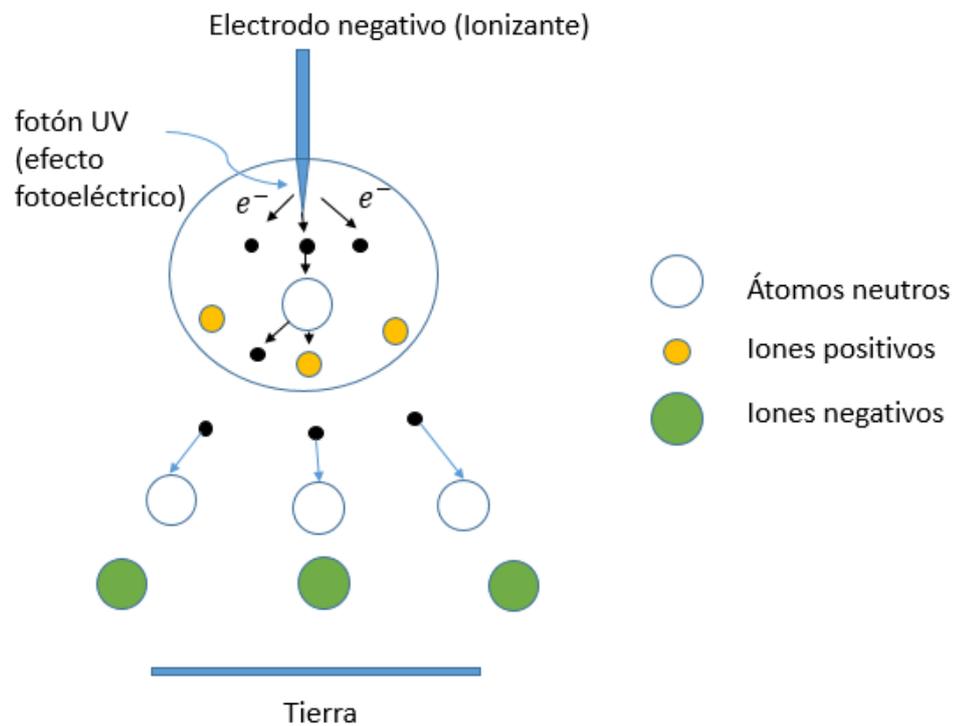


Figura 2.4. Esquema de ionización de un electrodo negativo.

Cuando la partícula atraviesa la zona de iones negativa, es cargada con polaridad negativa por bombardeo de iones, siendo llevada por el campo eléctrico hacia la superficie del rotor. De forma similar al proceso descrito para el electrodo ionizante positivo, su tiempo de permanencia sobre el rotor dependerá de la conductividad eléctrica de la partícula, como se puede observar en la figura 2.5.

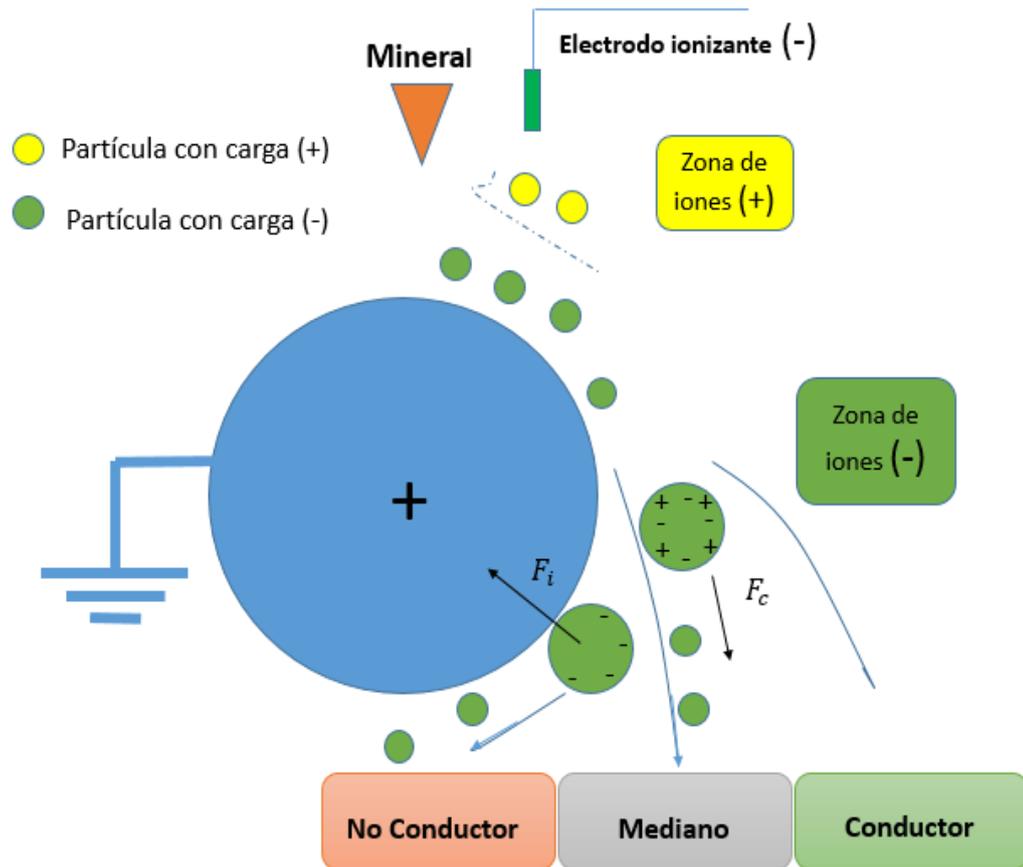


Figura 2.5. Proceso de carga de mineral usando un electrodo negativo.

2.2. Dinámica de la partícula cargada [6-9]

La fuerza de atracción electrostática entre la partícula cargada y el rotor, se puede calcular por el método de carga imagen, como se ilustra en la figura 2.6.

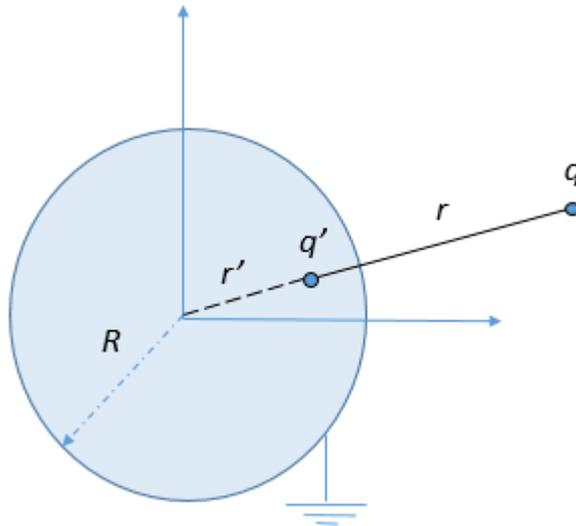


Figura 2.6. Esquema de un disco de radio R , donde se señala carga virtual que ayudará a calcular la fuerza eléctrica o de imagen a una distancia r' .

Las relaciones de carga y distancia serán,

$$q' = -\frac{R}{r}q, \quad (1)$$

$$r' = \frac{R^2}{r}, \quad (2)$$

donde, q' es la carga virtual y r' es la posición de la carga virtual.

El módulo de la fuerza eléctrica entre la partícula y el rotor es,

$$F_i = \frac{-Kq^2rR}{(r^2-R^2)^2}, \quad (3)$$

$$\text{donde } K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad (4)$$

y ϵ_0 es la permitividad eléctrica del aire.

2.2.1. Fuerzas en el proceso de separación

En la figura 2.7 se indican las cinco fuerzas que determinan la dinámica de la partícula cargada en un sistema de referencia no inercial: fuerza de imagen (F_i), la fuerza centrífuga (F_c), la fuerza de gravedad (F_g), la fuerza de fricción (F_f) y la normal a la superficie de la partícula (N).

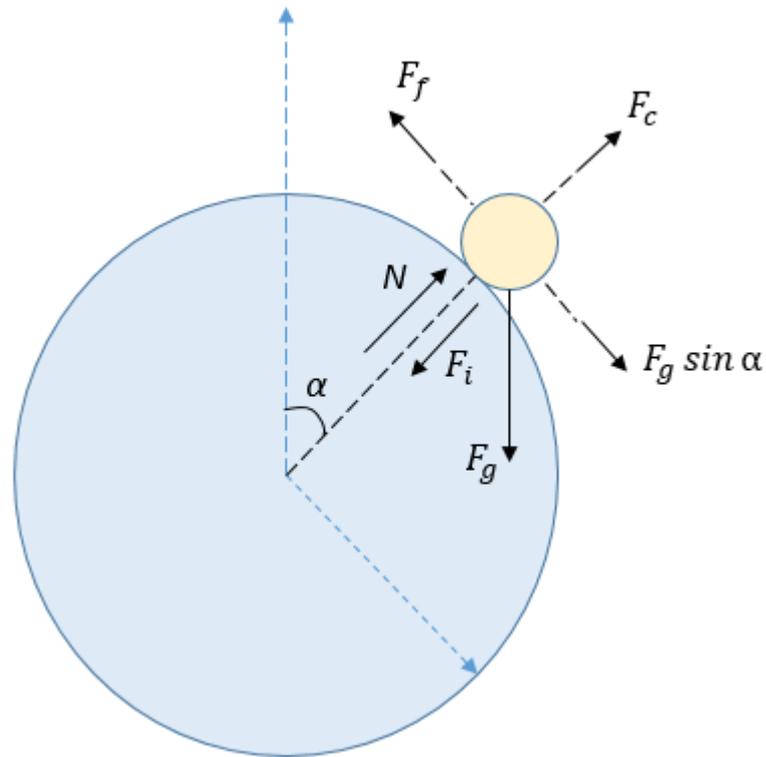


Figura 2.7. Representación de fuerzas en el proceso de separación eléctrica.

Para que la partícula sea eyectada se debe cumplir que,

$$F_i + F_g \cos \alpha \leq F_c + N \quad , \quad (5)$$

$$\text{Además } N = \frac{F_g \text{ sen } \alpha}{\mu} \quad , \quad (6)$$

$$F_g = mg \quad , \quad (7)$$

$$F_c = \frac{mv^2}{R} \quad , \quad (8)$$

$$v = \omega R \quad , \quad (9)$$

$$m = \rho V , \quad (10)$$

$$V = \frac{4\pi b^3}{3} , \quad (11)$$

Donde b es el radio de la partícula, ρ es la densidad de partícula, V es el volumen de la partícula, w es la velocidad angular del rotor, v es la velocidad de la partícula, m es la masa de la partícula y μ es la constante de rozamiento.

Por lo tanto, la carga de la partícula para ser eyectada del rotor deberá cumplir,

$$q^2 \leq \frac{16}{3} \pi^2 \varepsilon_0 b^3 \rho \left\{ \frac{(r^2 - R^2)^2}{r} \left[\frac{g}{R} \left(\frac{\sin \alpha}{\mu} - \cos \alpha \right) + w^2 \right] \right\} , \quad (12)$$

donde α es el ángulo que va desde el eje hasta donde se encuentra la partícula.

$$\text{Si se reemplaza } Z = \left\{ \frac{(r^2 - R^2)^2}{r} \left[\frac{g}{R} \left(\frac{\sin \alpha}{\mu} - \cos \alpha \right) + w^2 \right] \right\} , \quad (13)$$

la expresión anterior se puede escribir,

$$q^2 \leq \frac{16}{3} \pi^2 \varepsilon_0 b^3 \rho Z . \quad (14)$$

2.3.1. Cálculo de la conductividad mínima

La descarga de la partícula sobre la superficie del rotor, puede representarse como la que se asocia a un circuito serial R-C con un tiempo de relajación τ , entonces,

$$q = q_0 e^{-t/\tau} , \quad (15)$$

Por lo tanto el tiempo de relajación viene dado por

$$\tau = RC = \left(\rho \frac{l}{A} \right) \left(A \frac{\varepsilon}{l} \right) = \frac{\varepsilon}{\gamma} , \quad (16)$$

donde ε es la permitividad eléctrica del material y γ es la conductividad eléctrica de la partícula.

Por lo tanto la dependencia de la densidad de carga superficial en relación con el tiempo viene dado por,

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\tau} = \sigma_0 e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon} t} , \quad (17)$$

σ_0 es la máxima densidad superficial de carga,

$$\text{además se sabe que } \sigma = \frac{q}{A_s}, \quad (18)$$

donde A_s es el área superficial de la partícula ,

$$A_s = 4\pi b^2, \quad (19)$$

entonces se reemplaza (16, 17, 18) en (14)

para que la partícula sea eyectada del rotor, su conductividad debe satisfacer,

$$\gamma \geq -\frac{\varepsilon}{2t} \ln\left(\frac{\varepsilon_0 \rho Z}{3\sigma_0^2 b}\right). \quad (20)$$

La densidad superficial de carga máxima depende de la geometría de la partícula, es decir está en función del radio de la partícula,

$$\sigma_0 = 8.18 * 10^{-6} * b^{-0.3} \text{ (Relación experimental [9])}, \quad (21)$$

donde b es el radio de la partícula considerando a que se asemeja a una pequeña esfera.

Reemplazamos (21) en (20)

$$\gamma \geq -\frac{\varepsilon}{2t} \ln(0,5x10^{10} \varepsilon_0 \rho b^{-0.4} Z). \quad (22)$$

Retomando (13)

Al no considerar la gravedad en este cálculo la relación (13) se reduce ya que Z tendría la siguiente forma,

$$Z = \frac{(r^2 - R^2)^2}{r} w^2, \quad (23)$$

Se realiza una aproximación a continuación

$$r = R + b, \text{ además } R \gg b,$$

$$Z = 4Rb^2 w^2, \quad (24)$$

se reemplaza (24) en (22) ,

$$\gamma \geq -\frac{\varepsilon}{2t} \ln(2x10^{10} \varepsilon_0 \rho b^{1.6} R w^2), \quad (25)$$

se llamará γ_{min} a esta última expresión, que es la conductividad mínima necesaria para que la partícula sea eyectada del rotor

Al analizar la Ec.(25) se observa que si se aumenta el radio del rotor R , se recuperaría más material en el recipiente de partículas conductivas pero esto significaría que habría menos selectividad en la separación, sin embargo, si se reduce el radio habría alta selectividad.

Otro punto sería que a bajos valores de ρ , la selectividad del material sería alta, sin embargo, a altos valores de ρ causaría alta recuperación de material ya que γ_{min} disminuiría, es decir habría más material recolectado en el recipiente conductivo.

Además si aumentamos ε_r , w y μ provocaría una alta selectividad del material (γ_{min} aumenta) a expensas de la recuperación en el recipiente de partículas conductivas.

2.3.2. Análisis de la velocidad angular crítica

En primera aproximación se podría decir que para que se desprenda la partícula, debe cumplirse que la fuerza centrífuga F_c debe ser mayor igual que la fuerza imagen F_i .

$$F_c \geq F_i ,$$

De (3) y (8)

$$\frac{mv^2}{R} \geq \frac{K q^2 r R}{(r^2 - R^2)^2} ,$$

similar a lo que se hizo para calcular la conductividad mínima sin considerar la fuerza de gravedad, se retoma Ec.(25) y se despeja,

$$w \geq \left[\frac{10^{-10} e^{-2\gamma t / \varepsilon}}{2\varepsilon_0 \rho R b^{1.6}} \right]^{1/2} , \quad (26)$$

siendo este último término la velocidad angular crítica w_c necesaria para que una partícula sea eyectada por el rotor.

Al analizar la Ec.(26), se puede notar que si aumentamos el tamaño de b , el tamaño del w_c disminuiría.

2.3.3. Análisis del tamaño de la partícula

Similar al análisis de la velocidad angular crítica, se puede analizar el tamaño de partícula mínima.

Utilizando las ecuaciones (22) y (25) se despeja

$$b \geq \left\{ 2 \times 10^{10} R \varepsilon_0 \rho e^{2\gamma t / \varepsilon} \left[\frac{g}{R} \left(\frac{\sin \alpha}{\mu} - \cos \alpha \right) + w^2 \right] \right\}^{-0,625}, \quad (27)$$

despreciando los efectos de la fuerza de gravedad

$$b \geq \left\{ 2 \times 10^{10} R \varepsilon_0 \rho e^{2\gamma t / \varepsilon} w^2 \right\}^{-0,625}, \quad (28)$$

Siendo este último término el tamaño de partícula mínima b_{min} para ser arrojada por el rotor.

Aquellas partículas que posean un tamaño menor que el b_{min} se quedarán atrapadas en el rotor.

2.3.4. Angulo de separación

El ángulo α en el cual las partículas son arrojadas por el rotor está en función del tamaño de la partícula b y su conductividad γ , y del radio del rotor R y su velocidad angular w y del tiempo de descarga de la carga eléctrica.

Retomando la Ec.(5),

$$F_i + F_g \cos \alpha \leq F_c + N$$

considerando Ecs.[5-9] y reemplazando,

$$\frac{Kq^2 r R}{(r^2 - R^2)^2} - mw^2 R + mq \cos \alpha \leq \frac{mg \sin \alpha}{\mu},$$

se aproxima $r = R + b$,

$$\frac{3q^2}{64\pi^2 \varepsilon_0 \rho g b^5} - \frac{w^2 R}{g} \leq \frac{\sin \alpha}{\mu} - \cos \alpha,$$

retomando la Ecs.[12-22] y reemplazando,

$$\frac{5.02 \times 10^{-11} e^{-\frac{2\gamma t}{\varepsilon}}}{\varepsilon_0 \rho g b^{1.6}} - \frac{w^2 R}{g} \leq \frac{\sin \alpha}{\mu} - \cos \alpha \quad (29)$$

El ángulo de separación podría ser calculado mediante la Ec. (29) con la ayuda de métodos numéricos.

2.3.5. El factor de adherencia

Describe la tendencia de una partícula de quedarse atrapada en el rotor y es denotada por la siguiente relación entre la fuerza eléctrica imagen y la fuerza centrífuga.

$$p = \frac{F_i}{F_c}, \quad (30)$$

se desprecia la fuerza de gravedad para estos fines.

Si $p > 1$, las partículas se adherirán a la superficie del rotor.

Si $p < 1$, las partículas serán arrojadas del rotor.

con la aproximación de $R \gg b$ se reescribe p ,

$$p = \frac{10^{-10} e^{-2\gamma t/\epsilon}}{2\epsilon_0 \rho w^2 R b^{1.6}}, \quad (31)$$

Se ve que al incrementar el tamaño de la partícula b , el radio del rotor R y la velocidad angular w , el valor del factor de adherencia disminuye.

2.4. Teoría sobre la conductividad eléctrica en minerales y rocas [10-12]

Es muy difícil poder hablar de la conductividad eléctrica de un material, en especial minerales, sin antes estudiar algunos factores que contribuyen a esta, por ejemplo, pueden ser bastante sensibles al contenido de agua, a la temperatura, a la presión de oxígeno en el ambiente, a la presencia de ion Fe^{3+} en su composición y a su naturaleza eléctrica en sí, que puede ser metálica, semiconductor o aislante.

Cuando un campo eléctrico es aplicado, la corriente eléctrica se explica por el movimiento de partículas cargadas (electrones, huecos o iones). Por lo tanto, la conductividad eléctrica es proporcional a la concentración de portadores cargados y su movilidad.

Es decir,

$$\gamma = \sum q_i n_i \mu_i ,$$

donde q_i es la carga del portador i , n_i es el número de portadores i por unidad de volumen, μ_i es su movilidad y γ es la conductividad eléctrica.

En los metales, los portadores de carga son los electrones libres y su movilidad es controlada por la dispersión debido a los fonones y es dependiente de la temperatura (μ es proporcional a $\frac{1}{T}$).

Sin embargo, la mayoría de minerales son semiconductores o aislantes eléctricos donde las partículas cargadas están presentes solo por activación térmica y sus concentraciones son bastante dependientes a la cantidad de impurezas así como de la temperatura. Adicionalmente, la movilidad de portadores μ es bastante sensible a la temperatura. Otros agentes externos que influyen en la conductividad del mineral son el contenido de agua, sea adsorbida en la superficie o absorbida volumétricamente (bulk) y la presión parcial de oxígeno que puede modificar la densidad electrónica superficial del mineral debido a su adsorción.

Cabe resaltar que generalmente los silicatos o minerales libres de metales de transición, como “ MgO ” o “ Mg_2SiO_4 ”, presentan un gran ancho de banda (E_{gap}), por lo tanto, una pequeña contribución del mecanismo de conducción intrínseca. En efecto, la conductividad eléctrica de minerales típicos se debe a “impurezas” como el ion férrico Fe^{3+} y la presencia de agua.

Por ejemplo, si se analizara la conductividad debido al Hierro en la composición, se podría dar cuenta que el Fe tiene electrones débilmente ligados al núcleo en el orbital d . Consecuentemente, es muy fácil remover un electrón de la banda de valencia del Fe^{2+} al Fe^{3+} . El ion férrico Fe^{3+} producirá un nivel de impurezas en E_{gap} , el cual permitirá que electrones de la banda de valencia serán activados para cambiar el ion férrico Fe^{3+} a ferroso Fe^{2+} . Como este nivel acepta electrones de la banda de valencia, se llamará nivel **aceptor**. Cuando esta transición ocurre por activación térmica, la corriente eléctrica se debe al salto de electrones entre el ion férrico Fe^{3+} y el ion ferroso Fe^{2+} y también se debe a los huecos creados en la banda de valencia.

Otros factores que afectan a la conductividad eléctrica son la presión parcial de oxígeno O_2 y la concentración de agua en su interior del mineral. Cabe resaltar que la concentración de ion férrico Fe^{3+} aumenta con la presión de O_2 del ambiente. Adicionalmente, el contenido de agua en el mineral contribuye a la difusión iónica por lo que las migraciones de iones cuando un campo es aplicado contribuyen también a la conductividad eléctrica.

En una aproximación general, basada en la experiencia con minerales y rocas, podemos clasificarlos como buenos, medianos y malos conductores dentro de los rangos siguientes, por ejemplo, los buenos conductores tienen una conductividad eléctrica de 1 a $10^8 Sm^{-1}$, los medianos de 10^{-7} a $1 Sm^{-1}$ y los malos conductores menores de $10^{-7} Sm^{-1}$.

Se podría decir que los metales, el grafito, algunos sulfuros y algunos óxidos como la magnetita y la ilmenita son buenos o medianos conductores. Por otro lado, los silicatos, fosfatos, carbonatos y sulfatos en su mayoría son no conductores.

Tabla 1. Propiedades eléctricas de minerales importantes en este trabajo. [11,12]

Mineral	Compuesto	Propiedad Eléctrica
Rutilo	TiO_2	Conductor
Ilmenita	$Fe^{2+}TiO_3$	Conductor
Magnetita	Fe_3O_4	Conductor
Cuarzo	SiO_2	No conductor
Kaolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	No conductor
Anatasa	TiO_2	No conductor
Hematita	Fe_2O_3	Conductor
Actinolita	$Ca_2(Mg;Fe^{2+})Si_8O_{22}(OH)_{22}$	No conductor
Muscovita	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_{1.8}F_{0.2}$	No conductor
Pirita	FeS_2	Conductor
Feldespato–K Ortoclasa	$KAlSi_3O_8$	No conductor
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	No conductor
Calcita	$CaCO_3$	No conductor
Actinolita	$Ca_2(Mg,Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$	No conductor
Hornblenda	$Ca_2[Mg_4(Al,Fe^{3+})]Si_7AlO_{22}(OH)_2$	No conductor
Calcopirita	$CuFeS_2$	Conductor
Monacita	$(Ce,La,Y,Th)PO_4$	No conductor
Diópsido	$CaMgSi_2O_6$	No conductor

Capítulo 3. Procedimiento experimental

3.1. Prototipo de separador eléctrico

3.1.1. Generación de alto voltaje

El prototipo de separador eléctrico necesita una fuente de alto voltaje. Para ello, se utilizó un transformador Flyback y un circuito oscilador alimentador.

El transformador flyback (Véase figura 3.1) se encarga de generar alta tensión. La diferencia respecto de un transformador de corriente habitual es la frecuencia a la que trabaja la bobina primaria y la forma de la onda entrante, siendo en el flyback del orden de kHz y cuadrada. El devanado que hace posible esta alta tensión puede tener miles de vueltas con alambre del número #42 en la bobina secundaria. El voltaje logrado en la bobina secundaria se incrementa con la ayuda de un multiplicador de voltaje usualmente incorporado en el transformador.

El circuito oscilador (Véase figura 3.2), básicamente consiste en el Timer 555, el cual por su salida PIN 3, emite una onda cuadrada cuya frecuencia puede ser regulada por las resistencias y condensadores. Para nuestros fines, del circuito oscilador se obtiene una señal cuadrada de 12 V con una frecuencia (1kHz).



Figura 3.1. El Transformador Flyback que funciona con alta frecuencia (kHz).

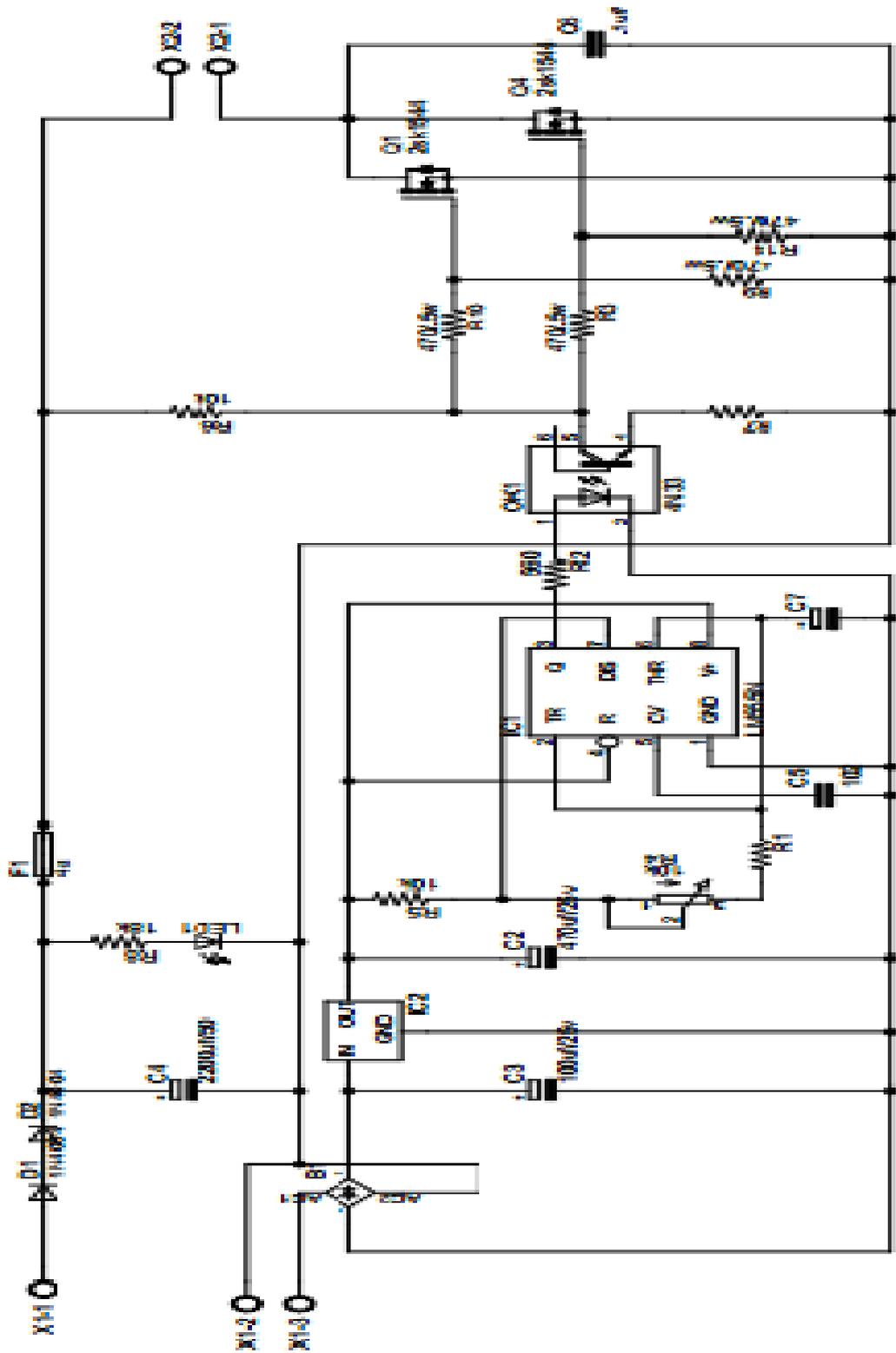


Figura 3.2. El circuito oscilador que alimenta al transformador flyback.

3.1.2. Equipamiento

Considerando la figura 3.3 y la figura 3.4, se montó el cilindro rotor de radio 10 cm y 6 cm de longitud conectado a tierra, que es girado con la ayuda de un motor eléctrico de alto torque a una velocidad angular π y $2\pi \frac{rad}{s}$. También se montó unos parantes para sostener el electrodo de corona con polaridad negativa. La diferencia de voltaje entre el electrodo y el rotor, el cual es generado por el transformador flyback, permite ionizar el medio y cargar a las partículas para ser luego descargadas en el rotor conectado a tierra. La muestra que se usó fue de arena gruesa comercial usada en construcción. La arena fue tamizada a tamaños menores a $250 \mu m$. Se varió la posición del electrodo y de la tolva (que contenía la arena) para poder observar diferencias en la separación. Las partículas (granos de arena) después de hacer contacto con el rotor se recogen en una de las tres bandejas, de acuerdo a su comportamiento eléctrico, tal como se explicó en el Capítulo 2. Para cada configuración, se fotografiaron los tamaños promedio de partículas de arena que cayeron en cada una de las bandejas, a las que se denominarán, zona conductora, mediana y no conductora. Para obtener el tamaño promedio de partícula se utilizó una cámara digital DinoCapture 2.0, la cual fue previamente calibrada.

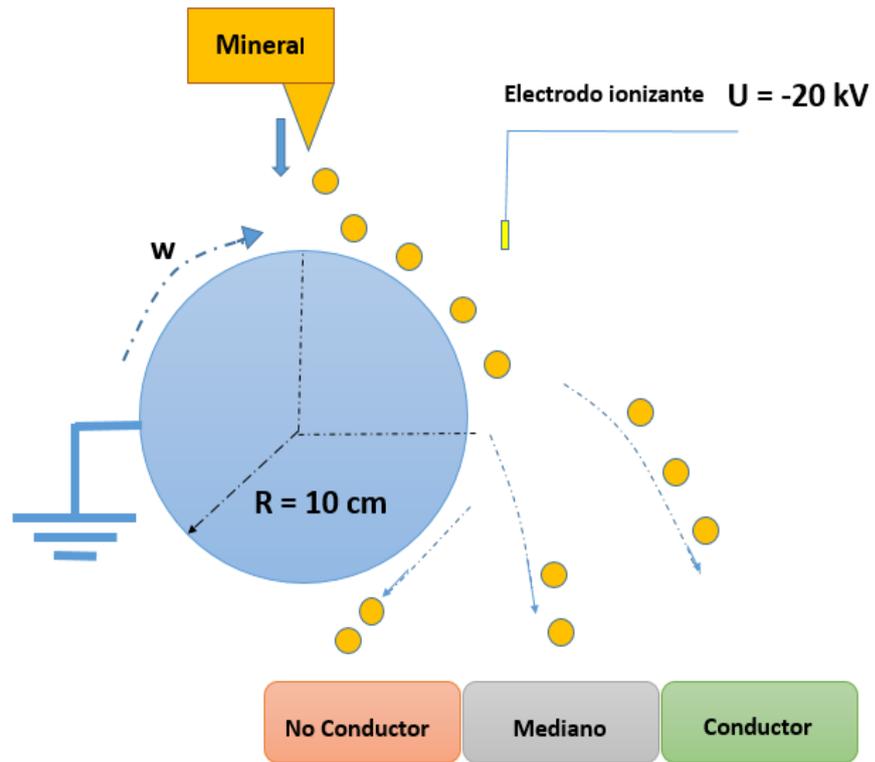


Figura 3.3. Esquema del prototipo separador eléctrico.



Figura 3.4. El prototipo separador eléctrico construido en la facultad de ciencias.

3.2. Separador Eléctrico Comercial CARPCO

3.2.1. Funcionamiento del Separador comercial CARPCO

Este separador eléctrico es de fabricación estadounidense. Fue donado a la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica (FIGMM) de la Universidad Nacional de Ingeniería el año 1990, en el marco de una cooperación JICA por el gobierno de Japón. Terminado el proyecto, y por fallas técnicas, estuvo sin uso por varios años. En este proyecto, se partió de la inspección, diagnóstico, reparación y operación completa del equipo.

El separador eléctrico CARPCO (Véase esquema en la Figura 3.5. y Figura 3.6.), funciona de igual forma que el prototipo separador eléctrico que se construyó en la etapa anterior. El alto voltaje proviene de un transformador embebido en aceite, con un set de 20 diodos rectificadores de alto voltaje. El cilindro rotor es de metal macizo y está conectado a tierra de bajo ohmiaje (5Ω aproximadamente), por donde se descargará el rotor. El proceso de separación es el mismo que se explicó en el fundamento teórico. Los minerales se cargan debido a los iones generados por el electrodo ionizador, y se descargarán en el rotor. Este modelo comercial, posee también un cepillo y una fuente de voltaje AC, los cuales ayudan a extraer a las partículas que quedan impregnadas en el rotor sin caer a alguna de las bandejas.

El electrodo ionizador y separador (el cual ayuda a separar los minerales conductores más grandes) son alimentadas por el mismo voltaje suministrado por la fuente de voltaje DC, y en este trabajo se utilizó la polaridad positiva de estos electrodos.

Los minerales fueron puestos en el horno a una temperatura de 60°C , con el fin de que estén secos al momento de ser separados eléctricamente, ya que la humedad podría afectar la conductividad del material y por lo tanto, la separación. Adicionalmente, la lámpara incandescente incorporada al equipo, se encendía previamente al trabajo de separación para deshumer el ambiente próximo al rotor.

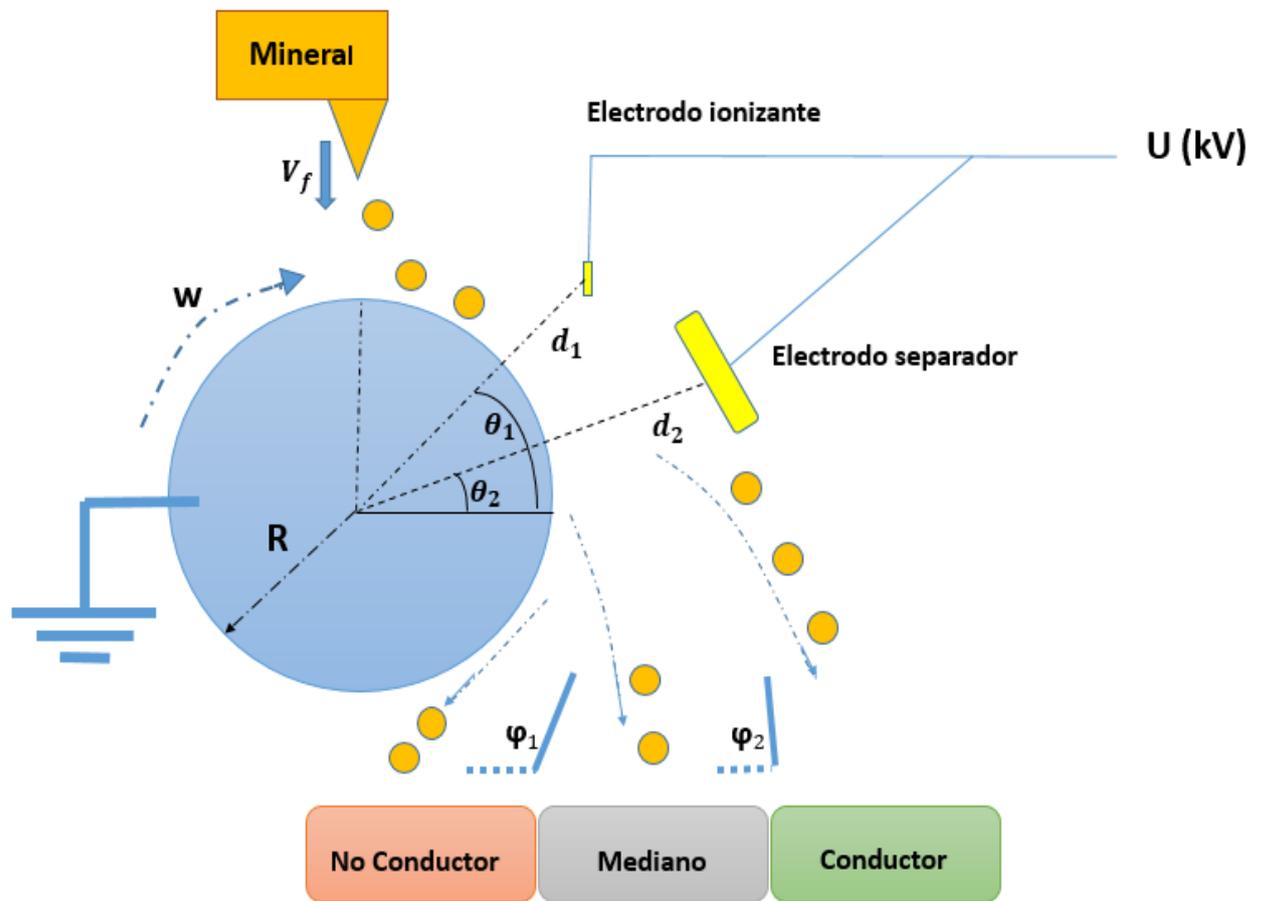


Figura 3.5. Esquema del Separador Eléctrico comercial CARPCO.

3.2.2. Partes del Separador Eléctrico Comercial CARPCO



Figura 3.6. Partes del Separador Eléctrico CARPCO.

- **Tolva:** Es un alimentador el cual tiene un motor que lo hace vibrar para obtener diferentes flujos de masa de mineral que caerán al rotor. Las velocidades de vibración del alimentador o tolva van de 0 a 100 (valor nominal).
- **Lámpara:** Es una lámpara incandescente infrarroja, que sirve para calentar la zona cercana al cilindro rotor, con el fin de disminuir la humedad.
- **Cepillo:** Sirve para poder arrancar las partículas impregnadas al rotor que no lograron caer a la zona no conductora.
- **Electrodo AC:** Es el electrodo que proviene de la fuente de voltaje AC, el cual sirve para desprender partículas impregnadas al rotor, es decir, es otro método de limpieza, así como el cepillo

- **Fuente de voltaje AC:** Es una fuente de alto voltaje que eleva la tensión de 110 V a 1-50kV, el cual es controlado por un variac, en el área de control. Este alimenta al electrodo AC.
- **Electrodo Ionizador DC:** Este electrodo proviene de la fuente de voltaje DC, y su función es ionizar el aire comprendido entre el rotor y el electrodo ionizante, para poder cargar los minerales.
- **Electrodo Separador:** También proviene de la fuente de voltaje DC, este electrodo ayuda a separar los minerales conductores.
- **Rotor:** Este cilindro rotor metálico macizo, estará conectado a tierra y girará a una velocidad angular dada. Sirve para descargar a los minerales y separarlos posteriormente. Hay rotores de 16, 26 y 40 cm de diámetro. Para el presente trabajo se usó el de 26 cm de diámetro.
- **Zonas de Separación:** Son los recipientes en los cuales los minerales separados se depositarán al final. Se tiene recipientes rotulados como NC (No conductor), M (Medianos), C (Conductor).
- **Áreas de Control:** Esta área es para poder variar los parámetros de la separación como por ejemplo, variar la velocidad angular del rotor, variar la cantidad de kilovoltios de las fuentes de voltaje AC y DC, variar la velocidad de vibración de la tolva y encender la lámpara incandescente.
- **Fuente de Voltaje DC:** Esta fuente de voltaje DC es muy importante, el cual alimenta al electrodo ionizante y al electrodo separador. Eleva la tensión de 110 V a 1-50kV, y es controlado en el área de control a través de un variac.

Capítulo 4. Resultados experimentales

4.1. Análisis de mineral arena gruesa separado por el prototipo

4.1.1. Influencia de la posición del electrodo y de la tolva

En las siguientes tablas se observará la diferencia que existe al colocar el electrodo ionizador y la tolva en diferentes posiciones.

Tabla 2. Distribución de masas en la zona conductora, mediana y no conductora para velocidades angulares del rotor π y 2π rad/s, con la posición del electrodo en (12,10) cm y de la fuente de arena en (10,10) cm tamizada con una malla de $250 \mu m$. La masa ingresante fue 0,5 kg de arena.

w (rad/s)	C(g)	M(g)	NC(g)	total(g)
π	292,5	176,5	13,5	482,5
2π	347,5	125,5	9,5	482,5

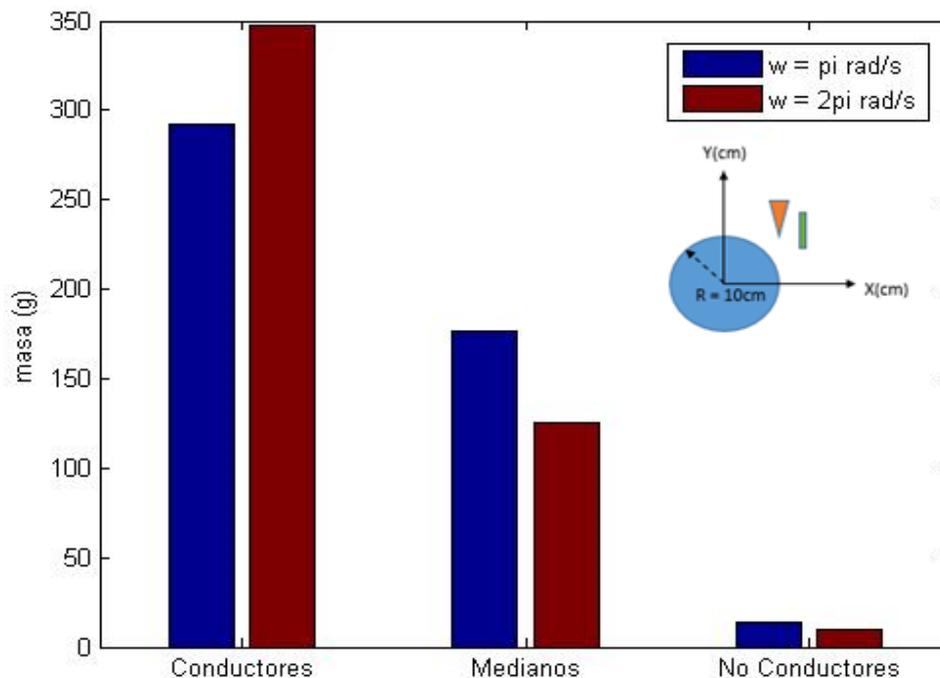


Figura 4.1. Gráfico de barras que representa la distribución de masas en las zonas C, M, NC de la Tabla 2.

Tabla 3. Distribución de masas en la zona conductora, mediana y no conductora para velocidades angulares del rotor π y 2π rad/s, con la posición del electrodo en (12,1) cm y de la fuente de arena en (10,10) cm tamizada con una malla de $250 \mu m$. La masa ingresante fue de 0,5 kg de arena.

w (rad/s)	C(g)	M(g)	NC(g)	total(g)
π	171,5	249,5	53,5	474,5
2π	175,5	241,5	51,5	468,5

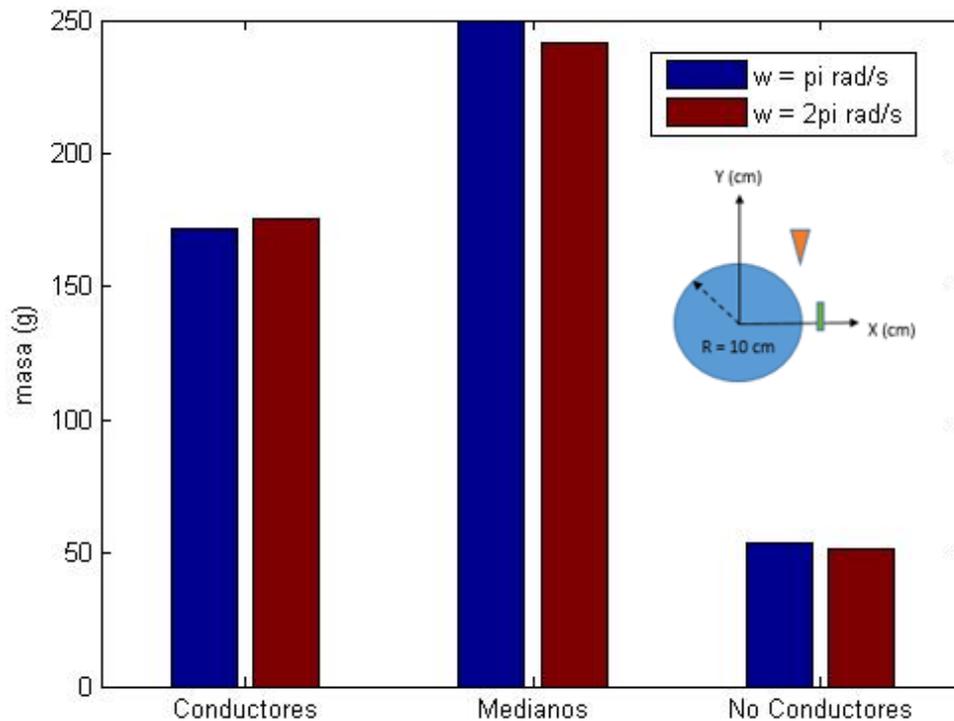


Figura 4.2. Gráfico de barras que representa la distribución de masas en las zonas C, M, NC de la Tabla 3.

Tabla 4. Distribución de masas en la zona conductora, mediana y no conductora para velocidades angulares del rotor π y 2π rad/s, con la posición del electrodo en (5,15) cm y de la fuente de arena en (3,15) cm tamizada con una malla de $250 \mu m$. La masa ingresante fue de 0,5 kg de arena.

$w(\text{rad/s})$	C(g)	M(g)	NC(g)	total(g)
π	358,5	96,5	17,5	472,5
2π	413,5	56,5	9,5	479,5

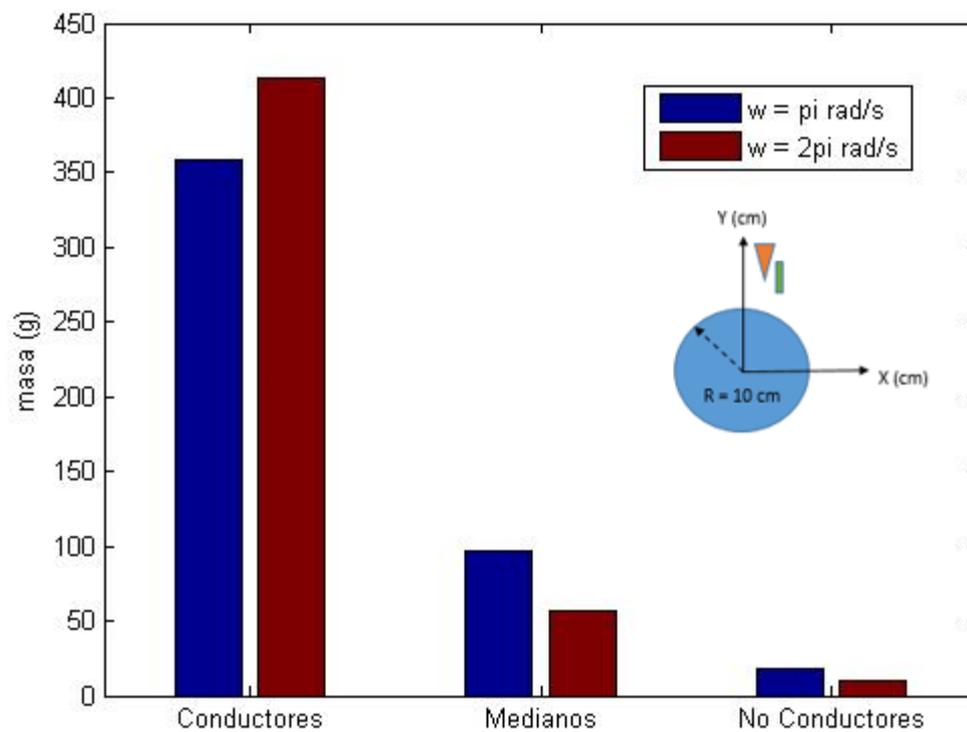


Figura 4.3. Gráfico de barras que representa la distribución de masas en las zonas C, M, NC de la Tabla 4.

4.1.2. Tamaño promedio de la partícula según su posición

Se analizó el tamaño promedio de partícula de los minerales depositados a lo largo de un eje horizontal correspondientes a las zonas no conductora, mediana y conductora, usando la posición del electrodo en (12,10) cm y la fuente de arena en (10,10) cm tamizada con una malla de $250 \mu m$, y el rotor con una velocidad angular $w = \pi \text{ rad/s}$. (Véase Figura 4.4)

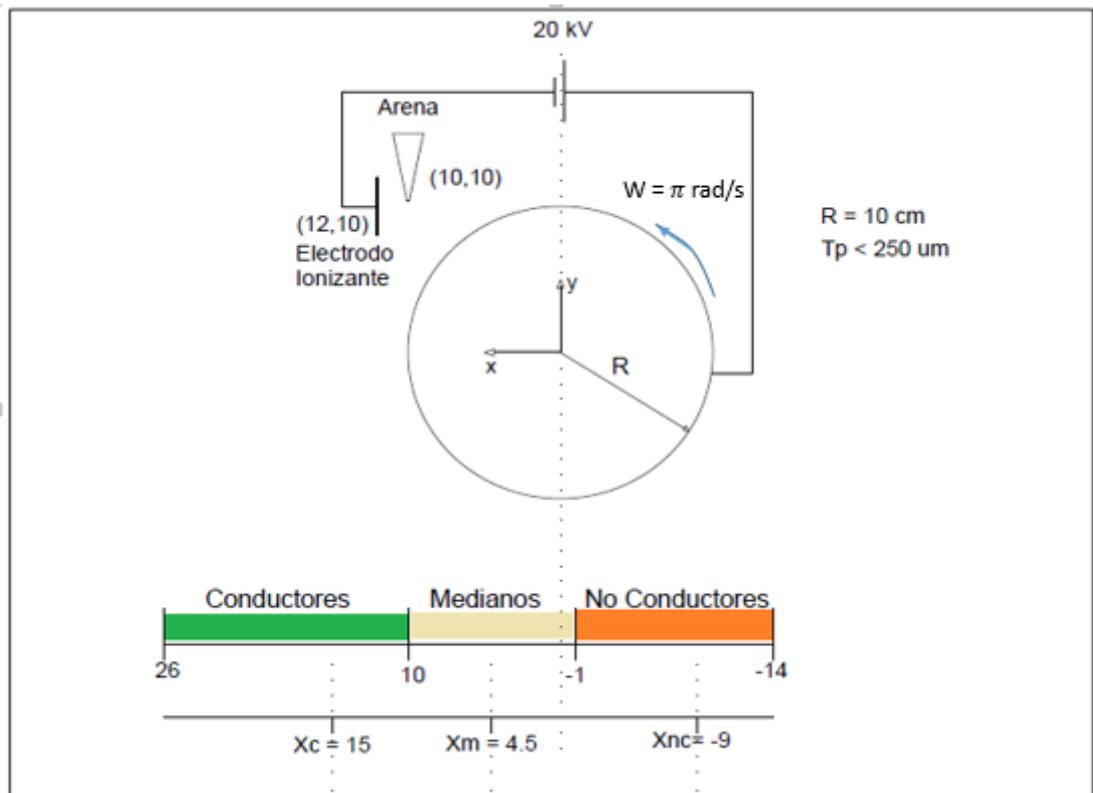


Figura 4.4. Condiciones que se usaron para medir el tamaño de partículas.

Las imágenes a continuación fueron capturadas por una cámara DinoCapture.



Figura 4.5. Gráfico correspondiente a $X_C = 15$ cm. El tamaño promedio de 30 partículas fue $(218,2 \pm 36,4) \mu\text{m}$.

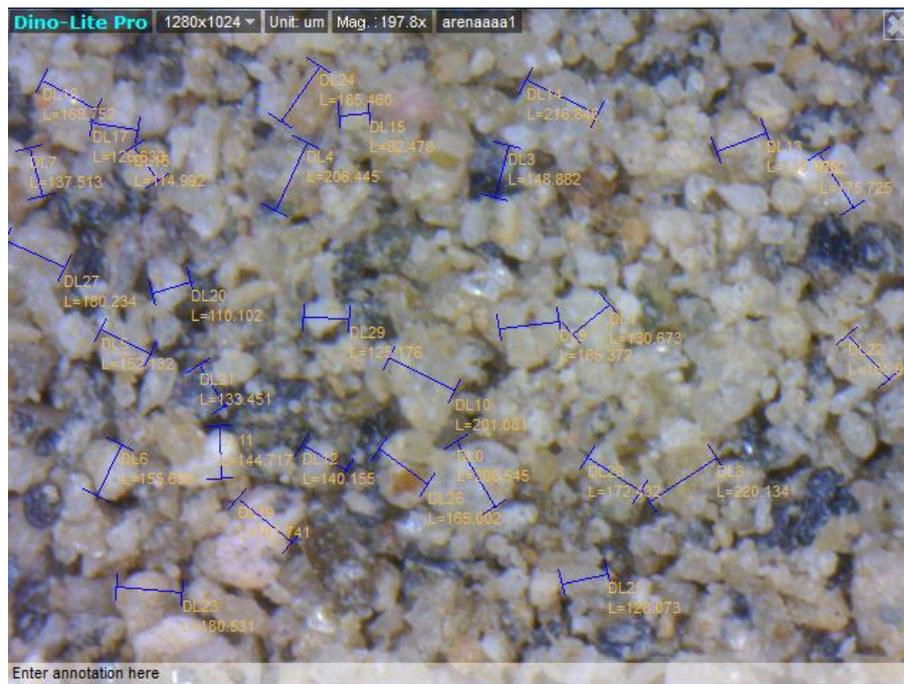


Figura 4.6. Gráfico correspondiente a $X_M = 4.5$ cm. El tamaño promedio de 30 partículas fue $(159,4 \pm 27,6) \mu\text{m}$.



Figura 4.7. Gráfico correspondiente a $X_{NC} = -9$ cm. El tamaño promedio de 30 partículas fue $(84,6 \pm 22,2) \mu m$.

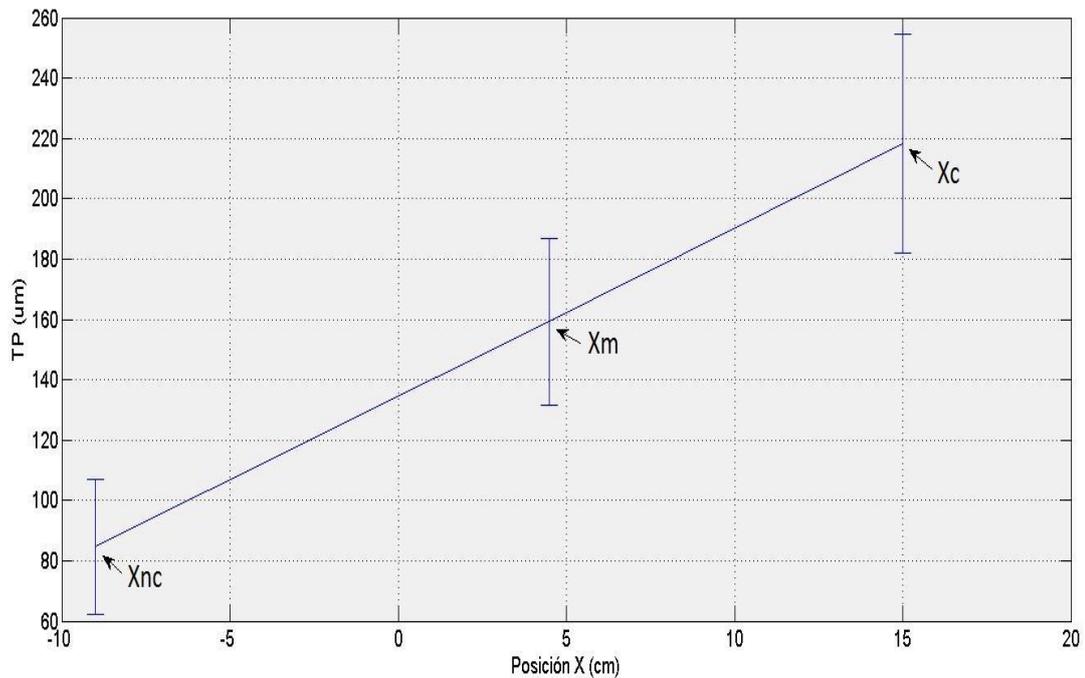


Figura 4.8. Gráfico de los tamaños promedio de partículas (μm) para los puntos X_C , X_M y X_{NC} (cm) mostrando sus respectivas desviaciones estándar.

4.1.3. Identificación de minerales por difracción de rayos X (DRX)

En la tabla 5, se muestran los minerales separados por el prototipo y clasificados según su porcentaje en masa de las zonas conductora, no conductora y de la muestra en bruto. Estos porcentajes fueron obtenidos a partir de los difractogramas mostrados en Anexos A.1, A.2 y A.3.

Tabla 5. Minerales que componen la muestra de arena identificados por DRX.

Mineral	Bruto (%)	Zona "C" (%)	Zona "NC" (%)
Rutilo	1,45	1,85	0,16
Ilmenita	0,58	0,82	0,01
Magnetita	0,48	0,11	0
Cuarzo	10,57	13,08	9,99
Kaolinita	0,72	0,65	5,09
Anatasa	0,2	0,29	0,41
Hematita	0,17	0,57	0,74
Actinolita	6,63	4,01	8,96

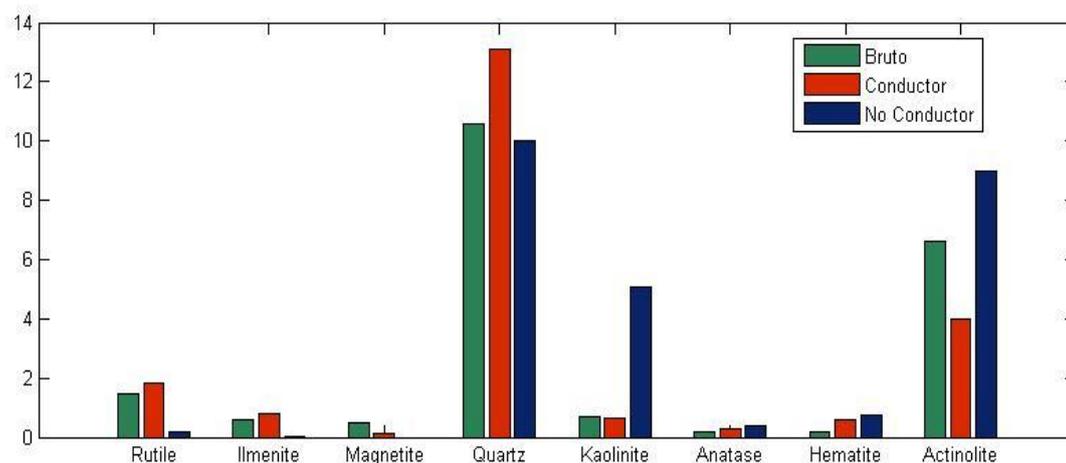


Figura 4.9. Gráfico de barras de los minerales obtenidos sin separar (Bruto), en la zona conductora y en la zona no conductora.

4.2. Análisis de minerales de un yacimiento de tierras raras separados por el separador eléctrico comercial CARPCO

4.2.1. Influencia de la vibración, voltaje y velocidad angular en la Separación

Si se usa el separador eléctrico CARPCO (Véase figura 3.5.), con los siguientes parámetros $\theta_1 = 60^\circ$, $\theta_2 = 30^\circ$, $d_1 = 3$ cm, $d_2 = 13$ cm [Configuración 1] se obtiene la tabla 6. Se variaron los parámetros de la separación como el voltaje (U), velocidad angular (w) y la vibración de la tolva o alimentador (V_f). La muestra de arena fue tamizada a tamaños de partícula $<150,250>$ μm .

Tabla 6. Relación de masas de zonas NC, M, y C. En la última columna se calcula la relación de masas NC/C.

U (kV) positivo	w (rpm)	V_f	NC (g)	M (g)	C (g)	Relación NC/C
20	60	40	75	0,9	150	0,50
20	60	60	25	0,4	155	0,16
20	100	40	55	1,1	60	0,92
20	100	60	15	1,0	100	0,15
25	60	40	55	0,3	70	0,79
25	60	60	30	0,3	60	0,50
25	100	40	20	1,1	10	2,00
25	100	60	20	0,6	60	0,33

Cabe resaltar que la masa obtenida en la zona mediana de la tabla 6, es el resultado de realimentarla varias veces en la tolva y ser sujeta a separación sucesiva hasta reducirla lo máximo posible.

Cuando se cambió la configuración a $\theta_1 = 60^\circ$, $d_1 = 0.6$ cm (Solo se usó el electrodo ionizador mas no el electrodo separador) [Configuración 2] con el mismo tipo de muestra, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Separación de arena usando configuración 2, aumentando el voltaje, se observa que al aumentar el voltaje la masa obtenida en la zona conductora se reduce a cero.

U (kV) Positivo	w (rpm)	V_f	NC (g)	M (g)	C (g)
12	32	30	1.5	150	4.2
20	32	30	0.3	150	0

Ahora que se ha analizado como influyen las variables como el voltaje (U), velocidad angular (w) y la vibración del alimentador o tolva (V_f). Estos ensayos previos con arena permitieron verificar el correcto funcionamiento del equipo y dar información cuantitativa sobre el efecto de los parámetros de operación sobre la distribución de las masas separadas.

4.2.2. Contenido de elementos de tierras raras en las muestras de minerales de un yacimiento de Cusco

En diciembre de 2015, la compañía Río Sol anunció el hallazgo de un yacimiento de Tierras Raras en Capacsaya, a 15 km de la ciudad del Cusco. Se estableció un proyecto de investigación entre el Laboratorio de Materiales Nanoestructurados y la compañía Río Sol, con el fin de estudiar la viabilidad de usar técnicas de separación eléctrica y magnética. En esta parte de la tesis, con la experiencia ganada en la construcción del prototipo, se aplicó la técnica de separación con el equipo CARPCO a un grupo de muestras enviadas del yacimiento de Capacsaya.

A estas muestras se les dio las denominaciones: R-019, R-032, R-034 y R-040, R-053.

Previamente se determinó la composición elemental de las muestras por ICP MS (Inductively Coupled Plasma con detector de masa). Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Elementos de tierras raras encontrados con la ayuda del análisis ICP en las muestras de tierras raras provenientes de Capacsaya.

Muestra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
RS-19	111.8	155.3	12.15	36.8	6.4	0.79	5.83	0.98	6.29	1.25	3.64	0.56	3.67	0.56
RS-32	1,489	2,300	185.8	494.9	58.75	6.28	47.61	4.63	20.13	2.66	6.12	0.8	5.21	0.79
RS-34	123.6	183.9	16.13	48.9	7.64	1.04	6.28	0.89	5.44	1.0	2.84	0.43	2.88	0.42
RS-40	125.5	237.4	23.9	81.6	12.71	1.17	12.57	1.71	10.25	67.92	5.82	0.86	5.92	1.3
RS-53	96.5	183	17.87	59.6	9.58	1.01	9.63	1.24	7.45	1.47	4.32	0.63	4.41	0.81

Se observa una clara diferencia en la mayor concentración de TRR de la muestra R-032 respecto a las otras cuatro. Por otro lado, la de menor concentración de La y Ce fue la muestra R-053. Se decidió analizar la separación electrostática de estas dos muestras.

4.2.3. Separación de minerales que componen la muestra R-053 a diferentes tamaños de partícula

Se procedió a separar los minerales que componen la muestra R-053 a diferentes tamaños de partícula entre los rangos $<75,150> \mu\text{m}$ y $<150,250> \mu\text{m}$.

Tabla 9. Separación de mineral R-053 tamizado a $<75,150> \mu\text{m}$, $U = 7 \text{ kV}$, $V_f = 34$, $w = 280 \text{ rpm}$, $d_1 = 0.5 \text{ cm}$, $\theta_1 = 60^\circ$, $\varphi_1 = 60$, $\varphi_2 = 40$ (Véase figura 3.5)

Mineral R-053	NC (g)	M (g)	C (g)
1° separación	7.4	130	29.9
2° separación	12.4	110	50
3° separación	16.7	90	70

Adicionalmente, a manera de comprobar que la separación eléctrica estuviera ocurriendo correctamente, se midió la resistencia eléctrica de 10 g de material de cada zona a una presión de 66 kPa, obteniéndose en la zona conductora una resistencia eléctrica de 1.58 G Ω , mientras en la zona no conductora se midió una resistencia de 3.67 G Ω .

Tabla 10. Separación de mineral R-053 tamizado a $<150,250> \mu\text{m}$, $U = 7 \text{ kV}$, $V_f = 34$, $w = 280 \text{ rpm}$, $d_1 = 0.5 \text{ cm}$, $\theta_1 = 60^\circ$, $\varphi_1 = 72$, $\varphi_2 = 48$ (Véase figura 3.5)

Mineral R-053	NC (g)	M (g).	C (g)
1° separación	5.6	75	16.4
2° separación	10.5	65	23

Similarmente, a manera de comprobar que la separación eléctrica estuviera ocurriendo correctamente, se midió la resistencia eléctrica de 10 g de material de cada zona a una presión de 66 kPa, obteniéndose en la zona conductora una resistencia eléctrica de 1.61 G Ω , mientras en la zona no conductora se midió una resistencia de 4.25 G Ω .

4.2.4. Resultados de difractogramas de las muestras minerales separadas R-053 y R-032 a diferentes tamaños de partícula

En vista que las medidas de resistencias indicaron que la separación eléctrica se estaba realizando correctamente, se hizo análisis DRX para identificar los minerales separados.

Tabla 11. Resultado de análisis por DRX del mineral R-053, en los tamaños de partícula <75,150> μm. Se usaron los parámetros de la Tabla 9. Véase Difractogramas (Anexos B.1, B.2, B.3)

Fase	BRUTO	ZONA “C”	ZONA “NC”
	(%)	(%)	(%)
Cuarzo	15,6	16,6	12,9
(Clinocloro)	4,6	2,73	4,2
Feldespato-K	8,1	1,9	6,3
Actinolita	42,0	45,8	31,1
Diópsido	2,3	13,2	2,9
Dolomita	2,0	0,0	1,9
Calcopirita	1,6	1,1	1,5
Calcita	0,0	0,0	2,4
Pirita	0,7	1,7	0,4
Titanita	3,8	4,1	4,0
Hornblenda	0,0	0,0	13,0
Fluoroapatito	3,1	2,2	2,3
Flogopita	7,4	2,7	8,8
Plagioclasas	8,5	7,9	7,9

Tabla 12. Resultado de análisis por DRX del mineral R-053, en los tamaños de partícula <150,250> μm. Se usaron los parámetros de la Tabla 10. Véase Difractogramas (Anexos B.4, B.5, B.6)

Fase	BRUTO	ZONA “C”	ZONA “NC”
	(%)	(%)	(%)
Cuarzo	16,4	14,5	10,8
Clinocloro	3,1	2,8	8,6
Feldespato-K	6,4	10,3	5,0
Actinolita	27,2	35,5	36,4
Diópsido	5,5	7,9	8,0
Dolomita	3,9	0,4	3,8
Calcopirita	1,2	0,5	0,4
Calcita	0,0	1,8	1,7
Pirita	0,9	0,7	0,2
Titanita	6,1	3,7	2,5
Hornblenda	13,1	4,9	8,0
Fluoroapatito	1,4	2,8	1,4
Flogopita	5,1	6,6	4,3
Plagioclasas	9,7	7,3	8,7

Tabla 13. Resultado de análisis por DRX del mineral R-032, en los tamaños de partícula <75,150> μm. Véase Difractogramas (Anexos C.1, C.2, C.3)

Fase	BRUTO	ZONA "C"	ZONA "NC"
	(%)	(%)	(%)
Cuarzo	8,5	7,8	6,9
Plagioclasas	1,1	9,5	7,5
Feldespatos-K	1,9	0,3	3,1
Dolomita	48,4	29,5	42,8
Muscovita	10,9	8,4	13,0
Calcita	4,1	3,4	5,7
Pirita	4,1	5,9	2,8
Hematita	16,1	30,2	14,2
Actinolita	2,2	2,5	2,3
Calcopirita	2,3	2,4	1,7

Tabla 14. Resultado de análisis por DRX del mineral R-032, en los tamaños de partícula <150,250> μm . Véase Difractogramas (Anexos C.4, C.5, C.6)

Fase	BRUTO	ZONA "C"	ZONA "NC"
	(%)	(%)	(%)
Cuarzo	13,7	11,74	11,5
Plagioclasas	3,0	3,6	4,4
Feldespatos-K	2,5	1,1	2,3
Dolomita	46,2	25,0	40,9
Muscovita	12,1	10,6	10,4
Calcita	2,8	0,7	5,7
Pirita	1,7	4,2	3,1
Hematita	15,9	38,6	14,3
Actinolita	1,06	1,4	5,0
Calcopirita	0,8	1,2	1,0
Clinocloro	0,1	1,8	1,3
Titanita	0,07	0,01	0,02

4.2.5. Análisis de la muestra R-032 por microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se realizó el estudio de la muestra R-032 por microscopía electrónica de barrido (SEM), considerando que fue la que mostró mayor contenido de elementos de tierras raras según ICP: **La** (1,489 ppm), **Ce** (2,300 ppm) y **Nd** (494.9 ppm).

El microscopio SEM usado es de marca Carl Zeiss, modelo EVO 10MA con detector EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) OXFORD. La muestra trabajada fue de granulometría menor que malla 100 aproximadamente. Previo al análisis SEM, se preparó una sección pulida (briqueta) de la muestra, en la cual se hizo un recubrimiento de bajo vacío con grafito.

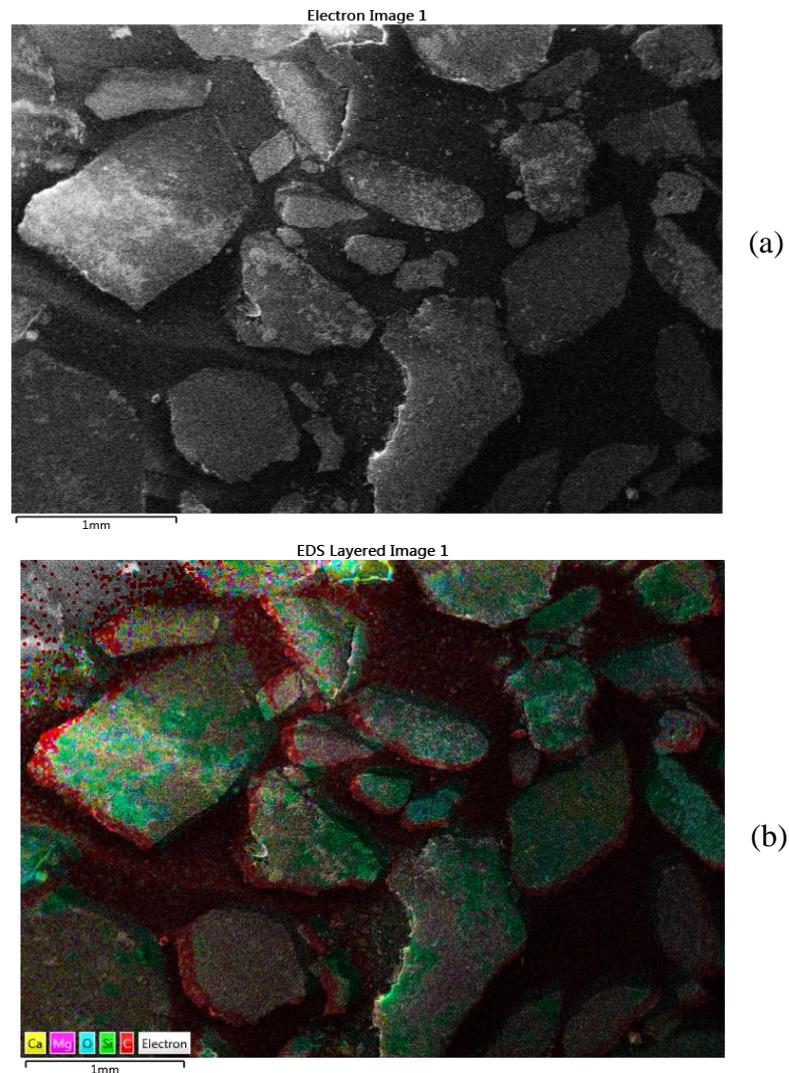
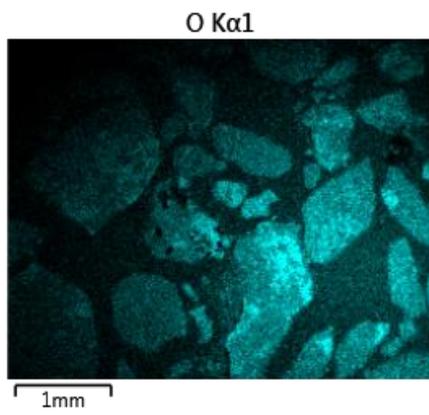
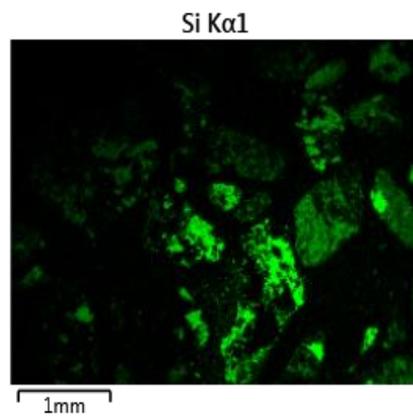


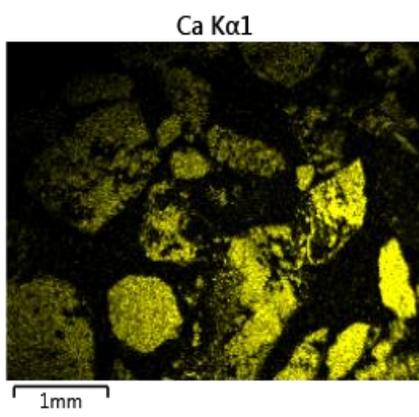
Figura 4.10. Primer mapeo del mineral a una escala de 1 mm. (a) escala de grises, (b) los elementos Ca, Mg, O, Si, C por colores.



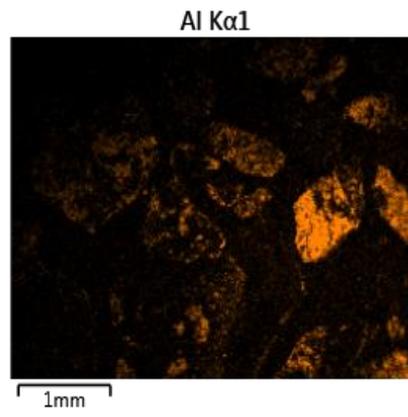
(a)



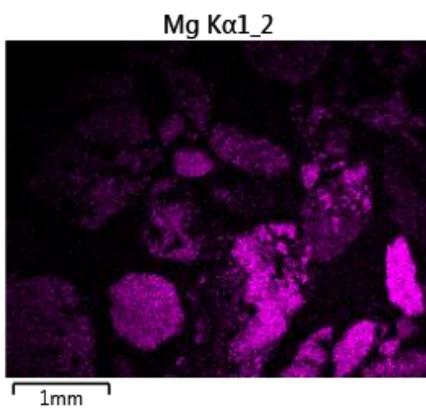
(b)



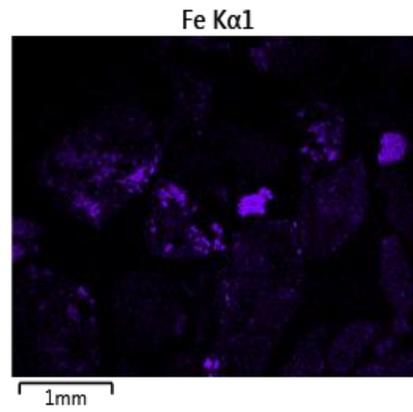
(c)



(d)



(e)



(f)

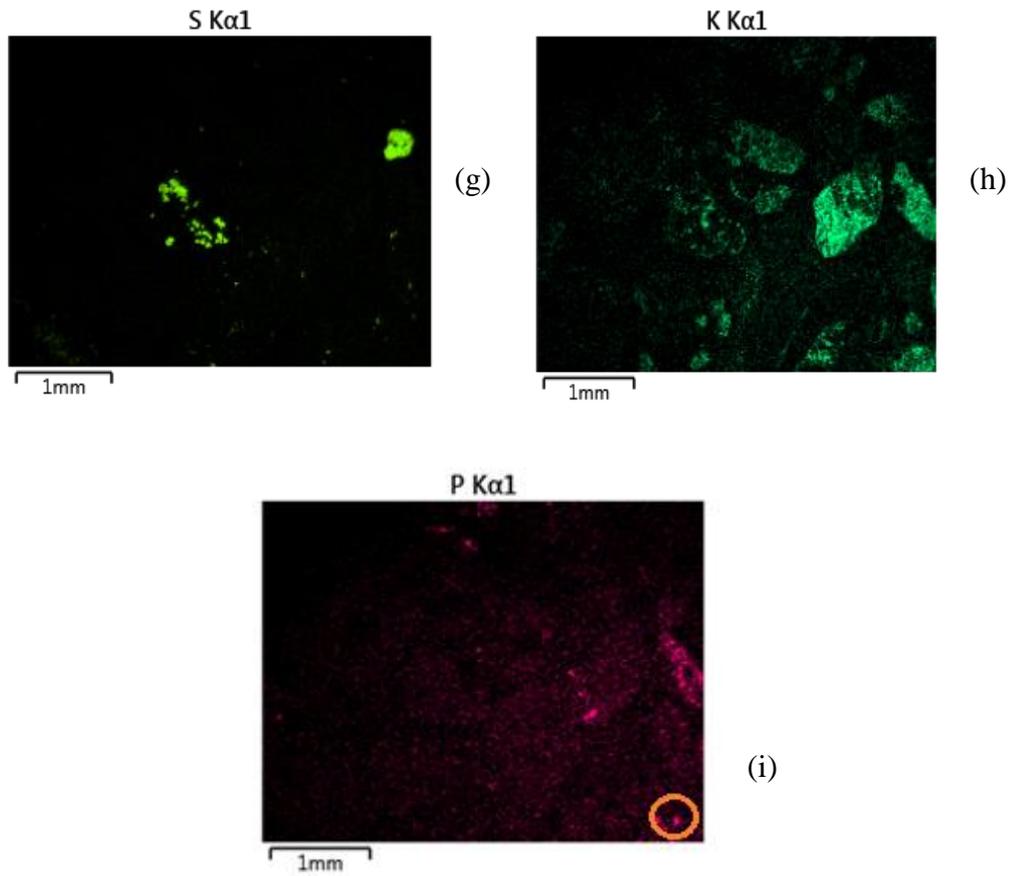


Figura 4.11. Elementos resaltados según colores del primer mapeo del mineral. (a) O, (b) Si, (c) Ca, (d) Al, (e) Mg, (f) Fe, (g) S, (h) K, (i) P.

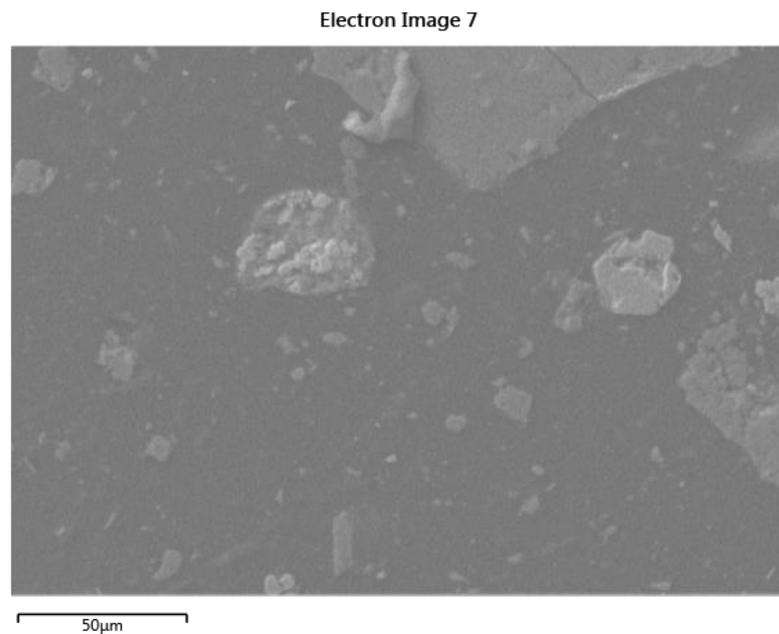
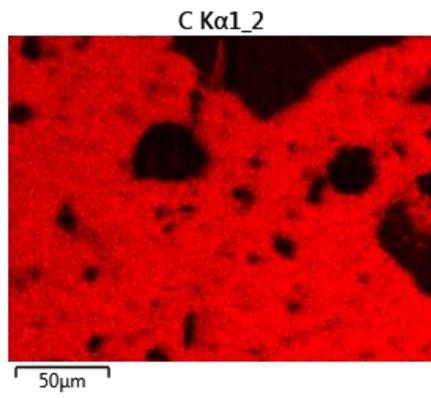
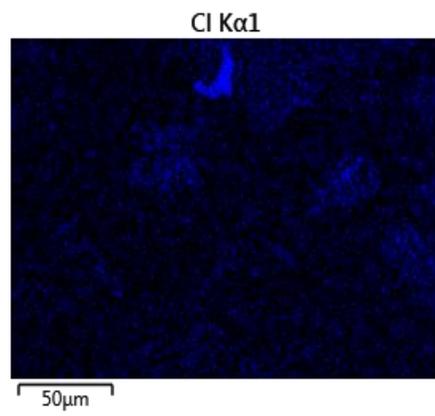


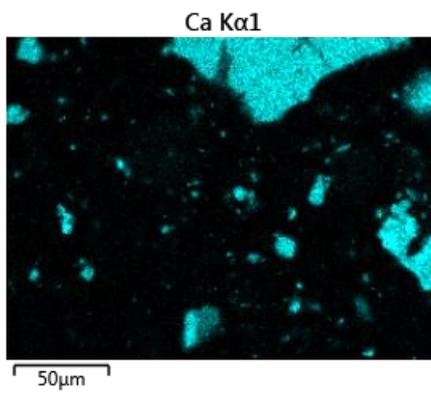
Figura 4.12. Segundo mapeo del mineral R-032 a una escala de 50 μm . Esta búsqueda fue orientada a la zona resaltada del Fósforo (P). (Véase figura 4.10 (i))



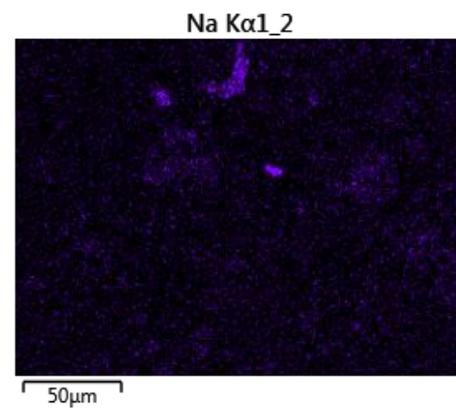
(a)



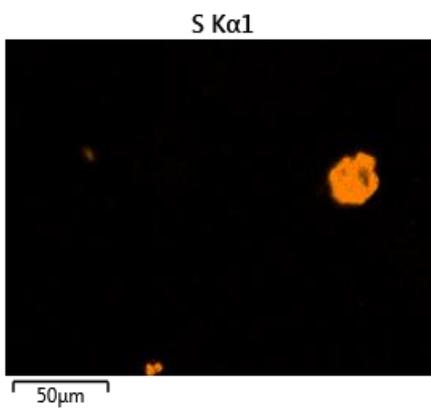
(b)



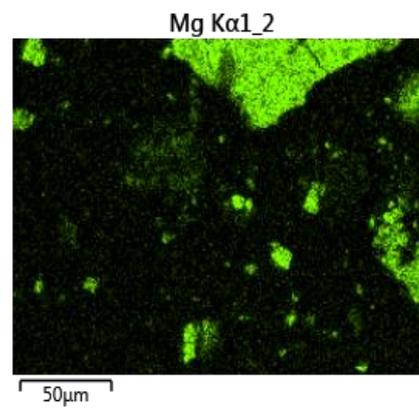
(c)



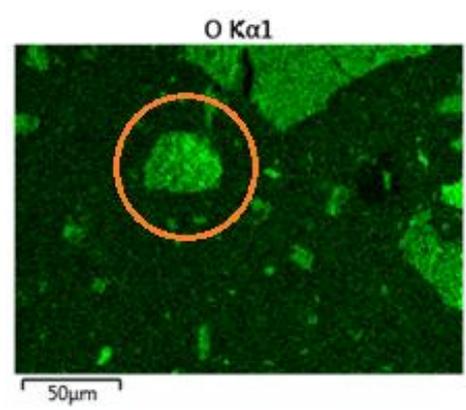
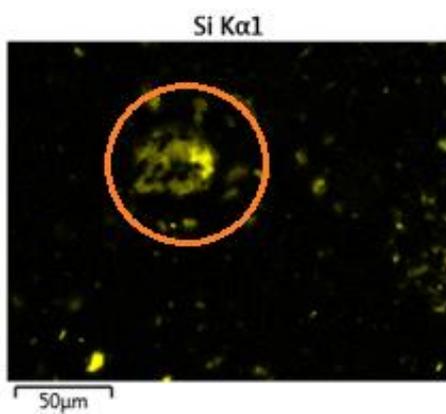
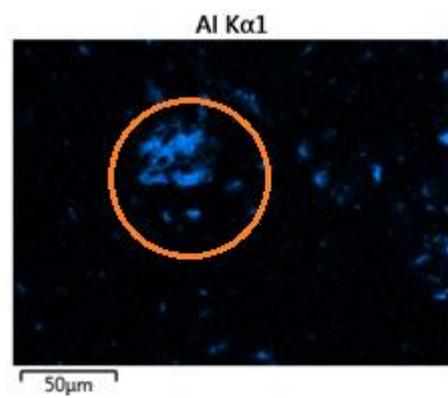
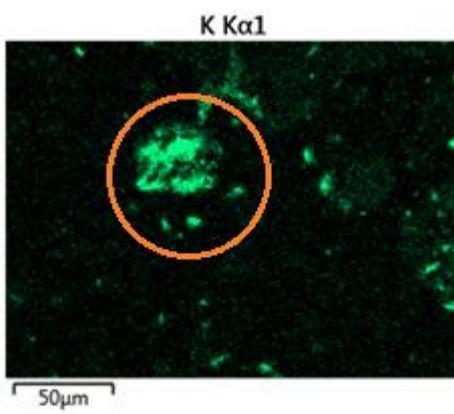
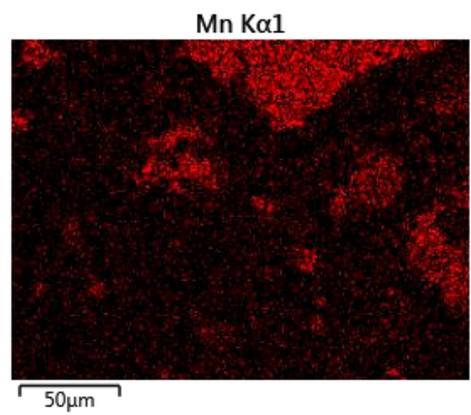
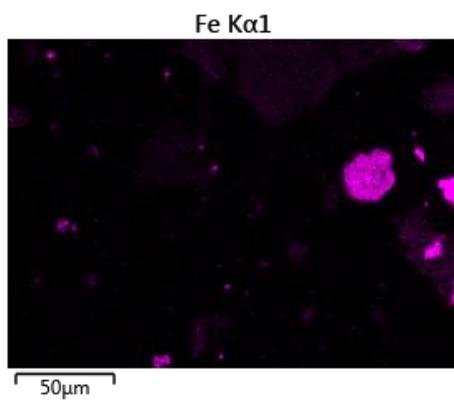
(d)



(e)



(f)



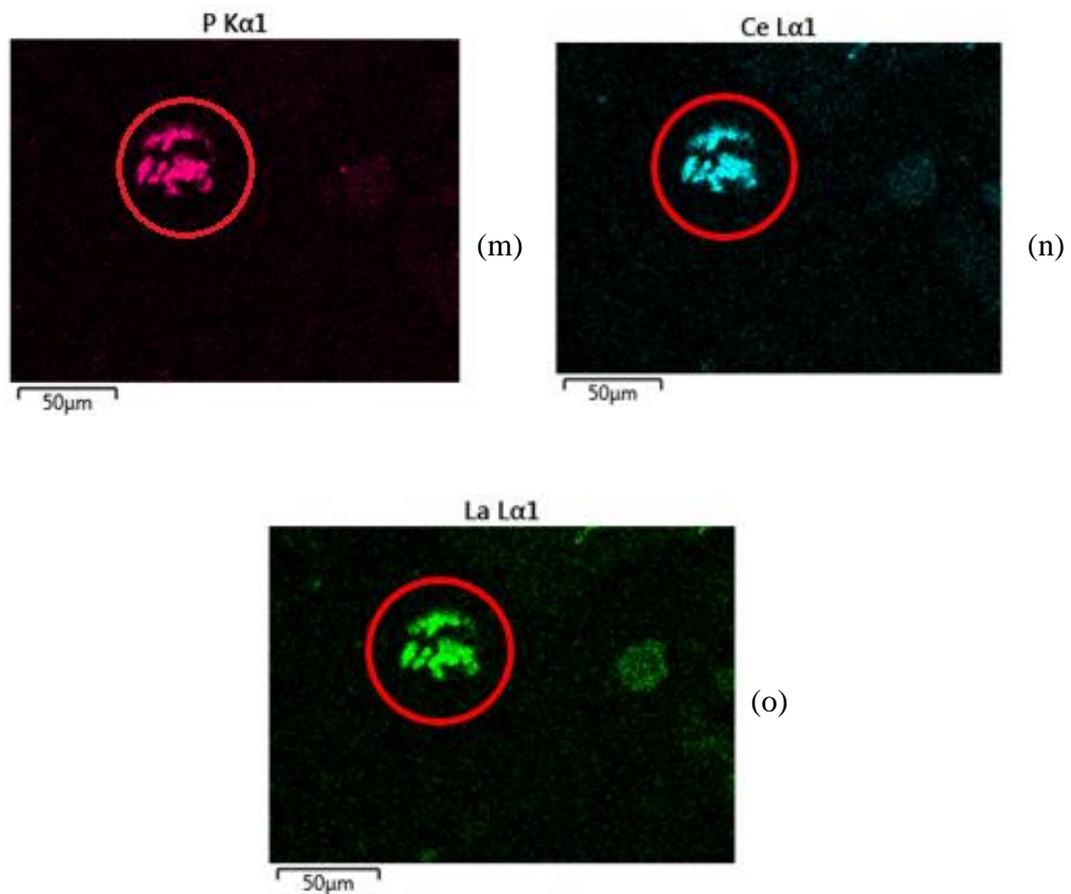


Figura 4.13. Elementos resaltados según colores del segundo mapeo del mineral. (a) C, (b) Cl, (c) Ca, (d) Na, (e) S, (f) Mg, (g) Fe, (h) Mn, (i) K, (j) Al, (k) Si, (l) O, (m) P, (n) Ce, (o) La. Aquí se puede observar la aparición de los elementos de tierras raras Ce y La siendo parte de la misma partícula resaltada con círculos rojos. Debido a la presencia de O, K, Al y Si en la misma partícula resaltada con círculos anaranjados, se evidencia el mineral Feldespato-K Ortoclasa (KAlSi_3O_8).

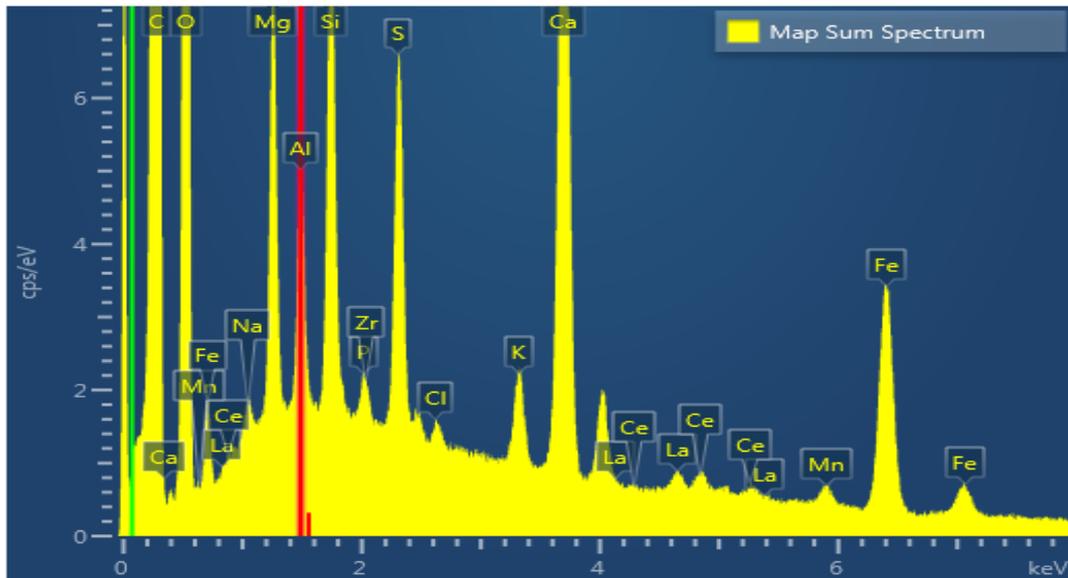


Figura 4.14. Espectro EDS del segundo mapeo de la muestra R-032.

Electron Image 1

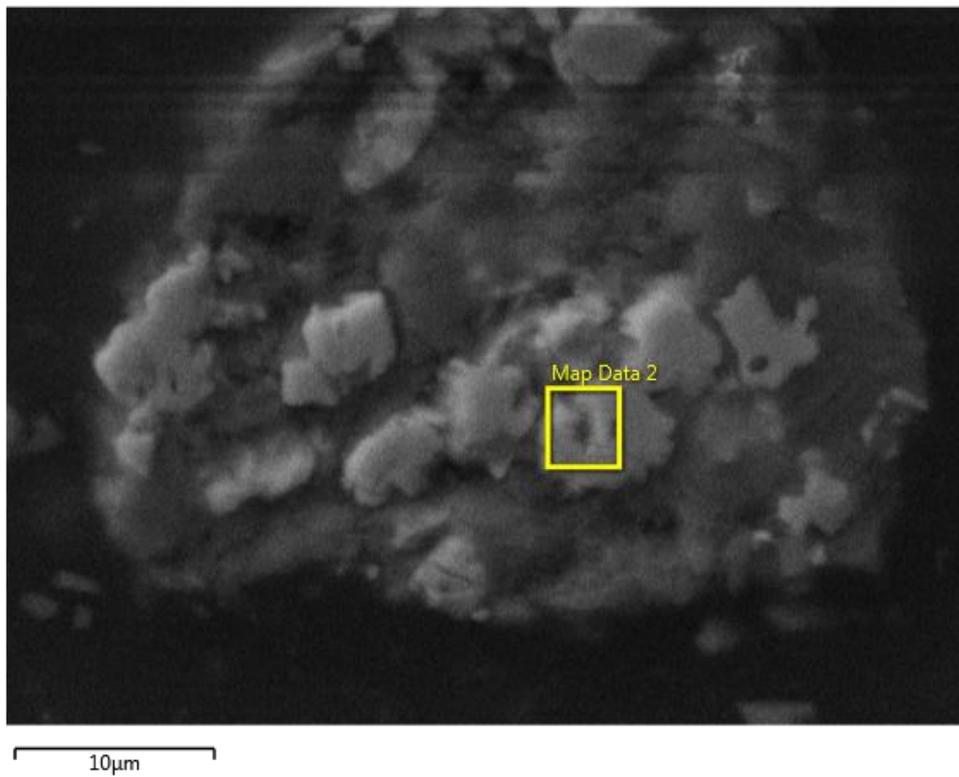


Figura 4.15. Tercer mapeo de la muestra R-032 a una escala de 10 μm . Se hace un acercamiento a la zona resaltada de la figura 4.13 (n), (o). Se evidencia dos tipos de minerales: gris oscuro (Feldespato-K) y gris claro (señalado por el cuadrado amarillo).

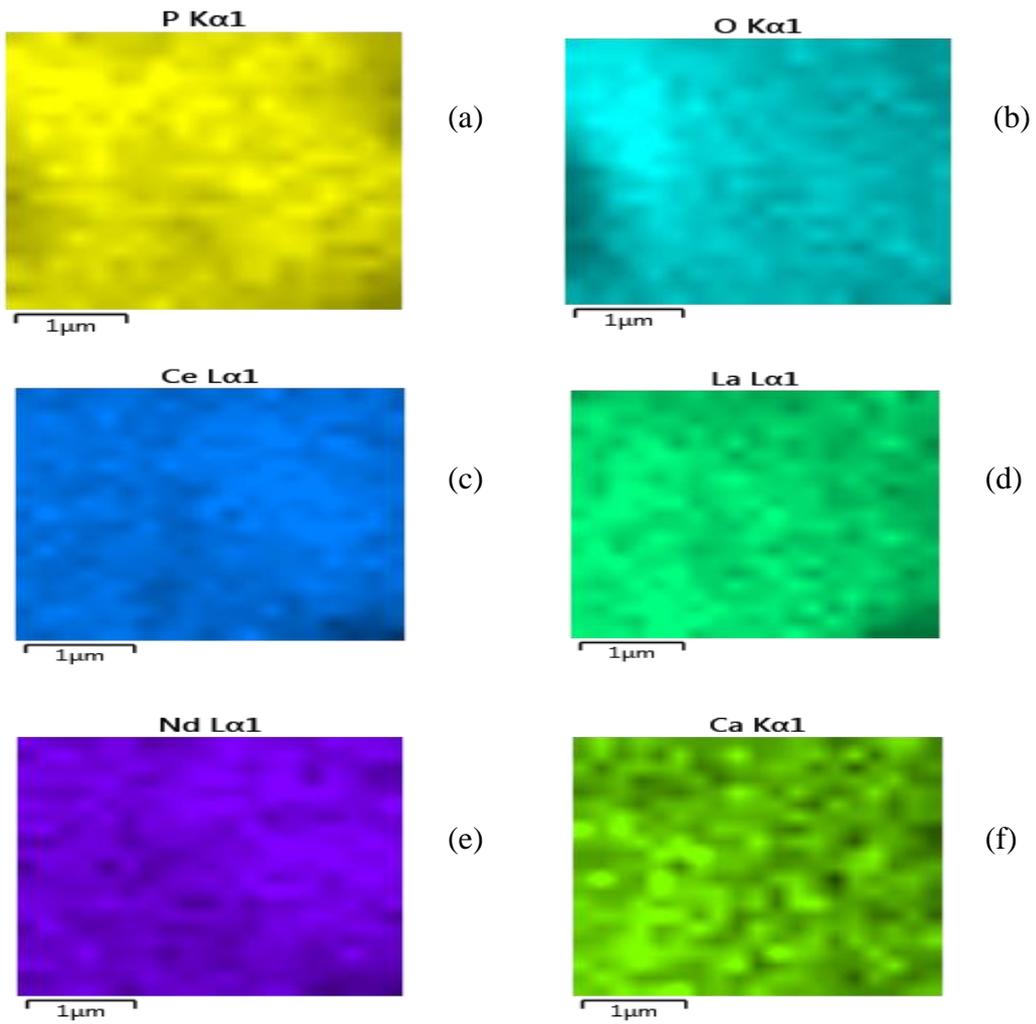


Figura 4.16. Análisis areal del mineral (gris claro) de la figura 4.15. Se muestran los elementos según colores del mineral. (a) P, (b) O, (c) Ce, (d) La, (e) Nd, (f) Ca.

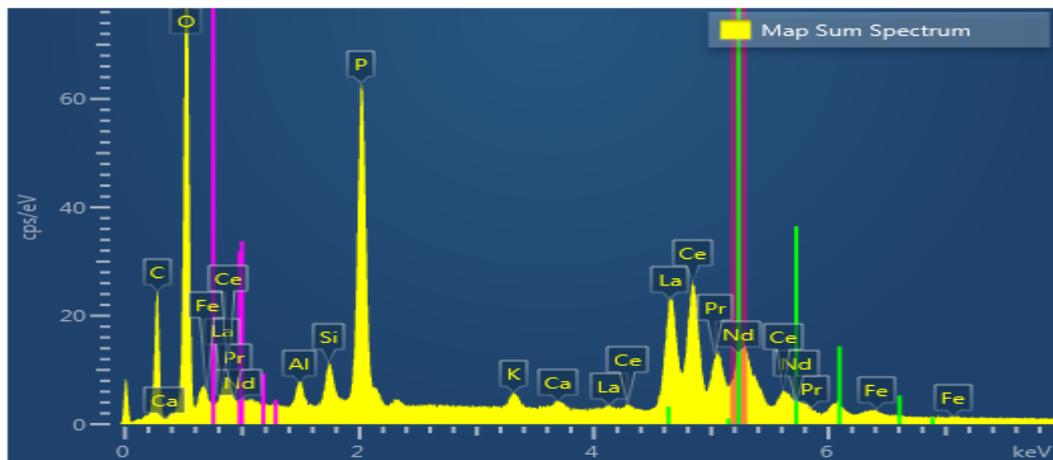


Figura 4.17. Espectro EDS del tercer mapeo de la muestra R-032.

Tabla 15. Porcentaje en masa de los elementos Ce, O, La, P y Nd mostrados en la figura 4.16.

Elemento	wt (%)
Ce	29,1
O	28,7
La	24,8
P	14,0
Nd	3,4

Capítulo 5. Discusión

5.1. Separación con el prototipo de separador eléctrico

De las tablas 2, 3 y 4, se observa que a mayor velocidad angular w del rotor, la cantidad de material recolectado en la zona conductora era mayor y esto se debe a que el factor de adherencia p [Véase Ec.(31)] disminuye eyectándose más material del rotor.

Adicionalmente, cabe recalcar que las cantidades del material recolectado en las zonas no son iguales en diferentes posiciones de la tolva alimentadora y configuración de los electrodos.

Sobre el tamaño de partícula encontrada en las posiciones de las zonas no conductora " X_{NC} ", mediana " X_M " y conductora " X_C ", las cuales son respectivamente: $(84,6 \pm 22,2) \mu m$, $(159,4 \pm 27,6) \mu m$ y $(218,2 \pm 36,4) \mu m$; se puede verificar que el material obtenido en la zona conductora tiene un tamaño de partícula b mayor que en la zona no conductora y esto se debe a que al aumentar b , el factor de adherencia p (Véase Ec.(31)) disminuye su valor arrojando más partículas grandes a la zona conductora.

Con el prototipo se realizó una separación eléctrica de una muestra de arena gruesa, por lo cual se obtuvo diferentes concentraciones de minerales en las zonas

conductora y no conductora (Ver Tabla 5). Lo más apreciable fue que en la zona conductora se obtuvo mayor concentración de Rutilo, Ilmenita, Magnetita; mientras que en la zona no conductora se obtuvo mayor concentración de silicatos como Kaolinita y Actinolita. Cabe resaltar el hecho que la Anatasa a pesar de ser un óxido metálico, y ser otra fase TiO_2 diferente de Rutilo, es no conductor a diferencia del Rutilo. Adicionalmente, la Hematita cuya resistividad eléctrica varía de $3,5 \times 10^{-3}$ a $10^7 \Omega \cdot \text{m}$ [7], tiene mayor resistividad en promedio que la Magnetita, cuya resistividad es 5×10^{-5} a $5,7 \times 10^3$ [7], por eso tiene mayor porcentaje en la zona no conductora a pesar de ser conductor según Tabla 1. Por otro lado, el mineral que no se ha comportado en la separación como se esperaba es el Cuarzo (Cuya resistividad eléctrica varía de 4×10^{10} a $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ [7]), ya que muestra mayor concentración en la zona conductora a pesar de ser un silicato no conductor; y esto puede ser explicado por el hecho que los minerales están asociados entre sí, por lo cual, el Cuarzo pudo haber sido arrastrado a la zona conductora al estar asociado con otros minerales conductores.

5.2. Separación con el separador eléctrico CARPCO

Antes de analizar la separación eléctrica de minerales de tierras raras, fue necesario primero analizar cómo funcionan las variables que influyen en la separación como U (Voltaje), w (velocidad angular), y V_f (vibración del alimentador), para lo cual se trabajó con una muestra de arena de playa. De la tabla 6, se pudo observar que depende de lo que uno desee, uno puede obtener mayor relación de $\frac{NC}{C}$. Por lo tanto, para obtener mayor relación de masas de la zona no conductora sobre la conductora, es necesario trabajar con el mayor voltaje U (25 kV), una velocidad angular de w (100 rpm), y la menor vibración del alimentador V_f (40) y esto se puede deber a que si V_f es baja, las partículas se apantallan menos entre sí, dando la posibilidad que un mayor número de partículas se carguen debido a la ionización del electrodo; y en efecto, ocurra una mejor separación. Por otro lado, si se desea tener una mayor cantidad de material en la zona conductora respecto a la no conductora, es necesario trabajar con menor voltaje U (20 kV), una velocidad angular w (100 rpm), y mayor vibración del alimentador V_f (60); y esto se puede deber a que cuando uno aumenta la vibración del alimentador, hay

mayor cantidad de material que es apantallada por otras partículas, por lo cual, estas ya no serán cargadas por la ionización del electrodo ionizador, produciendo así, una menor calidad de separación, depositando partículas en la zona conductora solo por acción de fuerzas mecánicas.

Adicionalmente, si se trabaja con los parámetros de la tabla 7, se puede observar que cuando se aumenta el voltaje a 20kV, cuyo valor es mucho más de lo necesario para poder romper la resistencia del aire a esa distancia (el electrodo ionizador se encontraba a 0,6 cm del rotor por lo cual debió necesitar un aproximado de 6 kV para romper la resistencia del aire), no se depositó material en la zona conductora. Esto se debe a que cuando se aplica demasiado voltaje, la ionización pierde efectividad ya que la densidad volumétrica de iones de la zona comprendida entre el rotor y el electrodo disminuye, porque se concentran mayormente en el arco de corriente, depositándose finalmente en la zona mediana. Por lo tanto, se demuestra que al aumentar el voltaje innecesariamente, no equivale a mejorar la calidad de la separación.

De la Tabla 8, se verifica la existencia de elementos de tierras raras en los minerales del yacimiento de Cusco, siendo la muestra R-032 la que contiene mayor concentración de tierras raras según ICP.

Por otro lado, fue necesario estudiar aspectos como la resistencia eléctrica de las muestras ubicadas en las zonas conductora y no conductora con la muestra R-053, ya que era necesario confirmar el carácter conductor o no conductor de la muestra. Para ello se empleó un equipo que consistió en dos electrodos en los extremos de un tubo aislante desplazados por una prensa hidráulica. Entre los electrodos se colocó el mineral, cuya resistencia a diferentes presiones fue medida por medio de un megóhmetro (*). La Tabla 9 y la Tabla 10 nos conducen a la medida de la resistencia eléctrica a diferentes tamaños de partículas, donde se obtuvo que en un tamaño de $\langle 75,150 \rangle \mu\text{m}$, la resistencia eléctrica de la zona conductora era 1,58 G Ω , mientras que en la zona no conductora fue de 3,67 G Ω . Cuando se trabajó con tamaños de $\langle 150,250 \rangle \mu\text{m}$, las resistencias fueron de 1,61 G Ω y 4,25 G Ω en las zonas conductora y no conductora respectivamente. Esto es debido a que el material de la zona conductora tiene menor resistencia eléctrica. Sin embargo, lo

(*) El equipo fue construido por Luis Campos como parte de su tesis de Ing. Física.

más importante es notar que a menor tamaño de partícula, la resistencia eléctrica era menor en ambos casos, conductor y no conductor. Esto se puede atribuir a que las partículas con menor tamaño, tienen mayor área de contacto (menos volumen vacío), por lo que la corriente encuentra un camino más corto a través del mineral.

En la Tabla 11 y la Tabla 12, se muestra los resultados DRX de las muestras en las zonas conductora y no conductora a diferente tamaño de partícula, del mineral R-053. Respecto al tamaño $<75,150>$ μm , se separa con mayor porcentaje en la zona conductora, la Pirita, y en la zona no conductora, el Feldespato-K, Dolomita y Hornblenda, de acuerdo al comportamiento señalado en la Tabla 1. Sin embargo al aumentar el tamaño a $<150,250>$ μm , los mismos minerales se separan de manera prevista a excepción del Feldespato-K, mostrando mayor porcentaje en la zona conductora, siendo este un material no conductor (Véase Tabla 1). Por lo tanto, probablemente si se usa un material mayor tamaño de partícula en bruto, la separación eléctrica para ciertos compuestos como el Feldespato-K no será muy eficiente ya que podrían estar asociados a otros minerales.

En la Tabla 13 y la Tabla 14, se muestra los resultados DRX de las muestras en las zonas conductora y no conductora a diferente tamaño de partícula del mineral R-032. En los tamaños $<75,150>$ μm se separa con mayor porcentaje en la zona conductora, la Hematita, y en la zona no conductora, el Feldespato-K y Dolomita, de acuerdo al comportamiento señalado en la Tabla 1. El resultado fue diferente al usar tamaños de partículas de $<150,250>$ μm en algunos minerales, pero mostró mejor eficiencia al concentrar Actinolita en la zona no conductora. Cabe resaltar que el Feldespato-K ortoclasa se concentró mejor en la zona no conductora a tamaños de partícula $<75,150>$ μm .

La microscopía electrónica, no sólo permitió identificar la presencia de La, Ce y Nd, en la muestra R-032 sino que además el mineral que lo contiene y su asociación. Si se observan las micrografías (b), (j), (o), (p) de la Figura 4.13, que corresponden a los elementos O, P, La y Ce se nota que coinciden en la misma partícula.

La Tabla 15 nos muestra los porcentajes en masa de los elementos Ce, O, La, P y Nd presentes en el mineral gris claro analizado en el tercer mapeo del mineral R-032. A continuación se calculará la fórmula $(La, Ce, Nd)_z P_y O_x$, donde M es la masa atómica (g) de cada elemento [$M(O) = 16$, $M(P) = 30,98$, $M(Ce) = 140,12$, $M(La) = 138,92$, $M(Nd) = 144,27$], y at-g es el átomo gramo de cada elemento,

$$x = \frac{at-g(O)}{at-g(P)} = \frac{\left(\frac{wt_O(\%)}{M(O)}\right)}{\left(\frac{wt_P(\%)}{M(P)}\right)} = \frac{\frac{28,7}{16}}{\frac{14}{30,98}} \cong 4,$$

$$y = \frac{at-g(P)}{at-g(P)} = \frac{\left(\frac{wt_P(\%)}{M(P)}\right)}{\left(\frac{wt_P(\%)}{M(P)}\right)} = \frac{\frac{14}{30,98}}{\frac{14}{30,98}} \cong 1,$$

$$z = \frac{at-g(Ce,La,Nd)}{at-g(P)} = \frac{\left(\frac{wt_{Ce}(\%)}{M(Ce)}\right) + \left(\frac{wt_{La}(\%)}{M(La)}\right) + \left(\frac{wt_{Nd}(\%)}{M(Nd)}\right)}{\left(\frac{wt_P(\%)}{M(P)}\right)} = \frac{\frac{29,1}{140,12} + \frac{24,8}{138,92} + \frac{3,4}{144,27}}{\frac{14}{30,98}} \cong 1,$$

resultando $(La, Ce, Nd)PO_4$, lo que demuestra la existencia del mineral Monacita. Debido a que el Cerio (Ce) es el elemento con más porcentaje en masa, el mineral se llamará Monacita-Ce.

Un análisis más detallado de las micrografías, revelan que los elementos anteriores se encuentran asociados al asociados a Si, Al y K, como se aprecia en las micrografías (d), (h) y (i) de la figura 4.13. Esto permite inferir que la Monacita está asociada al Feldespato-K cuya fórmula es $KAlSi_3O_8$ (Ver Tabla 1).

Como se discutió anteriormente, el uso del separador CARPCO ha sido eficiente en la separación de Feldespato-K, para tamaños $<75, 150> \mu m$, por lo tanto posemos inferir que con esta técnica se ha logrado aumentar la concentración de La y Ce.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Separación con el prototipo de separador eléctrico

Cuando la velocidad angular w aumentaba en su valor, se recolectaba mayor cantidad de material (g) en la zona conductora debido a la preponderancia de las fuerzas mecánicas.

Las tamaños de las partículas de la zona no conductora, zona mediana y zona conductora eran más grandes en orden creciente las cuales son respectivamente: $(84,6 \pm 22,2) \mu m$, $(159,4 \pm 27,6) \mu m$ y $(218,2 \pm 36,4) \mu m$.

Hubo éxito en la fabricación del prototipo separador. Se separó una muestra de arena gruesa de construcción, dando por resultado mayor concentración de minerales como Rutilo, Ilmenita y Magnetita en la zona conductora, y silicatos como Kaolinita y Actinolita en la zona no conductora.

6.2. Separación con el separador eléctrico CARPCO

Si se desea que la relación de cantidades de material recuperado en las zonas no conductora y conductora $(\frac{NC}{C})$ o viceversa sea lo máximo posible, es necesario trabajar las variables más importantes y su influencia en la separación, las cuales son voltaje (U), velocidad angular (w) y la vibración del alimentador (V_f).

Los valores de resistencia eléctrica del mineral R-053 reportados en las zonas conductora y no conductora, cuyos tamaños de partícula eran $<75,150> \mu m$, fueron $1,58 G\Omega$ y $3,67 G\Omega$ respectivamente. Similarmente, en los tamaños de partícula $<150,250> \mu m$, los valores reportados fueron $1,61 G\Omega$ y $4,25 G\Omega$ respectivamente, mostrando así, que a menor tamaño de partícula, menor resistencia eléctrica.

Al separar el mineral R-053, los resultados DRX mostraron que cuando se trabajó con tamaños $<75,150> \mu m$, se concentró Pirita en la zona conductora, mientras

que en la zona no conductora se concentró Feldespato-K, Dolomita y Hornblenda. Sin embargo, al trabajar con tamaños $<150,250> \mu\text{m}$, fue similar a lo anterior, a excepción del Feldespato-K, el cual se concentró en la zona conductora, yendo en contra del pronóstico teórico.

Los minerales del yacimiento de Cusco poseen elementos de tierras raras confirmado según ICP. Siendo la muestra R-032, el cual tiene mayor concentración en ppm de estos elementos.

Al separar el mineral R-032, los resultados DRX mostraron que cuando se trabajó con partículas de $<75,150> \mu\text{m}$ y $<150,250> \mu\text{m}$, el separador en ambos casos fue capaz de concentrar Hematita en la zona conductora, mientras que en la zona no conductora concentró Feldespato-K y Dolomita. El mineral Feldespato-K es muy importante debido a que está asociado con los elementos de tierras raras La, Ce y Nd, como lo mostró la microscopía SEM. En consecuencia, los minerales de tierras raras (Monacita-Ce) fueron concentrados en la zona no conductora junto al Feldespato-K Ortoclasa.

Capítulo 7. Sugerencias para trabajos a futuro

Hasta el momento, mediante la separación eléctrica se ha concentrado minerales de tierras raras (Monacita-Ce) de la muestra R-032 asociados al Feldespato-K Ortoclasa en la zona no conductora. El trabajo a futuro consistirá en analizar las variables anteriormente estudiadas como voltaje (U), velocidad angular (w), y la vibración del alimentador (V_f) con el fin de optimizar el proceso de separación eléctrica para diferentes muestras de minerales de tierras raras.

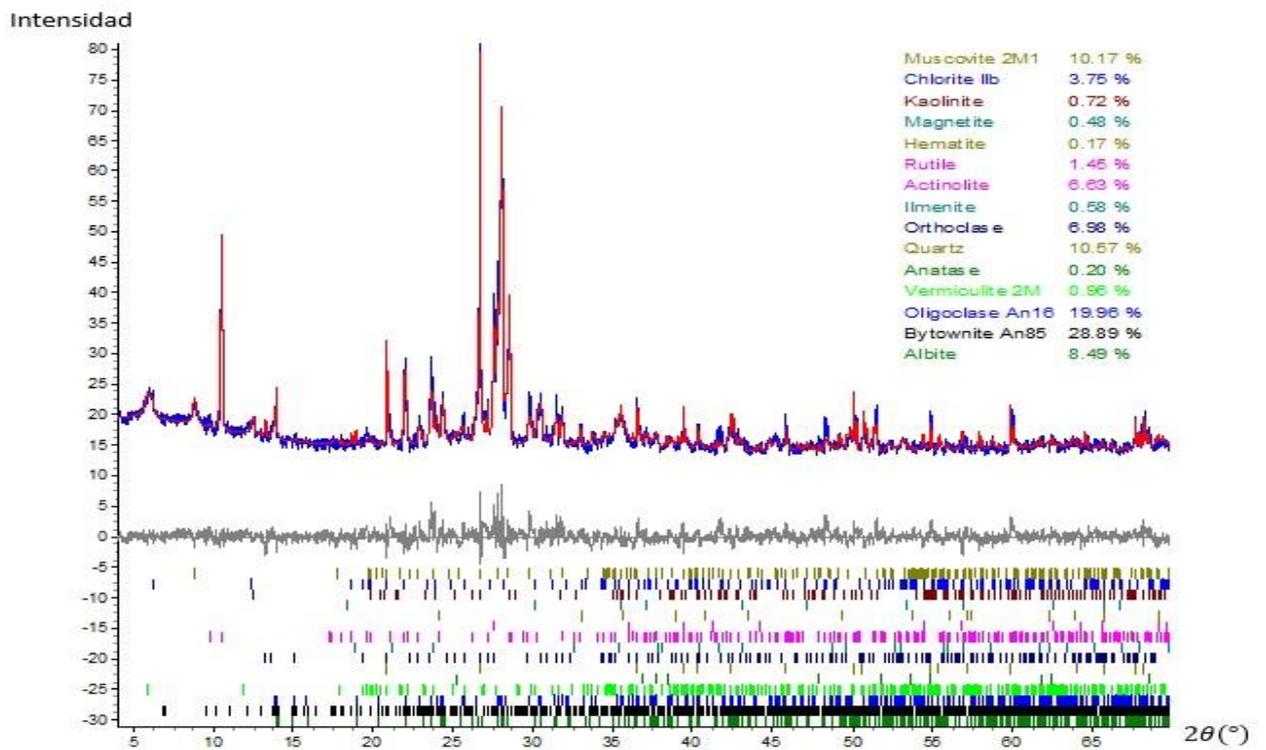
Capítulo 8. Referencias bibliográficas

1. H.B. Johnson, *Process of Electrostatic Separation*, United States (1940).
2. Lucian Dascalescu, *Journal of Electrostatics*, Vol. 29, pag. 211-225 y 255-267, Elsevier (1993).
3. Lucian Dascalescu, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 40, pag. 53-59 (2004).
4. Lucian Dascalescu, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, pag. 715-720 (2005).
5. Karin Medles, Lucian Dascalescu et. al., *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 43, pag. 618-626 (2007).
6. J. Svoboda, *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 4, pag. 173-192, Gordon and Breach Science Publishers S.A., Malaysia (1993).
7. Leonard B. Loeb, *Electrical Coronas, Their Basic Physical Mechanisms*, University of California Press (1965).
8. E. G. Kelly, D. J. Spottiswood, *Minerals Engineering*, Vol. 2, pag. 33-46, 193-205 y 337-349, Great Britain (1989).
9. A.G. Bailey, *Powder Technology*, Vol. 37, pag. 71-85, United Kingdom (1984).
10. S. Karato, D. Wang, *Electrical conductivity of minerals and rocks*, Yale University, United States.
11. W. M. Telford, L. P. Geldart, *Applied Geophysics*, Second Edition, Cambridge University Press, pag. 283-292 (1990).
12. Operating Manual for Laboratory Electrostatic Separator CARPCO model HT(15,25,36)111-15.

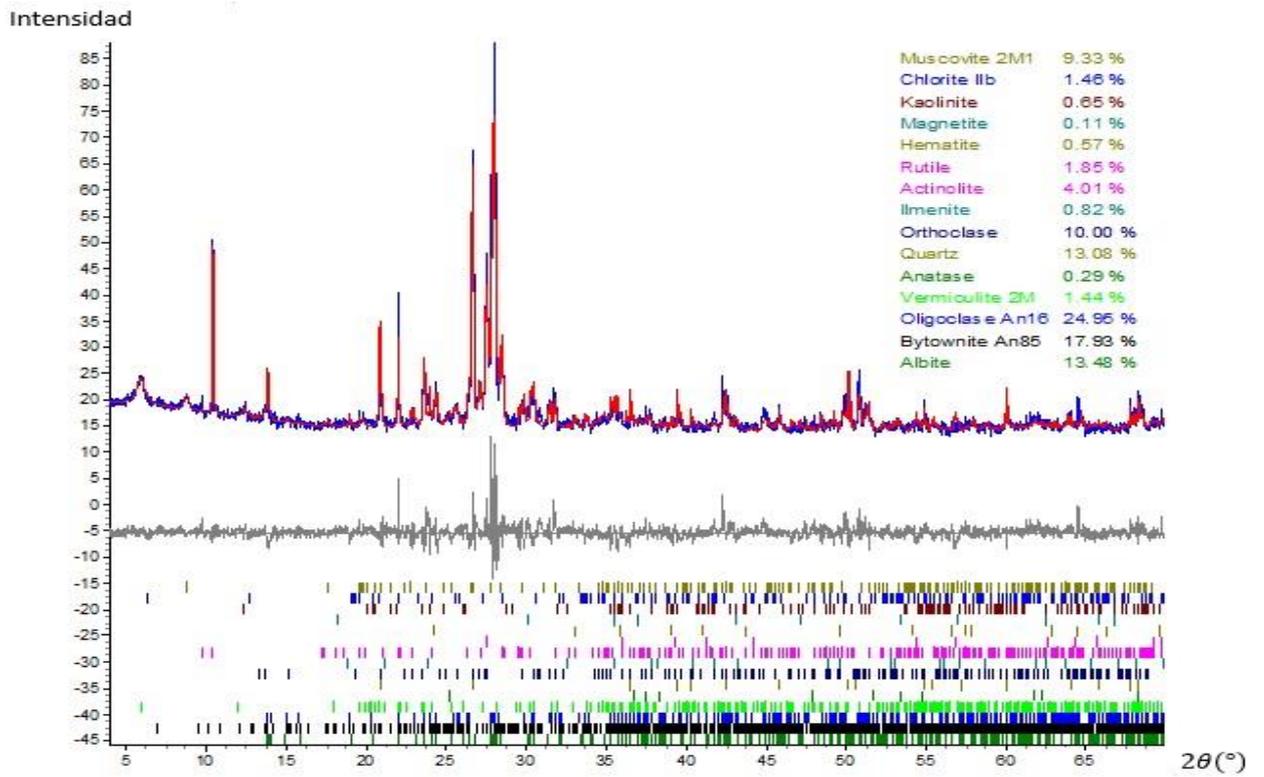
Anexos

A. Difractogramas de la muestra arena gruesa

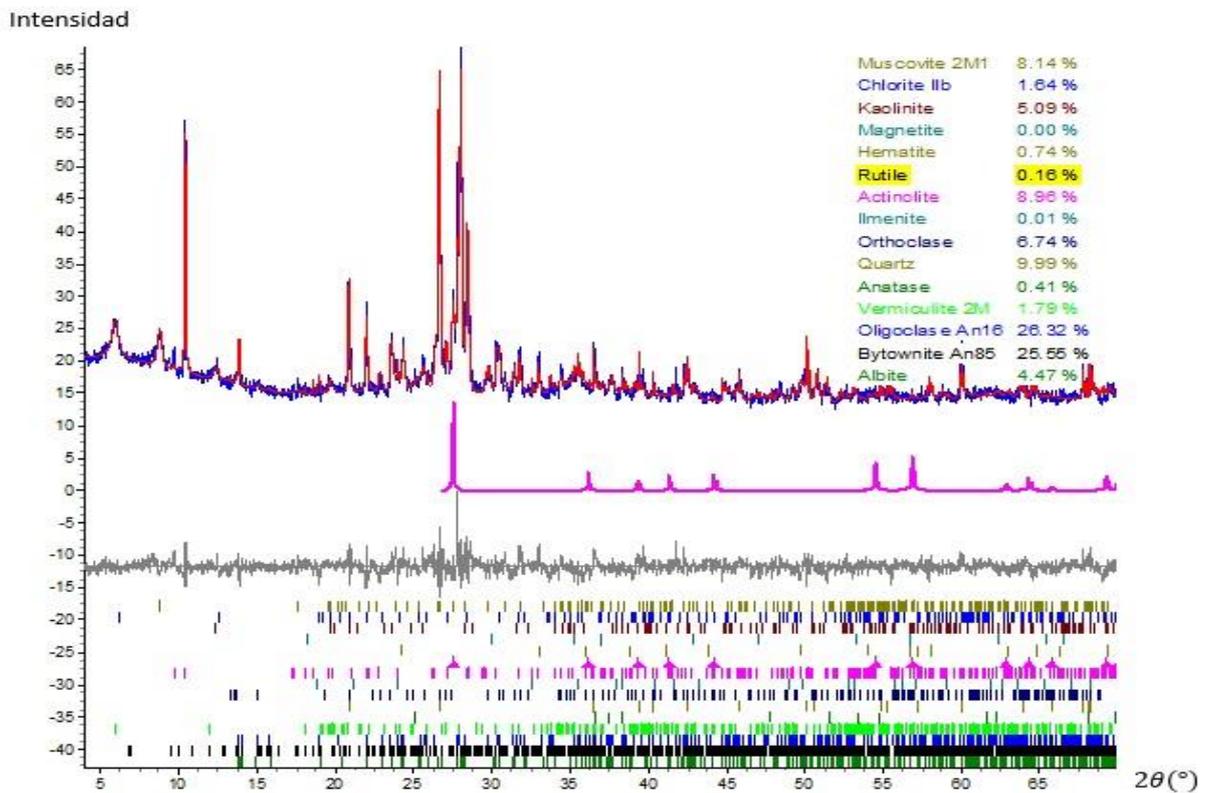
A.1. Tamaño de partícula menor a 250 μm , en bruto o sin separar



A.2. Tamaño de partícula menor a 250 μm , zona conductora

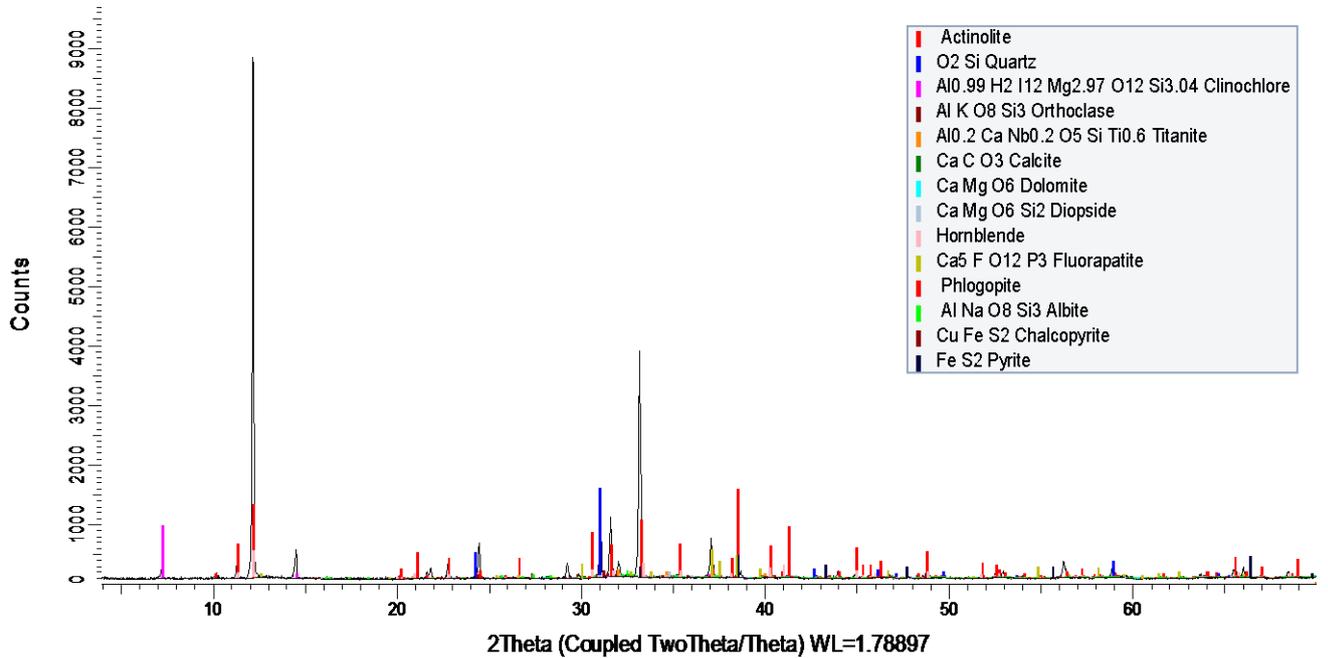


A.3. Tamaño de partícula menor a 250 μm , zona conductora

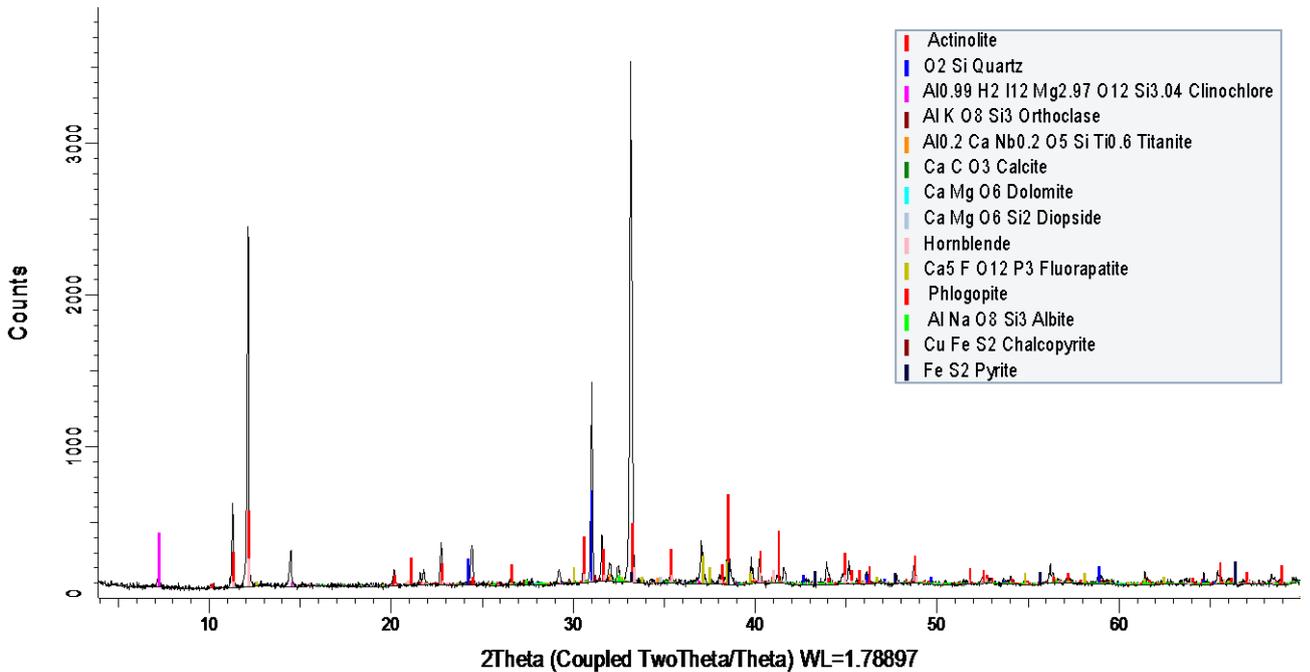


B. Difractogramas de la muestra R-053

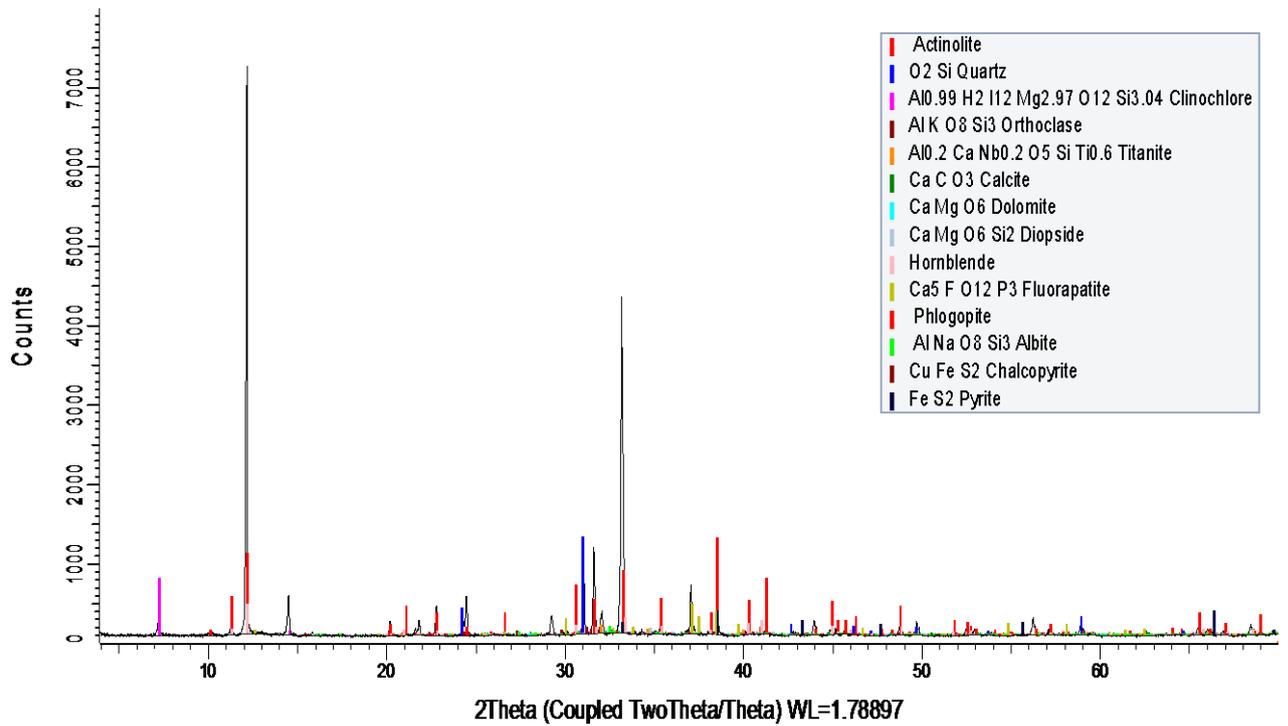
B.1. Tamaño de partícula <75,150> μm, en bruto o sin separar



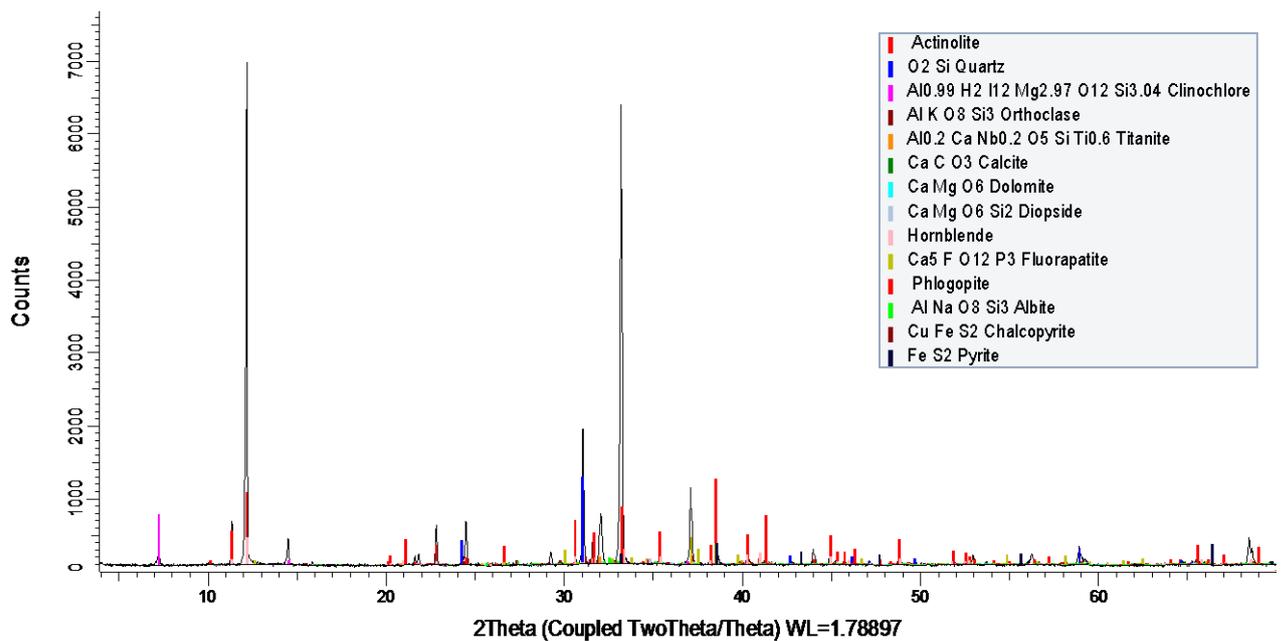
B.2. Tamaño de partícula <75,150> μm, zona conductora



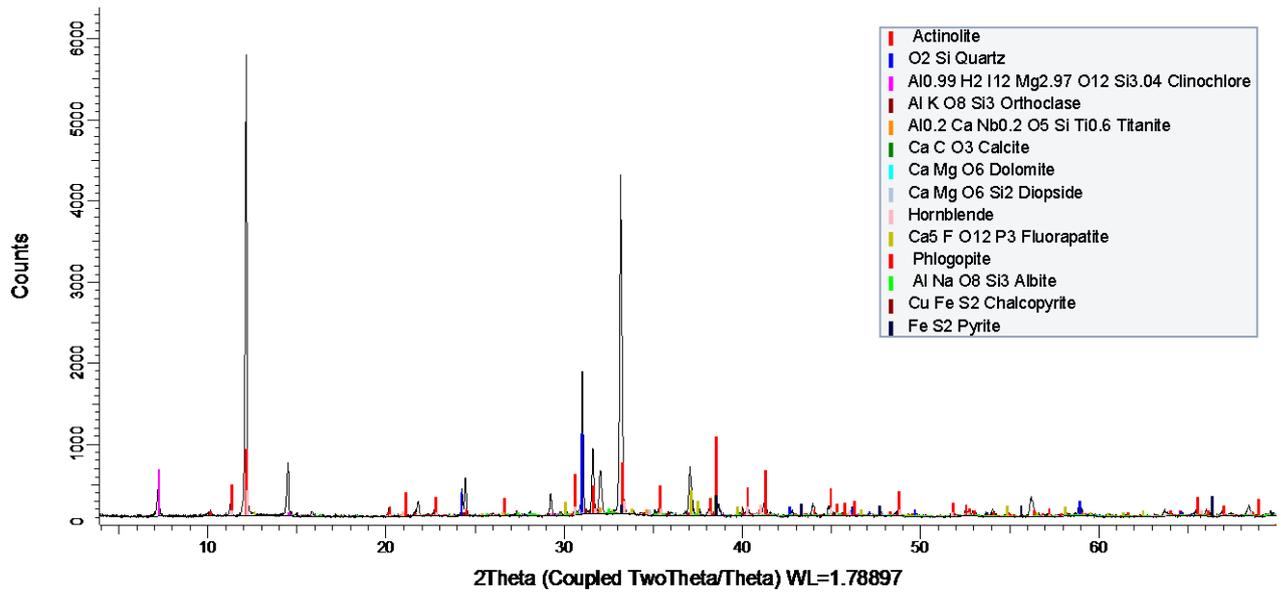
B.3. Tamaño de partícula <75,150> μm, zona no conductora



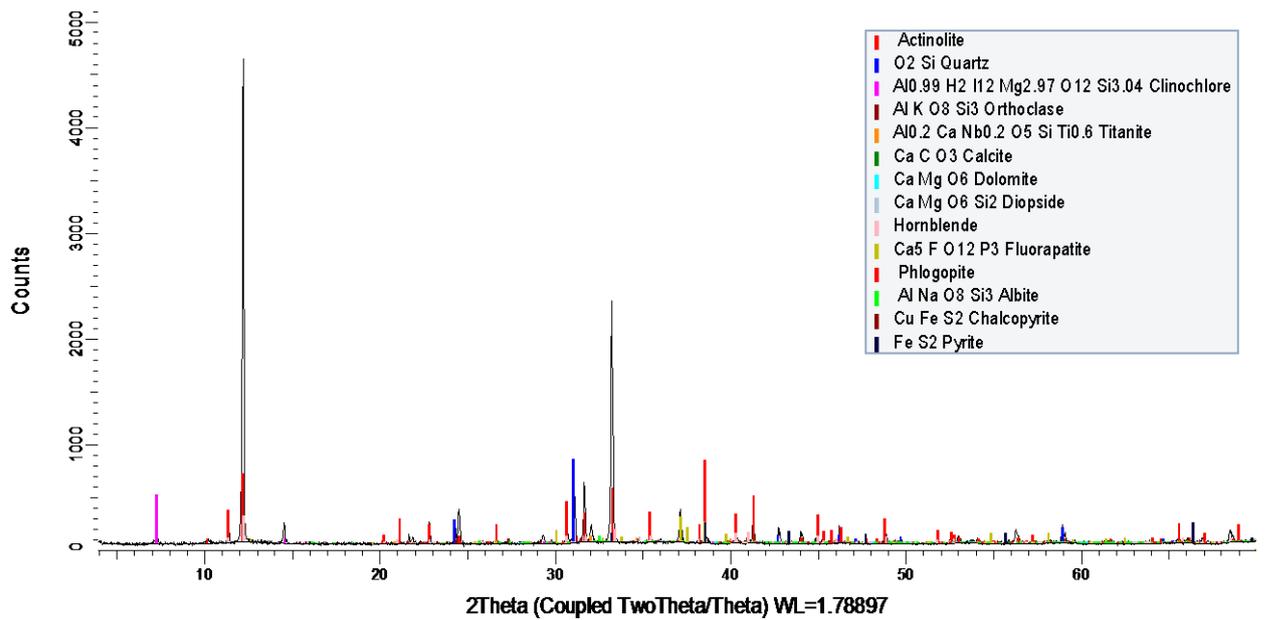
B.4. Tamaño de partícula <150,250> μm, en bruto o sin separar



B.5. Tamaño de partícula <150,250> μm, zona conductora

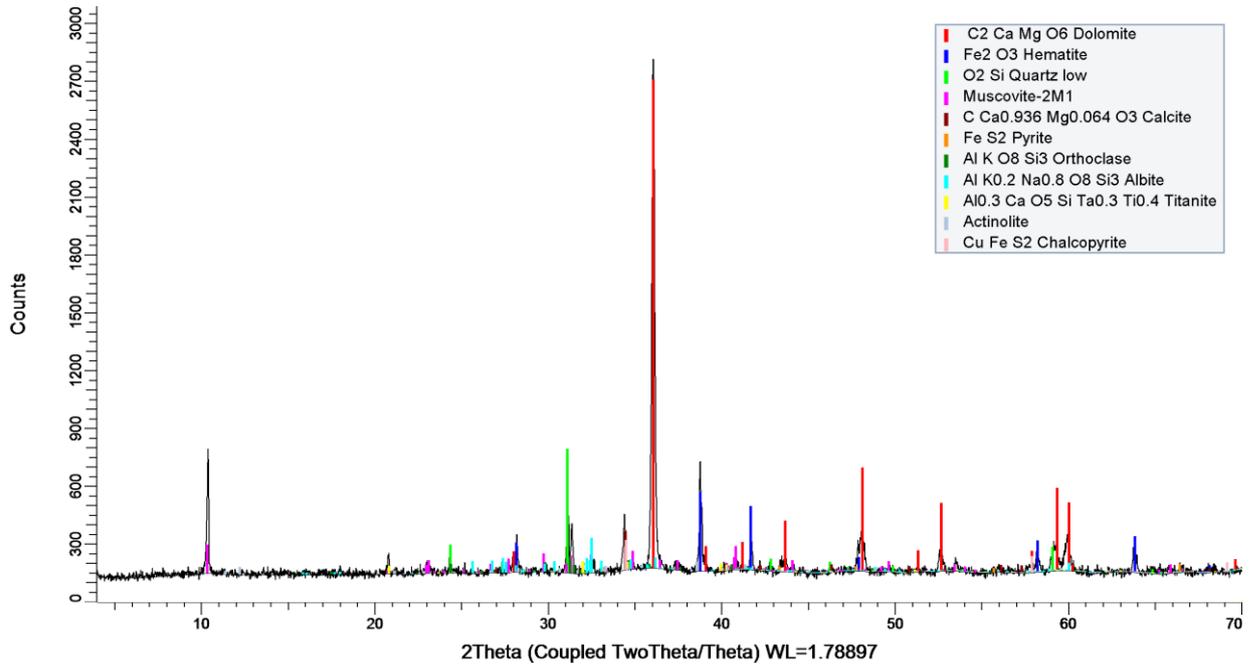


B.6. Tamaño de partícula <150,250> μm, zona no conductora

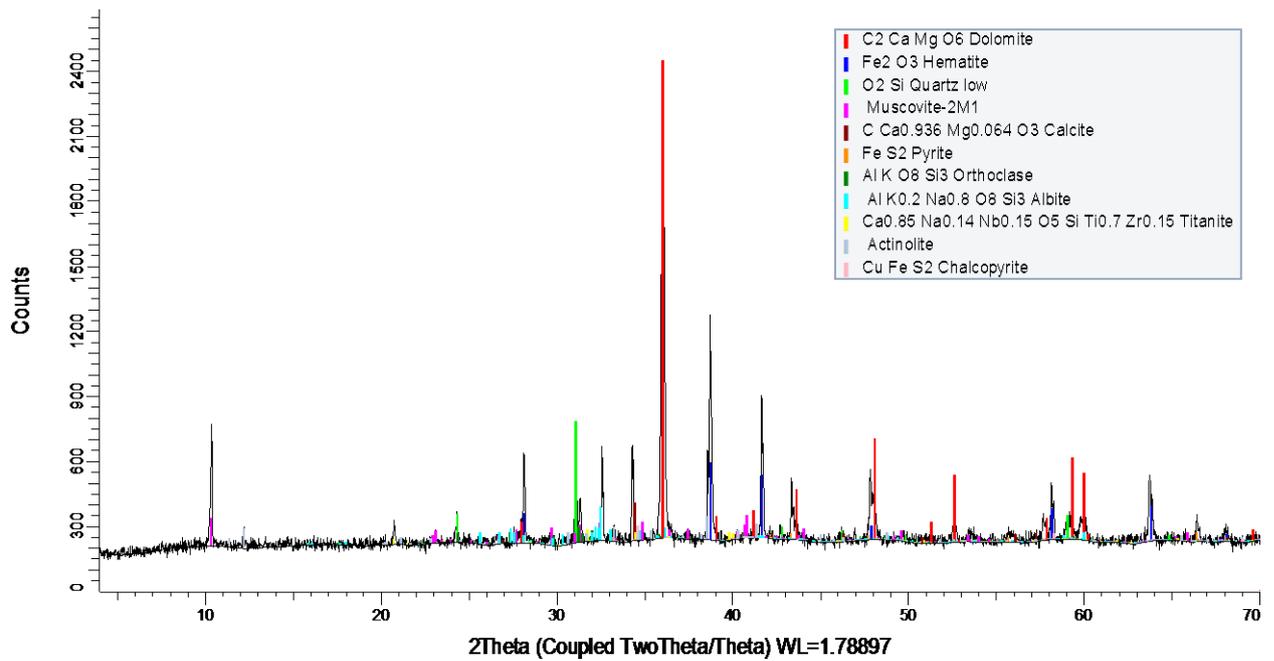


C. Difractogramas de la muestra R-032

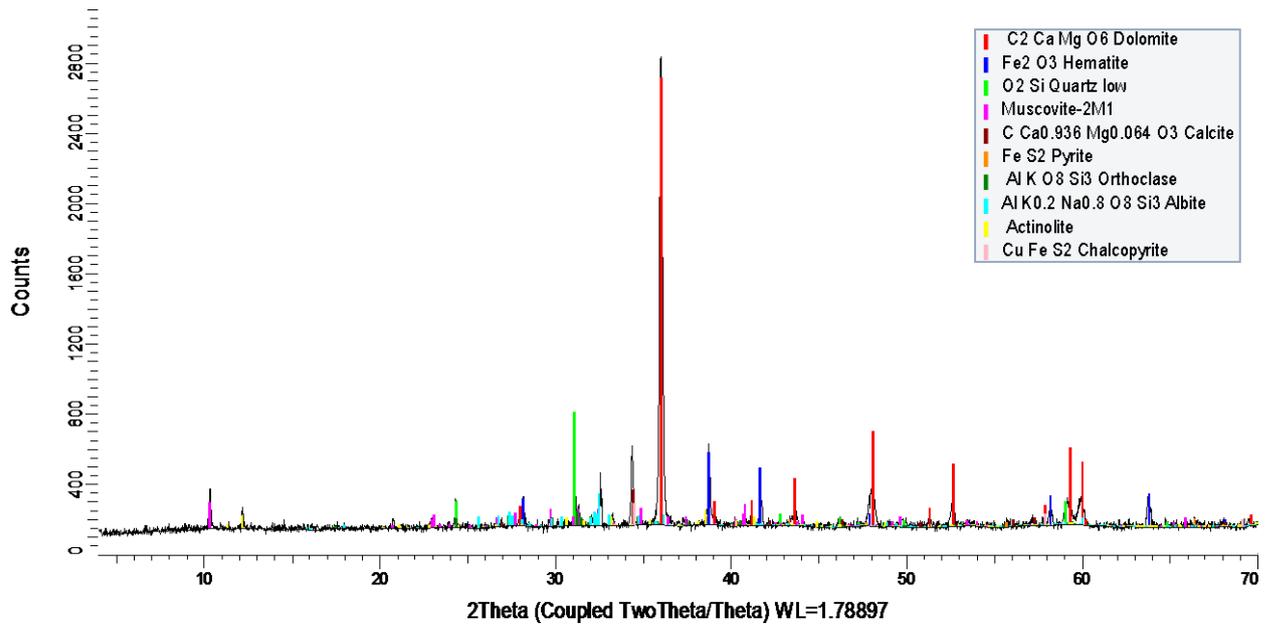
C.1. Tamaño de partícula <75,150> μm, en bruto o sin separar



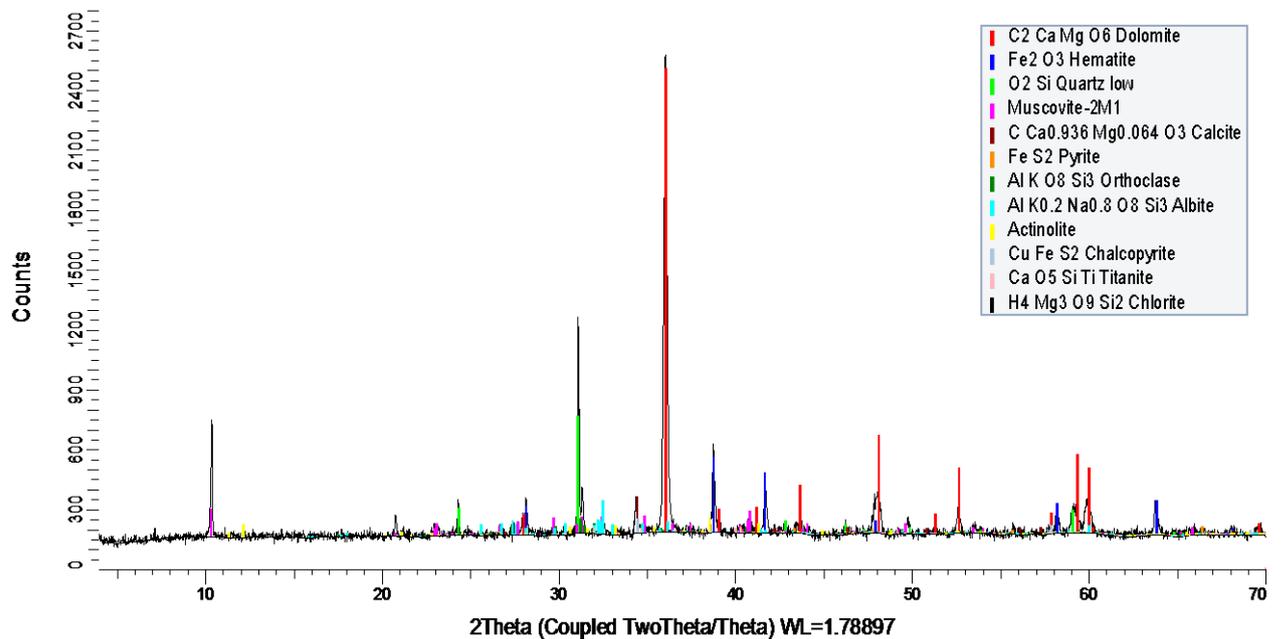
C.2. Tamaño de partícula <75,150> μm, zona conductora



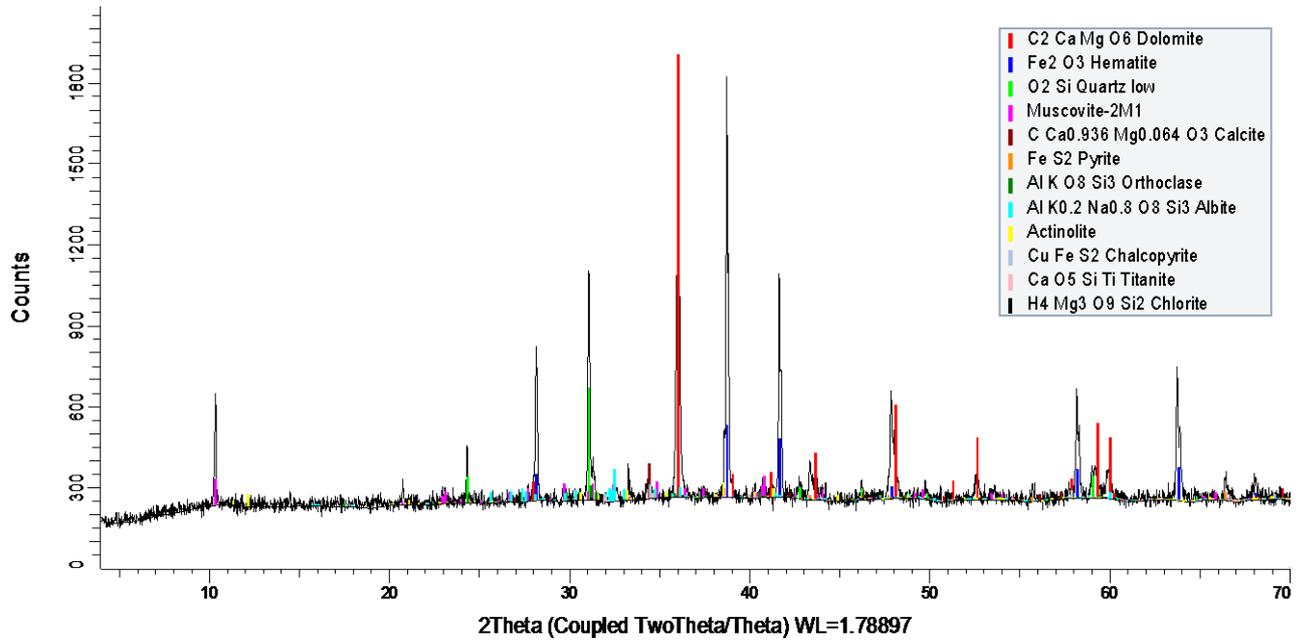
C.3. Tamaño de partícula <75,150> μm, zona no conductora



C.4. Tamaño de partícula <150,250> μm, en bruto o sin separar



C.5. Tamaño de partícula <150,250> μm, zona conductora



C.6. Tamaño de partícula <150,250> μm, zona no conductora

