

Evaluación de las propiedades magnéticas para estimar la recuperación a nivel industrial

Evaluation of magnetic properties to estimate recovery at the industrial level.

Luis Valderrama¹, Oscar Herrera¹, Ana Rivera¹,

¹Departamento de Ingeniería en Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama (Avenida Copayapu 485, Copiapó, Región de Atacama, Chile)
E-mail: luis.valderrama@uda.cl, oscar.herrera@alumnos.uda.cl, ana.rivera@uda.cl

RESUMEN

Chile, se caracteriza por ser un país minero, ya que es el primer productor mundial de cobre y yodo, segundo en litio y tercero en molibdeno. En los últimos años la producción de hierro en nuestro país se ha incrementado al doble, pero estos nuevos depósitos tienen menor ley y la magnetita se encuentra más diseminada, lo que requiere moler más fino para su liberación; producto de esto se ha observado inconsistencias con respecto a la estimación del contenido magnético en las menas minerales de hierro, la cual se realiza cotidianamente a través de pruebas en tubo Davis (DTT) con el fin de determinar los minerales magnéticos en el mineral. El contenido de magnetita ha puesto en duda los resultados obtenidos en estas pruebas, ya que este puede verse afectado por la intensidad de campo magnético utilizada, mineralogía de la mena o el grado de liberación de la partícula útil. Esto lleva a considerar otros tipos de análisis tales como, la balanza de saturación magnética (Satmagan) y el análisis químico de óxido ferroso, el cual utiliza estequiometría para la determinación de la cantidad de magnetita presente en una muestra, por lo tanto en objetivo de este trabajo es evaluar la validez de los estimadores actualmente utilizados por CAP Minería, para la determinación de las propiedades magnéticas de minerales de hierro, utilizando equipos a escala de laboratorio, con la finalidad de obtener una mejor representación de éstas para los procesos de concentración magnética a nivel industrial.

Palabras clave: magnetita, propiedades magnéticas, estimadores de recuperación.

ABSTRACT

Chile is characterized by being a mining country, as it is the world's leading producer of copper and iodine, the second producer of lithium and the third producer of molybdenum. In recent years, iron production in our country has doubled, but these new deposits have lower grades and magnetite is more disseminated. Because of this, it requires finer grinding for its release. As a result, inconsistencies have been observed concerning the estimation of the magnetic content in the iron ores, which is performed daily through Davis tube tests (DTT) to determine the magnetic minerals in the ore. The magnetite content has questioned the results obtained in these tests, as they may be affected by the magnetic field intensity used, the ore mineralogy, or the degree of release of the useful particle. Consequently, other types of analyses may be considered, such as the (Satmagan) magnetic saturation balance and the chemical analysis of ferrous oxide, which uses stoichiometry to determine the amount of magnetite present in a sample. Therefore, the objective of this work is to evaluate the validity of the estimators currently used by CAP Mining, using equipment at laboratory scale, to determine the magnetic properties of iron ores in order to obtain a better representation of these for the magnetic concentration processes at industrial scale

Keywords: magnetite, magnetic properties, recovery estimators.

1. INTRODUCCIÓN

La producción mundial de mineral de hierro el 2018 fue de 2.500 millones de toneladas, siendo la producción chilena de 14,5 millones de toneladas de mineral (principalmente mineral de magnetita) en sus diversas formas: pellets feed, pellets chips, finos y granza, con una ley de Fe promedio de 61,3%. A nivel nacional, la Región de Atacama aportó la mayor cantidad de mineral de hierro (87,9%), mientras que la Región de Coquimbo contribuyó con un 12,1% [1, 2].

Los separadores magnéticos se basan en la diferencia de propiedades magnéticas entre los minerales

magnéticos (magnetita y algunas hematitas) y las gangas no magnéticas, tales como cuarzo y feldespato. Es por ello que los separadores magnéticos pueden clasificarse en equipos de baja y alta intensidad, y pueden agruparse en separadores de alimentación seca y de alimentación húmeda [3].

Como la tendencia es aumentar la producción de hierro, se requerirán nuevos recursos de mineral de hierro, cuyos depósitos tendrán una menor ley de hierro y necesitarán una molienda más fina, para liberar los minerales de hierro y aplicar nuevas tecnologías. La magnetita es usada como indicador petrogenético para la exploración de nuevos yacimientos porque se puede alojar en ella un amplio rango de elementos como Al, Ti, V, Si, Ca, Mn, Mg, P, Sc, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, Nb, Mo, Sn, Y, Zr, Hf, Te y Pb, y la presencia y abundancia de estos elementos discriminara que tipo de yacimiento, sea del tipo hidrotermal, skarn, ígneo, pórfido [4, 5].

En consecuencia, se beneficiarán minerales de hierro más finos y se producirán concentrados de granulación fina y con especificaciones químicas y físicas muy estrictas [6]. Es por ello que, en la separación magnética, de partículas finas, las fuerzas magnéticas deben superar a las fuerzas de arrastre hidrodinámicas. Las fuerzas que actúan sobre las partículas en un separador magnético son magnéticas, gravedad, resistencia hidrodinámica, fricción, inercia y centrífuga. La importancia relativa de cada fuerza varía con el diseño del separador. Sin embargo, las fuerzas de arrastre magnéticas, gravitacionales e hidrodinámicas son las principales fuerzas que gobiernan el comportamiento general de las partículas minerales en un separador magnético. Así, mientras las fuerzas magnéticas atraen partículas magnéticas, las fuerzas de gravedad y arrastre actúan contra las fuerzas magnéticas. Por otra parte, el tamaño de partícula de los minerales tiene un efecto pronunciado sobre la magnitud de estas fuerzas. De igual manera, se ha informado que las fuerzas de arrastre hidrodinámicas son proporcionales al diámetro de las partículas, mientras que las fuerzas magnéticas y de gravedad son proporcionales a la segunda y tercera potencia del diámetro de las partículas, respectivamente [7, 8].

Spottiswood y Kelly [9] indican que las fuerzas magnéticas, gravitacionales e hidrodinámicas son las principales fuerzas que gobiernan el comportamiento general de las partículas minerales en un separador magnético. Es por ello por lo que el tamaño de las partículas de los minerales tiene un efecto significativo sobre estas fuerzas.

Por consiguiente, mientras las fuerzas de arrastre hidrodinámicas se vuelven más dominantes para las partículas finas, las fuerzas de gravedad son dominantes para las partículas gruesas y las fuerzas magnéticas para el rango de tamaño intermedio. En la práctica la separación magnética de minerales ferromagnéticos de tamaño de partícula inferior a $74\ \mu\text{m}$ no es muy efectiva [10]. De hecho, Basaran [11] indica que en la Planta de Divrigi, en Turquía, las pérdidas de hierro ocurren principalmente en fracciones finas como minerales de magnetita completamente liberados, también indica que, casi el 90% de las partículas de magnetita están contenidas en la fracción de $-53\ \mu\text{m}$, lo que constituye alrededor del 40% de magnetita en los relaves [12].

Todos los materiales se ven afectados por un campo magnético, aunque en muchas sustancias el efecto es demasiado ligero para ser fácilmente detectado. En el tratamiento de minerales estos pueden clasificarse en dos grandes grupos según que sean atraídos o repelidos por un imán: en paramagnéticos y diamagnéticos. Las sustancias diamagnéticas no se pueden concentrar magnéticamente, mientras que los paramagnéticos se pueden concentrar en los separadores magnéticos de alta intensidad, pero en la mayoría de los casos las propiedades paramagnéticas de los minerales se deben a la presencia de hierro en alguna forma ferromagnética. El ferromagnetismo se considera como un caso especial de paramagnetismo. Los minerales ferromagnéticos tienen muy alta susceptibilidad magnética para las fuerzas magnéticas y retienen algún magnetismo cuando se alejan del campo (remanencia), estos materiales se pueden concentrar en los separadores magnéticos de baja intensidad. Gracias a esta propiedad, el magnetismo, lo podemos clasificar en materiales magnéticos según sea su respuesta a un campo magnético, esto es conocido como susceptibilidad magnética. Entre más positivo sea la magnitud de la susceptibilidad magnética más fuertemente será atraído el material por un campo magnético (Ferromagnético), por el contrario, si la magnitud de la susceptibilidad magnética es negativa esto quiere decir que el material no será afectado por un campo magnético (Diamagnético) [13].

La práctica actual para evaluar la eficiencia de la recuperación de magnetita a nivel industrial es mediante la realización de pruebas a escala de laboratorio, por diversos métodos: tubo Davis, susceptómetro, medir el contenido de hierro por análisis químico, medir la susceptibilidad magnética y uso de la balanza de saturación magnética (Satmagan).

El tubo Davis es un instrumento de laboratorio diseñado para separar pequeñas muestras de minerales magnéticos de minerales débilmente magnéticos. Se ha convertido en un equipo de laboratorio estándar utilizado para la evaluación de la separabilidad de minerales magnéticos mediante separadores magnéticos de baja intensidad. Schulz [14] sugirió que se debe usar una inducción magnética de $0,4\ \text{T}$ o más entre los polos magnéticos. Por otro lado, Steinert y Boehm [15] afirman que la práctica actual es realizar las pruebas a una inducción magnética igual a la de la superficie del tambor del separador magnético. Esto es bastante cuestio-

nable, en primer lugar, porque la eficiencia de la separación no está determinada por la intensidad del campo magnético, sino por el producto de la inducción magnética y el gradiente de campo; la segunda razón es que, para tener una recuperación eficiente del material magnético, en el tambor magnético se requiere una distancia suficiente entre el tambor y el fondo del estanque. Es bien sabido que el índice de fuerza disminuye rápidamente al aumentar la distancia desde la superficie del tambor, por lo cual resulta obvio que la información obtenida en la prueba de tubo Davis no pueden ser directamente aplicable a los separadores magnéticos de tambor [16].

Otro equipo usado para cuantificar el contenido de magnetita es el Satmagan, en que las muestras de polvo son sometidas a un campo magnético suficientemente fuerte ($> 2,2$ T) que permite la saturación magnética de minerales. Consiste en una pequeña celda de plástico (1,2 mL) que se llena con la muestra y se introduce en un campo magnético inducido por una bobina interna. La relación entre la fuerza gravitacional y la fuerza magnética es proporcional al contenido de mineral magnético en la muestra. El momento magnético de otros minerales es insignificante en comparación con los minerales magnéticos. Es un método no destructivo y rápido, cuyos resultados dependen de la calibración del equipo, realizada en diez muestras estándar certificadas [17].

En nuestro país solo se usa el proceso de concentración magnética para beneficiar los minerales de hierro, por lo cual se debe estudiar ampliamente las características magnéticas. Las propiedades de los minerales y parámetros para la concentración son de vital importancia en la materialización de las decisiones de tipo estratégico y táctico tomadas por la empresa para continuar su marcha. Dicho de otra forma, es necesario conocer el comportamiento de estos parámetros para mantener la productividad de una planta. Para tener una relación directa entre el comportamiento del mineral en el proceso industrial y en escala de laboratorio, se debe simular dicho proceso donde se usa el ensayo en tubo Davis (DTT). Generalmente la definición y determinación de los parámetros más ampliamente utilizados son obtenidos directamente desde sus respectivos ensayos o análisis, tal como la ley de hierro total (% Fe) y recuperación en peso (% Rp). Mientras la ley de hierro magnético (% Fe mag.) y Magnetismo (% M) son determinados utilizando los resultados obtenidos de la muestra al ser sometida a un ensayo DTT, en conjunto con los análisis químicos realizados. La ley de hierro magnético considera, a diferencia de la ley de hierro total, la cantidad real de hierro presente en una muestra que puede ser concentrado magnéticamente a través de procesos que involucran equipos de concentración magnética. Este parámetro se obtiene de forma directa con los resultados obtenidos del ensayo DTT la cual puede ser calculada según la ecuación (1).

$$\% \text{ Fe mag} = \frac{\text{Rp DTT} \times L_c}{100 \%} \quad (1)$$

Donde:

Rp DTT = Recuperación en peso del concentrado en la prueba de Tubo Davis, %
 L_c = Ley de hierro obtenida en el concentrado DTT, %

De forma similar, el magnetismo (% M) se define como la razón entre el porcentaje de hierro susceptible magnéticamente, respecto al Fe total de la muestra. Este parámetro se utiliza para cuantificar la cantidad de hierro total que puede ser concentrable magnéticamente, el cual puede ser determinado según la ecuación (2).

$$\% \text{ M} = \frac{L_c}{\% \text{ Fe}} \times 100 \% \quad (2)$$

Donde:

% Fe = Ley de Fe de la muestra, %
 L_c = Ley de hierro del concentrado del Tubo Davis, %

Como el mineral que está siendo procesado en la Planta CNN, disminuyo la ley de hierro, la relación para determinar el porcentaje de magnetita con pruebas de laboratorio solo se cumple para muestras con alto magnetismo, mientras que para las muestras de mediano y bajo magnetismo no existe relación, por los factores de correlación obtenidos son bastante bajos, por lo tanto el objetivo de este trabajo es evaluar la validez de los estimadores que actualmente utiliza por CAP Minería, para determinar las propiedades magnéticas de minerales de hierro, utilizando equipos a escala de laboratorio, con la finalidad de obtener una mejor representación de éstas para los procesos industrial de la concentración magnética.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras utilizadas fueron obtenidas desde faenas pertenecientes a la Compañía de Acero del Pacífico (CAP), Planta Cerro Negro Norte (CNN), Los Colorados (LC) y Planta Magnetita (PM), todas ubicadas en la Región de Atacama, Chile. Dichas muestras fueron obtenidas desde diferentes muestreos realizados a planta, pozos de tronadura, y muestras de volumen disponibles.

Las muestras provenientes de PM y LC, permitieron comparar el estado de las diferentes faenas con respecto a recuperaciones en peso y ley de hierro magnético. Por otra parte, las muestras correspondientes CNN fueron recolectadas para cumplir con las distribuciones de ley de hierro magnético (% Femag.) y magnetismo (M), tal como fue definido como la razón entre el peso del concentrado magnético y la ley de hierro obtenido en el tubo Davis y el peso y la ley de la muestra alimentada.

En la Figura 1, se observar que el mineral alimentado a la planta es clasificado como de alto magnetismo y alta ley: mediano magnetismo y mediana ley y bajo magnetismo y baja ley, esto es realizada por CAP para definir el tipo de mineral (magnetita, martita y hematita) que se está extrayendo para realizar las mezclas que serán procesada en la planta concentradora para obtener un producto comercial [18].

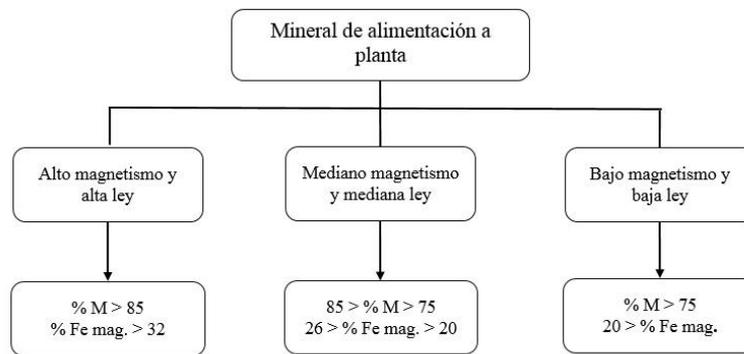


Figura 1: Distribuciones de ley de hierro magnético y magnetismo

La Tabla 1 presenta la matriz de distribución de las 31 muestras que fueron seleccionadas de un muestreo realizado en correa transportadoras y pozos de tronadura, con la finalidad de obtener muestras que se encontraran dentro de los parámetros definidos anteriormente de hierro magnético (% Femag) y magnetismo (M) para realizar los ensayos.

Tabla 1: Matriz de distribución de muestras Planta Cerro Negro Norte

Magnetismo \ % Femag.	Alto	Medio	Bajo
Alta	8	5	1
Media	5	5	1
Baja	3	1	2

La homogenización de muestras se realizó mediante la técnica de cono y cuarteo, hasta la obtención de una submuestra de aproximadamente 400 gramos, la que se redujo de tamaño utilizando un pulverizador de anillos, hasta lograr la granulometría deseada para los diferentes análisis.

2.1 Caracterización de tamaño de partículas

En la Figura 2, se presentan diferentes perfiles granulométricos obtenidos a través difracción laser, utilizando un analizador de partículas Mastersizer 2000, los cuales fueron obtenidos con la finalidad de comparar la técnica de pulverizado, que habitualmente utilizada para la preparación de muestras de ensayos DTT, con respecto a una muestra idéntica sometida a molienda en nivel laboratorio. Dichos resultados fueron contrastados con el perfil granulométrico industrial de Planta CNN, donde se puede apreciar, que para el caso de la molienda a nivel laboratorio posee un perfil similar al circuito industrial, mientras que para el caso del pulve-

rizado, donde se logró el mismo tamaño de $85\% - 44\ \mu\text{m} \pm 2\%$ al igual que los métodos anteriormente mencionados, se puede observar que posee un perfil granulométrico más fino en los tamaños $- 37\ \mu\text{m}$, en comparación a la molienda a nivel laboratorio e industrial. Esto indica que, aunque para todas las pruebas mencionadas se alcanzó una misma granulometría, al realizar pruebas de pulverizado se alcanza un mayor grado de liberación en el mineral, esto producirá un mayor aumento en la recuperación como lo indica [10].

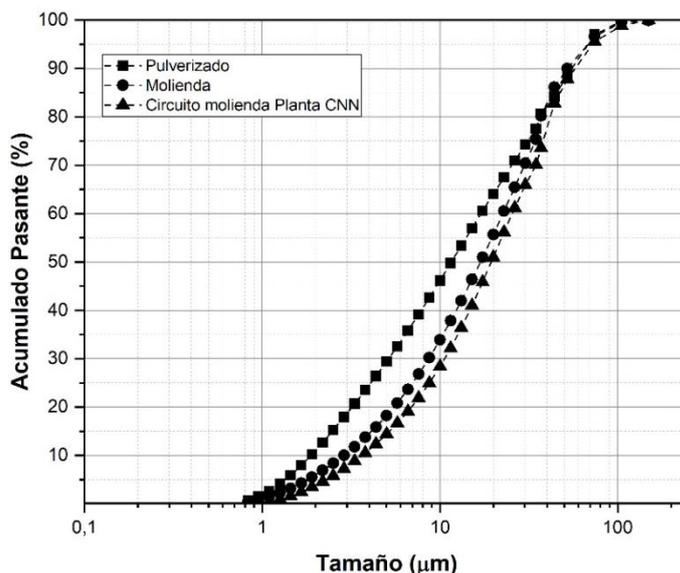


Figura 2: Caracterización de tamaño de partículas de muestra industrial Planta CNN en conjunto de muestras sometidas a técnica de pulverizado y molienda a nivel laboratorio.

2.2 Análisis químicos

Se realizaron análisis químicos a las muestras de cabeza como para los concentrados obtenidos, estos análisis son realizado en duplicado. Para la determinación de hierro total y óxido de hierro se utilizaron las técnicas de volumetría del dicromato de potasio. El análisis químico de las impurezas fue realizado por ICP. Con respecto a la totalidad de las muestras provenientes de planta CNN, se obtuvieron en promedio, leyes de hierro total y óxido de hierro de $35,87\% \pm 6,04\%$ y $12,74\% \pm 2,86\%$. En la Tabla 2 se presenta la caracterización de las muestras provenientes de planta Magnetita y Los Colorados utilizadas para las pruebas comparativas.

Tabla 2: Caracterización de muestras provenientes de Planta Magnetita y Los Colorados.

Elemento	Planta Magnetita	Los Colorados
Fe (%)	$10,16 \pm 0,06$	$41,00 \pm 0,74$
Fe mag. (%)	$6,18 \pm 0,19$	$38,30 \pm 0,07$
Fe DTT (%)	$67,90 \pm 0,99$	$70,47 \pm 0,14$
Magnetismo (%)	$60,82 \pm 1,45$	$93,41 \pm 1,92$

Para la determinación de magnetita presente en las muestras, se utilizó la relación estequiométrica existente entre el FeO en relación directa con el Fe_3O_4 (magnetita), la cual puede ser calculada de la forma indicada en la ecuación 3.

$$\% \text{Fe}_3\text{O}_4 = \frac{\text{Peso molecular de } \text{Fe}_3\text{O}_4}{\text{Peso molecular de FeO}} \times \% \text{FeO} \quad (3)$$

2.3 Ensayo Tubo Davis (DTT)

El análisis realizado en el separador Tubo Davis, que consiste en un tubo de vidrio de 30 mm de diámetro inclinado 45° , dentro del cual se colocan 20 gramos de muestra acondicionada como pulpa. Un sistema de bobinas colocadas en ambos lados del tubo proporciona un campo magnético regulable de alta intensidad, llegando a alcanzar hasta los 0,4 T, este campo magnético produce la concentración de partículas magnéticas

[12, 16]. El concentrado obtenido es lavado en forma continua por una corriente de agua controlable y esta operación es favorecida por la agitación dada al tubo mediante un número determinado de golpes por minuto. Según el tamaño de los granos o grado de molienda de la muestra, se acondicionan variables del sistema, tales como: peso de la muestra, tiempo de tratamiento, velocidad del agua y número de golpes por minuto [19].

Las diferentes muestras se analizaron individualmente como alimentación y concentrado DTT (recuperación en peso de material magnético obtenido en el tubo Davis DTT), mediante análisis químico para la determinación de diferentes compuestos (Fe, FeO, SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, N₂O, K₂O). La muestra obtenida fue reducida de tamaño en un chancador de mandíbula de 76 mm x 51 mm, luego homogenizada y mediante cuarteos sucesivos se obtienen 2,5 kg. Esta muestra se reduce de tamaños en molino de rodillo de laboratorio de 203 mm x 203 mm a un tamaño de 168 micrómetros. La muestra se homogeniza y cuarteo hasta obtener 200 gramos la cual es reducida en pulverizador de anillos hasta obtener una granulometría de 85% -44 µm, para realizar los ensayos en Tubo Davis. Los análisis granulométricos fueron realizados mediante tamizajes estándar. Los resultados permitieron determinar la recuperación en peso, ley de hierro magnético y magnetismo. En la Tabla 3 presenta los parámetros usados en las pruebas en el tubo Davis tal como lo indican [11, 15].

Tabla 3: Parámetros operacionales para ensayo DTT

Parámetros	Ensayo
Peso de muestra, g	20
Granulometría de muestra	85% -44 µm
Intensidad campo magnético, Tesla	0,1 – 0,4
Agua de lavado, mL/min	600
Golpes por minuto	110
Tiempo de ensayo, min	10
Angulo de inclinación, °	45

2.4 Análisis SATMAGAN

La cantidad de hierro magnético se midió en las muestras por el método electromagnético de la balanza de saturación magnética Satmagan, utilizando una granulometría de mineral de 100% menor a 149 µm, utilizando 1 a 2 gramos o 1,2 mL de muestra. Los resultados obtenidos corresponden al contenido de Fe⁺² (SatFe⁺²), para muestras con altos contenidos de hierro, se puede suponer que SatFe⁺² es proporcional al grado de magnetita [20- 22].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Pruebas comparativas entre diferentes faenas pertenecientes a CAP Minería

En cuanto a los resultados, en la Figura 3 se puede apreciar un comportamiento uniforme en la recuperación en peso para las muestras de alto magnetismo provenientes de Planta CNN, Planta Magnetita y Los Colorados. Para las muestras de medio y bajo magnetismo de Planta CNN, se observan diferencias en la recuperación en peso en el intervalo de 0,1 y 0,2 Tesla, de 12,30 % y 13,80 %, respectivamente.

Por otro lado, en la Figura 4 se observa el efecto de la intensidad de campo magnético en función de la ley de hierro magnético. Tal como lo observado en la figura anterior, las leyes de hierro magnético se mantienen constantes para las muestras de alto magnetismo de Planta CNN junto con las muestras de Planta Magnetita y Los Colorados, mientras que para las muestras de mediano y bajo magnetismo se aprecian grandes diferencias en su comportamiento. Estos resultados permiten deducir que la ley de corte de hierro magnético de alimentación a planta es de 20 % de Femag. Es por ello que al momento de considerar una ley de hierro magnético con respecto al ensayo en tubo Davis a 0,1 Tesla de intensidad de campo magnético, estas muestras serían descartadas y consideradas como material estéril.

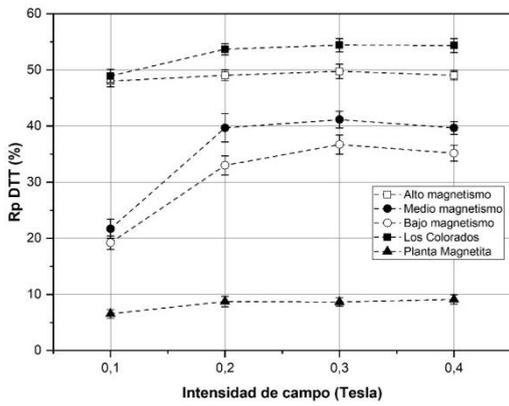


Figura 3. Recuperación en peso en función de la intensidad de campo magnético.

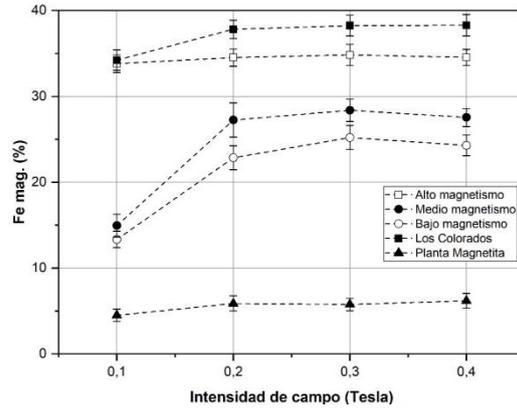


Figura 4. Ley de hierro magnético en función Intensidad de campo magnético.

3.2 Análisis DTT a muestras provenientes de planta Cerro Negro Norte (CNN)

En la Figura 5 se presenta una gráfica comparativa entre el análisis Satmagan y la cantidad de magnetita presente en las muestras, calculada de forma estequiométrica a través del análisis químico de óxido de hierro (FeO). Allí se observa que ambos métodos poseen una fuerte relación, tal como lo indica la teoría, puesto que presentan un coeficiente de correlación de 0,9345. De igual manera, en la Figura 6 se presenta el total de las muestras según su distribución de magnetismo. Así, para las muestras que presentan un alto magnetismo, efectivamente se mantiene la relación entre el ensayo DTT y Satmagan, obteniendo un coeficiente de correlación de 0,9566, mientras que para las muestras de mediano y bajo magnetismo no existe tal relación, ya que los coeficientes de correlación son de 0,5625 y 0,1025, respectivamente. Esto está de acuerdo con lo informado por [14], que la eficiencia de separación magnética cambia dramáticamente en un nivel a otro, y ellos lo correlacionan con la mineralogía modal QEMSCAN, los análisis químicos de hierro y la magnetita obtenido por Satmagan, en este caso existen otros óxidos de hierro (martita, hematita) aparte de la magnetita.

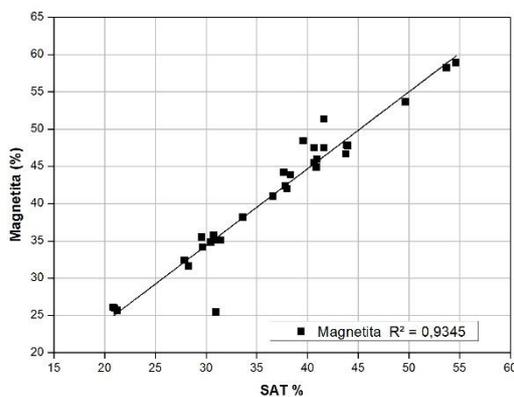


Figura 5. % SATMAGAN en función de la cantidad de magnetita presente en las muestras.

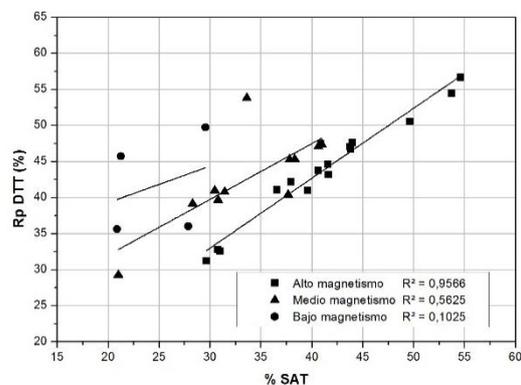


Figura 6. % SATMAGAN en función de la recuperación en peso para el total de las muestras.

Al analizar la Figura 7 se puede observar que independientemente de la intensidad de campo magnético que se aplique en el ensayo DTT, se obtienen leyes de hierro similares para la mayoría de las muestras analizadas. Esto reafirma el propósito inicial del ensayo tubo Davis, el cual consistía en estimar leyes de hierro en el concentrado para los procesos de concentración magnética. Por otra parte, en la Figura 8 se presenta el resultado de los análisis químicos de las impurezas presentes en el concentrado DTT para el total de las muestras estudiadas, Es posible verificar que se presentan mayores cantidades de SiO₂ en las muestras de alto

magnetismo, mientras que en el resto de las muestras su contenido varía en función del magnetismo que presenten.

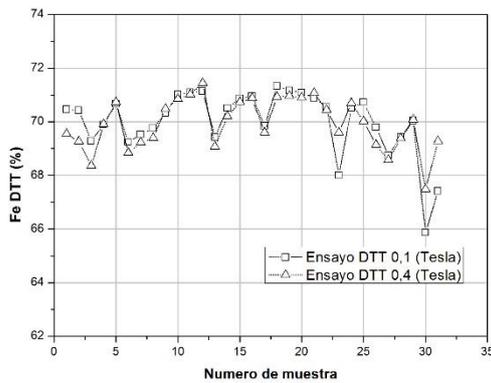


Figura 7. Ley de hierro en el concentrado DTT obtenido con diferentes intensidades de campo magnético.

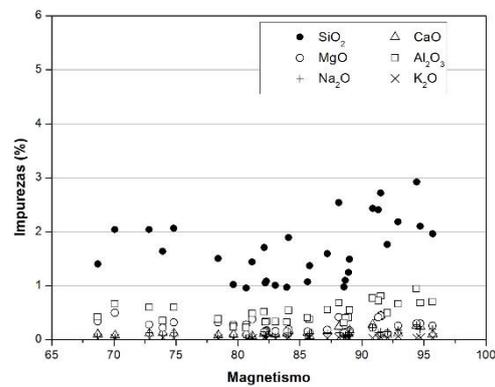


Figura 8. Impurezas presentes en el concentrado DTT realizado a 0,4 Tesla de intensidad.

En relación con el resto de las impurezas, se verifica que se mantienen constantes independientemente en todo el rango de magnetismos, lo que hace inferir que las impurezas, exceptuando SiO₂, pueden estar presentes en minerales de hierro que son concentrados en el ensayo de tubo Davis. Estudio realizado por [16] en tubo Davis, muestran que, si la magnetita se encuentra más fina, el grado de liberación debe ser mayor; para obtener concentrados de hierro de mayor calidad, deben ser molida a una granulometría menor a 10 µm.

Mediante análisis químicos por: FeO, SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, N₂O y K₂O, se realizó una aproximación a la composición química de los concentrados DTT, calculando de forma estequiométrica la cantidad de magnetita en conjunto con las impurezas. En la Figura 9 se presenta la composición de los concentrados obtenidos con respecto al magnetismo que originalmente poseían. De esta forma se puede observar que, para las muestras de alto magnetismo, sobre el 90% del concentrado corresponde a magnetita e impurezas, mientras que a medida que el magnetismo disminuye, la participación de estas especies se ve disminuida. Considerando los análisis de las Figuras 7 y 8, cuyas leyes de hierro en el concentrado DTT superan el 66 %, con contenido de impurezas que se mantienen constantes, se infiere que el resto del concentrado DTT que no corresponde a magnetita e impurezas, podrían contener otras especies de hierro de leyes similares [15], las cuales estarían siendo concentradas al momento de realizar el ensayo DTT.

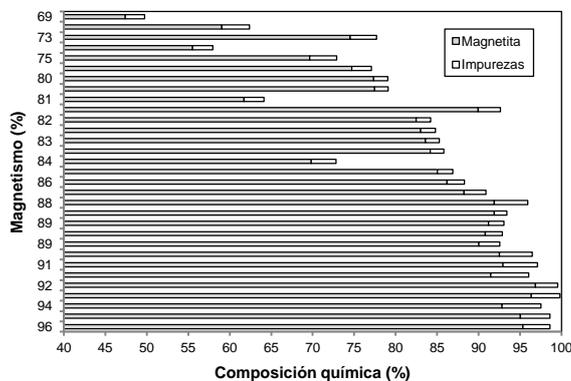


Figura 9. Recomposición química de los concentrados DTT obtenidos utilizando los diferentes análisis químicos realizados

Basándose en las consideraciones antes indicadas, se pudo verificar que el comportamiento de una muestra no necesariamente estará ligado a las propiedades magnéticas que posea, es decir, cantidad de hierro magnético (% Femag.) o magnetismo. Por lo tanto, se plantea una recuperación en peso en base a la cantidad de magnetita presente en el concentrado DTT, utilizando análisis químico de óxido de hierro. Dicha recuperación en peso, en base a magnetita, se presenta en la ecuación 4, que considera un balance entre la recuperación en peso obtenida en el ensayo DTT con respecto a la cantidad de magnetita presente en el concentrado. Así, se considera el comportamiento individual de cada muestra, lo que podría evitar errores cuando se calcula una recuperación en peso en base a propiedades magnéticas.

$$Rp_{\text{Magnetita}} = \left(\frac{\text{FeO}_{\text{CDTT}} \times C_1 \times Rp_{\text{DTT}}}{100 \%} \right) + C_2 \quad (4)$$

Donde:

- $Rp_{\text{Magnetita}}$ = Recuperación en peso calculada respecto a la magnetita presente en el concentrado DTT, %
 FeO_{CDTT} = % de FeO presente en el concentrado DTT, %
 Rp_{DTT} = Recuperación en peso obtenida en ensayo del tubo Davis (DTT), %
 C_1 = Relación estequiométrica ($\text{PMFe}_3\text{O}_4/\text{PMFeO}$)
 C_2 = Factor que incluye el nivel de impurezas presentes en el concentrado DTT, en conjunto con el efecto de granulometría debido a pulverizado, %

Para las constantes descritas se considera $C_1 = 3,2226$ como factor estequiométrico, mientras que $C_2 = 1,8 \%$ como factor de impurezas, el cual representa a las impurezas de los concentrados Pellet Feed producidos por Planta CNN y al efecto de granulometría más fina producida por el pulverizado en la preparación de muestra para ensayo DTT. Este parámetro representa un factor operacional real, y dado que está sujeto a condiciones industriales, tiende a ser mayor que las impurezas determinadas en el ensayo tubo Davis.

3.3 Análisis a muestras compósito por turno provenientes de Planta CNN

Se utilizaron 27 muestras compósitos por turno obtenidas desde planta CNN para la validación de cálculo de recuperación en peso en base a magnetita. Las cuales presentaron en promedio, leyes de hierro magnético de $30,5 \% \pm 1,4 \%$, las cuales además presentaban magnetismos del orden de $90,55 \% \pm 2,43 \%$.

En la Figura 10, se presenta la recuperación global de la planta, y se compara con la recuperación estimada y con la recuperación obtenida a través del ensayo DTT. En efecto, el ensayo DTT sobreestima, en la mayoría de los casos, a la recuperación en peso que se obtiene finalmente en el circuito de planta CNN. De igual manera, la estimación actualmente utilizada para determinar la recuperación a nivel planta, corresponde a un ajuste lineal a la curva entregada por los diferentes puntos obtenidos a través del ensayo DTT, en donde se observa una reducción en el valor de recuperación en peso, pero se mantiene la misma tendencia que posee el ensayo DTT.

En la Figura 11, se presenta una comparación entre la recuperación global de planta con respecto a la estimación y la recuperación en peso en base a magnetita, donde en la mayoría de los casos, la recuperación en base a magnetita se correlaciona de mejor forma con la recuperación en peso global obtenida por planta. A modo de comparación, en la Tabla 4 se presentan la desviación media absoluta junto con el error medio cuadrático y error medio absoluto para los diferentes métodos evaluados en la estimación de recuperación en peso, donde para el caso de la desviación absoluta media y el error medio absoluto se observa que la recuperación propuesta en base a magnetita presenta menores valores.

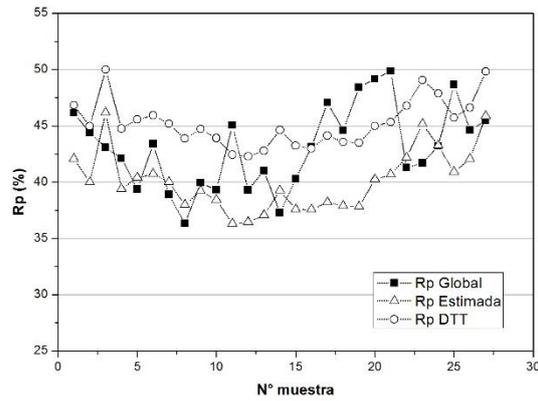


Figura 10: Comparación entre recuperación en peso global de planta con respecto al ensayo DTT y estimación.

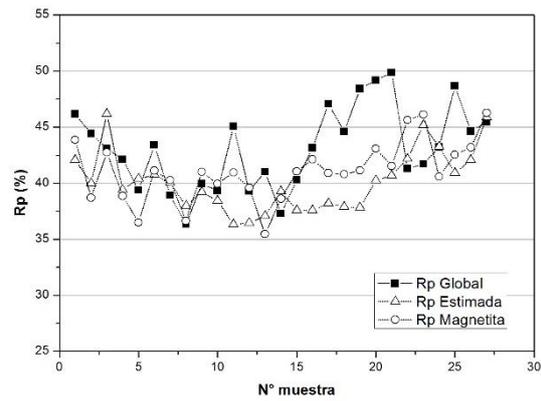


Figura 11: Comparación entre la recuperación global de planta con respecto a la estimación actualmente utilizada, y recuperación en peso en base a magnetita.

Tabla 4: Comparación entre los diferentes métodos utilizados para el cálculo de recuperación.

	Rp DTT 0,4 (Tesla)	Rp DTT 0,1 (Tesla)	Rp Magnetita (%)	Rp Estimación (%)	SATMAGAN (%)
Desviación absoluta media (%)	3,33	3,77	3,13	3,99	3,87
Error medio cuadrado (%)	14,16	31,85	15,35	25,52	22,68
Porcentaje de error medio absoluto (%)	7,77	9,60	7,01	8,87	8,62

Junto con el análisis descriptivo, se realizó un análisis ANOVA de comparación de medias para las diferentes recuperaciones obtenidas por los diferentes métodos, aplicando el software estadístico Statgraphics Centurion XV. Es por ello que en la Tabla 5 se presenta la identificación utilizada para realizar el análisis, mientras que en la Tabla 6 se presentan los resultados de este. Es posible observar que el valor-P presenta un valor de 0,0, por lo cual se rechaza la hipótesis de igualdad de medias, debido a que los diferentes métodos evaluados presentan medias estadísticamente diferentes, razón por la cual se realizó un análisis de rangos múltiples, utilizando el método de Tukey, para verificar cuáles combinaciones de resultados presentan diferencias significativas. De igual modo, en la Tabla 7 se presentan las combinaciones de los diferentes métodos evaluados con respecto al valor real de recuperación en peso obtenido en planta, donde es posible inferir que las recuperaciones en peso calculadas a través del ensayo DTT realizado a 0,4 Tesla, junto con la recuperación calculada en base a magnetita presentan similitudes estadísticas en sus medias, con respecto al valor real con una confianza del 95%. De esta manera se valida que efectivamente es posible obtener un parámetro de recuperación en peso, relacionando la información que entregan los diferentes ensayos.

Tabla 5: Identificación utilizada para análisis en Statgraphics

Método	Identificación
Rp por nivel de estanque	A
Rp por ajuste lineal	B
Rp DTT 0,1 (Tesla)	C
Rp DTT 0,4 (Tesla)	D
SATMAGAN	E
Rp magnetita	F

Tabla 6: Resultados de análisis ANOVA para los diferentes métodos evaluados

Fuente	Suma de Cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado Medio	Valor-P
Entre grupos	420,44	5,00	84,09	0,00
Intra grupos	1258,80	156,00	8,07	
Total (Corr.)	1679,24	161,00		

Tabla 7: Prueba de rangos múltiples para recuperación por tratamiento

Contraste	Significativa	Diferencia	+/- Límites
A - B	*	2,9733	2,2308
A - C	*	3,7696	2,2308
A - D		-0,7300	2,2308
A - E	*	2,5996	2,2308
A - F		2,0026	2,2308

* Indica diferencia significativa

4. CONCLUSIONES

- Los ensayos DTT realizados a muestras provenientes de Planta CNN, Planta Magnetita y Planta Los Colorados, solo se observó que para las muestras de medio y bajo magnetismo provenientes de Planta CNN, bajo los 0,2 Tesla, se presentan diferencias considerables en la recuperación en peso (Rp DTT).

- La cantidad de magnetita calculada a través de la balanza de saturación magnética Satmagan, guarda estrecha relación con respecto al cálculo realizado a través del análisis químico óxido ferroso. Se observó que con el método químico se obtienen cantidades levemente mayores de magnetita en las muestras, dado que dicho método considera todo el ion ferroso obtenido en el análisis químico como magnetita.

- Para las muestras de Planta CNN, se determinó que solo las muestras de alto magnetismo presentan una relación entre la recuperación en peso DTT (Rp DTT) y el % de magnetita obtenido por Satmagan, mientras que para las muestras de mediano y bajo magnetismo no existe relación para estos análisis.

- Se pudo comprobar que, efectivamente, la recuperación en peso calculada en base a magnetita sirve como estimador para la recuperación en peso global del circuito de Planta CNN, considerando los errores calculados, junto con el análisis ANOVA y el análisis de rangos múltiples, en los cuales se pudo determinar que no existen diferencias estadísticamente significativas entre el valor de recuperación en peso obtenido por planta con respecto al calculado en base a magnetita.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] USGS 2019. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>. Consulta 09/12/2019
- [2] Memoria Anual CAP 2018 memoria_cap_s_a_06_05_19_completo_final_1_1.pdf.
- [3] MULAR, A.L., BHAPPU, R.B. *Mineral processing plant design*. Editors: Society of Mining Engineers. American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. 1980.
- [4] AROLA, A.I., AYDOGANB, A. "Recovery enhancement of magnetite fines in magnetic separation". *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 232: 151–154. 2004.
- [5] NADOLL, P., ANGERER, T., MAUK, J. L., et al. "The Chemistry of hydrothermal magnetite": A review. *Ore Geology Reviews*, 61, 1-32, 2014.
- [6] AMIKIYA, C.A. "Characterization of iron ore- A case study of Mount Tokadeh, Western Nimba Area, Liberia". Thesis the Degree of Master of Philosophy in Chemical Engineering. University of Science and Technology. Kumasi. 2014.
- [7] WILLS, B., FINCH, J. "Magnetic and Electrical Separation". In *Wills Mineral Processing Technology*, 381–407. 2016.
- [8] SCHÖN, J. H. "Magnetic Properties. Physical Properties of Rocks. Fundamentals and Principles of Petrophysics", 415–435. 2015.
- [9] SPOTTISWOOD, D.J., KELLY, E.G. "Introduction to Mineral Processing", Willey, New York, 1982.
- [10] AROL, A.I., AYDOGAN, A. "Recovery enhancement of magnetite fines in magnetic separation". *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 232, 151–154. 2004.

- [11] BASARAN, B. “*Beneficiation studies on the fine iron ore tailings of Divrigi concentrator*”, MSc Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 1988.
- [12] DWORZANOWSKI, D. “*Maximizing the recovery of fine iron ore using magnetic separation*”. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Volume 112. Pag. 197-202. 2012.
- [13] WILLS, B.A., AND FINCH, J.A. *Magnetic and Electrical Separation*. En Will’s Mineral Processing Technology. Butterworth Heinemann. 2016.
- [14] SCHULZ, N.F. “Determination of the magnetic separation characteristics with the Davis Magnetic Tube”. Trans. SME-AIME, 229, 211–216. 1964.
- [15] STEINER, H.J., BOEHM, A. “Prediction of the performance of low-intensity wet-magnetic separators in the processing of partly altered magnetite ores”. In Proc. XXI Int. Miner. Proc. Congress, Rome, Italy, Vol. A, A7-35-41. 2000.
- [16] MURARIU, V., SVOBODA, J. “*The applicability of Davis Tube tests to ore separation by drum magnetic separators*”. Physical Separation in Science and Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 1–11. 2003.
- [17] DU BREUIL, C.L., PERROTON, A., BLANCHER, S., *et al.* “Iron Oxides Evolution along the Lateritic Profile of Mabounié Carbonatite (Gabon): a Key Point to Understand Magnetic Separation Processes”. https://www.researchgate.net/publication/314239456_Processing_of_low-grade_ore_deposits_Iron_Oxides_Evolution_along_the_Lateritic_Profile_of_Mabounie_Carbonatite_Gabon_a_Key_Point_to_Understand_Magnetic_Separation_Processes. Consultada el 05/06/2019
- [18] GOMEZ, O. *Algunos aspectos de las características magnéticas de los minerales en la evaluación de los depósitos de hierro*. Compañía de Acero del Pacífico. informe interno planta. Vallenar. 1997.
- [19] ABDEL HAFFEZ, G. “*Optimization of the operating parameters affecting davis tube magnetic tester using 2nd factorial design*”. Journal of Engineering Sciences, Assiut University, 1217-1231. 2012.
- [20] RASPISCAN SYSTEMS, 2018. Satmagan 135 [WWW Document] (Accessed 17.07.2020). <<https://www.rapiscansystems.com/en/products/satmagan-135>>.
- [21] STRADLING, A.W. “*Development of a mathematical model of a crossbelt magnetic separator*”. Minerals Engineering volume 4, 7–11, PP 733-745, 1991.
- [22] WIEGEL, R.L. “*Liberation in magnetite iron formations*”. Soc. Mining Eng., AIME Trans.,256, pp.247-256, 1975.

ORCID

Luís Ivan Valderrama Campusano
Oscar Ignacio Herrera Donoso
Ana Maria Rivera Varas

<https://orcid.org/0000-0002-3926-9811>
<https://orcid.org/0000-0002-7056-080X>
<https://orcid.org/0000-0003-0954-3610>