

# Determinación del grado de liberación de minerales magnéticos por medio de tubo Davis

## Davis

# Determination of the degree of liberation of magnetic minerals by means of a Davis tube

F. López-Márquez<sup>a</sup>, A. M. Teja-Ruiz<sup>b</sup>, F. Pedro-García<sup>b</sup>, O. Rosales-González<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

<sup>b</sup> Dirección de Laboratorios, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

## Resumen

El presente trabajo presenta un estudio de la recuperación magnética en función del tamaño de partícula para un mineral de hierro bandeado procedente del estado de Durango, México. La caracterización física de la muestra mineral se realizó por medio de difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía óptica con el fin de determinar las diversas fases mineralógicas presentes en la roca. Se determinó que las principales fases mineralógicas corresponden a cuarzo y magnetita, características del hierro bandeado, mientras que la presencia de pirita como mineral secundario indica una posible alteración del yacimiento mineral. La caracterización química se llevó a cabo mediante espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y técnica colorimétrica en UV-Vis, detectando un contenido de hierro de ~15% total repartido entre las fases de magnetita y pirita. La recuperación magnética se realizó por medio de un dispositivo magnético tipo tubo Davis determinando una relación directa entre el tamaño de partícula y la eficiencia de recuperación encontrándose la máxima recuperación a un tamaño de ~53 micrómetros.

**Palabras Clave:** Hierro bandeado, Magnetita, Tamaño de partícula, Concentración, Tubo Davis.

## Abstract

This study presents an analysis of magnetic recovery as a function of particle size for a banded iron ore from the state of Durango, Mexico. The physical characterization of the mineral sample was performed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and optical microscopy to determine the various mineralogical phases present in the rock. The main mineralogical phases were identified as quartz and magnetite, characteristic of banded iron formations, while the presence of pyrite as a secondary mineral suggests a possible alteration of the mineral deposit. Chemical characterization was conducted using energy-dispersive spectroscopy (EDS) and a UV-Vis colorimetric technique, detecting a total iron content of approximately 15%, distributed between the magnetite and pyrite phases. Magnetic recovery was carried out using a Davis tube magnetic separator, establishing a direct relationship between particle size and recovery efficiency, with maximum recovery observed at a particle size of ~53 micrometers.

**Keywords:** Banded iron, Magnetite, Particle size, Concentration, Davis tube.

## 1. Introducción

La industria siderúrgica de un país es un gran indicador de desarrollo, actualmente en México contribuye alrededor del 1.6% al PIB nacional y cerca del 10% al PIB manufacturero, por lo que es fundamental para sectores como la construcción, automotriz y bienes de capital.

En México, la industria del hierro y el acero tiene un papel fundamental en la economía, con estados como Coahuila, Michoacán y Sonora liderando la producción de este metal. Actualmente, el país produce más de 20 millones de toneladas de acero al año, posicionándose como uno de los mayores productores en América Latina (Asociación Latinoamericana del Acero, 2023).

\*Autor para la correspondencia: [omar\\_rosales@uaeh.edu.mx](mailto:omar_rosales@uaeh.edu.mx)

Correo electrónico: [lo442442@uaeh.edu.mx](mailto:lo442442@uaeh.edu.mx) (Fernando López-Márquez), [aislinn\\_teja@uaeh.edu.mx](mailto:aislinn_teja@uaeh.edu.mx) (Aislinn Michelle Teja-Ruiz), [fernando\\_pedro@uaeh.edu.mx](mailto:fernando_pedro@uaeh.edu.mx) (Fernando Pedro-García), [omar\\_rosales@uaeh.edu.mx](mailto:omar_rosales@uaeh.edu.mx) (Omar Rosales-González).

México posee buenos yacimientos minerales de hierro, sin embargo, estos yacimientos son finitos y debido a la alta demanda de acero a nivel internacional es necesario voltear a ver nuevos proyectos que ofrezcan alta viabilidad para el sector (França et al., 2020).

Una gran opción de explotación es el hierro bandeado, esta es una roca sedimentaria rica en hierro, caracterizada por capas alternas de minerales de hierro (como hematita o magnetita) y sílice (cuarzo). Este tipo de depósito se formó en el Precámbrico, hace más de 2,5 mil millones de años, y es una de las principales fuentes de mineral de hierro a nivel mundial (Tripathy et al., 2018).

El desarrollo e investigación para la explotación y uso de tecnologías avanzadas de concentración y beneficio, como la separación magnética y el tostado magnetizante, permiten incrementar la recuperación de hierro a partir de fuentes de baja ley como pueden ser muchos de los depósitos de hierro bandeado, los cuales podrían convertirse en una fuente secundaria de mineral para la industria siderúrgica, contribuyendo a la diversificación de los recursos minerales y la estabilidad de dicho sector (Roy et al., 2020).

A pesar de los avances en el procesamiento del hierro bandeado, aún existen desafíos relacionados con el consumo energético y la gestión de residuos mineros. La implementación de tecnologías más eficientes y sostenibles es clave para reducir el impacto ambiental y optimizar el aprovechamiento de estos recursos. La industria siderúrgica en México enfrenta el reto de adaptar estas innovaciones para garantizar un suministro constante de materia prima sin comprometer el equilibrio ecológico.

El presente estudio analiza el efecto del tamaño de partícula en la concentración de mineral de magnetita contenido en hierro bandeado. La importancia de este estudio recae en que, con el agotamiento de los minerales de alta ley, es crucial considerar alternativas para incrementar la obtención de hierro a partir de minerales de baja ley para mantener la competitividad del sector siderúrgico y asegurar el desarrollo sostenible de la minería en el país.

## 2. Metodología experimental

Un total de 5 kg de muestras de mano con morfología irregular en un tamaño promedio de 15 in<sup>3</sup> (determinadas mediante mediciones manuales con vernier) fue obtenido de áreas aledañas a la mina Hércules del estado de Coahuila. La muestra fue preparada mecánicamente por medio de una quebradora de quijadas (ALLIS MINERAL SYSTEMS), quebradora de rodillos (QUINN PROCESS EQUIPMENT) y finalmente mediante molienda en seco. Esta última se realizó empleando una relación bolas:polvo de 11:1 durante 60 min usando una velocidad de 60 rpm. La muestra fue tamizada y separada por granulometría empleando un separador Ro-tap.

La caracterización física se realizó en un difractor de rayos X (INEL, EQUINOX 2000) usando una fuente de Co ( $\lambda = 1.7890 \text{ \AA}$ ). La morfología y mineralogía fue estudiada mediante microscopía electrónica de barrido en un equipo (JEOL, JSM 6300) equipado con un analizador elemental EDS. Se empleó un microscopio digital Keyence VHX-7000 equipado con un analizador EA-300 como complemento a la microscopía electrónica. La cuantificación del hierro total en

la muestra se realizó mediante la técnica de colorimetría en un espectrofotómetro UV-vis (LAMBDA XLS).

El análisis de la recuperación magnética en función de la granulometría se realizó por triplicado en un separador magnético tubo Davis (ERIEZ, EDT). Para cada prueba se emplearon 5 g de la muestra en polvo, la cual fue depositada en el tubo Davis con un flujo constante de agua. Las condiciones del concentrador magnético fueron: una velocidad de agitación de 60 y 1.5 A de potencia en las bobinas, por un tiempo de 5 min, tras lo cual se recuperó la parte magnética y no magnética, las cuales fueron secadas a 110 °C por 1 h.

## 3. Discusión de resultados

Para el análisis de pesos retenidos se utilizó una muestra representativa de 500 g, la cual fue tamizada empleando la serie de tamices que se muestra en la Tabla 1. En esta tabla se observa que el mayor peso retenido corresponde al rango de 53 a 74 micras, representando el 22% del total de la muestra mineral sometida al proceso de conminución.

Tabla 1: Análisis de pesos retenidos para la muestra mineral de BIFs

Rango de tamiz	Tamaño de partícula	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Peso acumulado negativo (%)
+100	>147	34.32	6.86	93.13
-100 +150	104-147	59.67	11.93	81.20
-150 +200	74-104	64.32	12.86	68.33
-200 +270	53-74	114.89	22.97	45.36
-270 +325	43-53	89.64	17.92	27.43
-325 +400	33-43	75.96	15.19	12.24
-400	<33	61.20	12.24	0

En la Figura 1 se aprecia que el análisis granulométrico de la muestra presenta una distribución monomodal, con el peso retenido predominante ubicado entre los tamices de malla 200 y 270, indicando una tendencia hacia tamaños de partícula más finos. Sin embargo, el valor de P80 reportado indica que el 80% del mineral triturado tiene un tamaño de partícula menor o igual a 140.17 micras. Esto implica que la mayoría del material (80%) está suficientemente fragmentado para pasar a través de tamices de la serie Tyler correspondientes a la malla -100 +150, con aberturas que van de 104 a 147 micras. El 20% restante está compuesto por partículas más gruesas, es decir, mayores a 140.17 micras, clasificando así al material conminuido dentro de un rango de tamaño medio a fino.

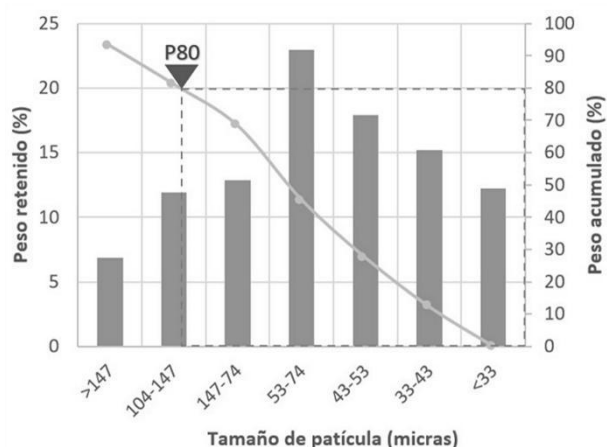


Figura 1: Distribución de tamaño de partícula y P80 de la muestra de BIFs.

En la Figura 2 se presenta el patrón de difracción de rayos X del polvo mineral. La muestra se encuentra conformada por una matriz de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ , COD 96-900-5018) con minerales secundarios de hierro en su forma sulfurada (pirita,  $\text{FeS}_2$ , COD 96-900-0595) y oxidada (magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , COD 96-900-5815). Estos resultados resultan congruentes con los yacimientos BIFs donde los principales componentes son bandas de cuarzo alternadas con magnetita. La ausencia de hematita como fuente de hierro muestra que el yacimiento no ha sufrido alteraciones significativas de meteorización o procesos geológicos oxidantes que promuevan el enriquecimiento de este (Wang et al., 2024). Por otro lado, la presencia de pirita puede deberse a su presencia desde la formación del yacimiento (asociación a zonas pobres en oxígeno, presencia de azufre disuelto en el agua atrapada durante la compactación, etc.) o a un proceso hidrotermal que produjo inclusiones de sulfuros dentro de las bandas (Aftabi et al., 2021).

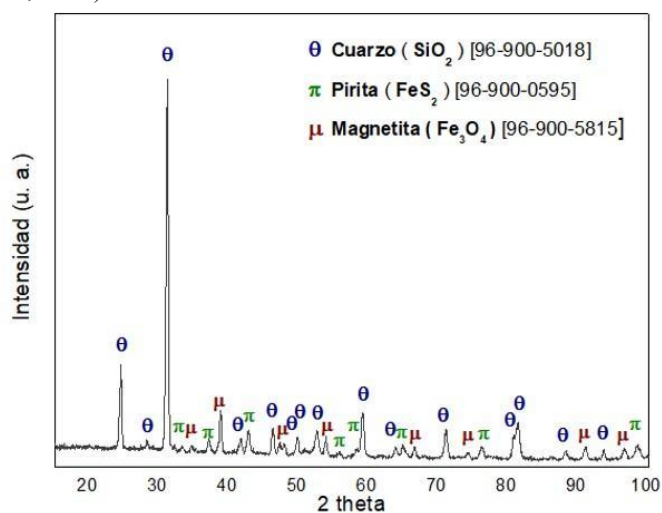


Figura 2: Patrón de difracción de rayos X de polvo mineral

El análisis realizado por medio de microscopía electrónica de barrido y EDS se presenta en Figura 3, donde (A) presenta los análisis EDS para los distintos elementos encontrados, (B) micrografía usando electrones secundarios y (C) contenido de los elementos encontrados en EDS. La diferencia de contrastes observada en (B) se atribuye a fases minerales con distinta densidad electrónica, lo cual se corrobora por el análisis elemental (A) donde se relaciona cada banda óxidos de Si y Fe. De igual manera se pueden observar bandas correspondientes

al  $\text{FeS}_2$ , lo cual da indicios de que los sulfuros detectados en DRX pueden deberse al atrapamiento de soluciones sulfuradas durante la etapa de compactación y, como se mencionó anteriormente, al no presentar altos grados de alteración dichos sulfuros no tienden a oxidarse para formar compuestos más estables como lo son la magnetita, hematita o goethita (Aftabi et al., 2021). La tabla de contenido elemental Figura 3 (C) muestra que, además de los elementos mencionados anteriormente, el mineral tiene la presencia de Mg, Al, Ca y Mn, a pesar de lo cual estos se encuentran en contenidos inferiores al 1% en peso, lo cual justifica su ausencia en el patrón de DRX ya que este cuenta con un límite de detección del 5%. La presencia de dichos elementos es frecuente en este tipo de yacimientos y se pueden atribuir a la presencia de carbonatos de Mg, Ca disueltos, el Al a la presencia de arcillas o aluminosilicatos durante la formación del yacimiento.

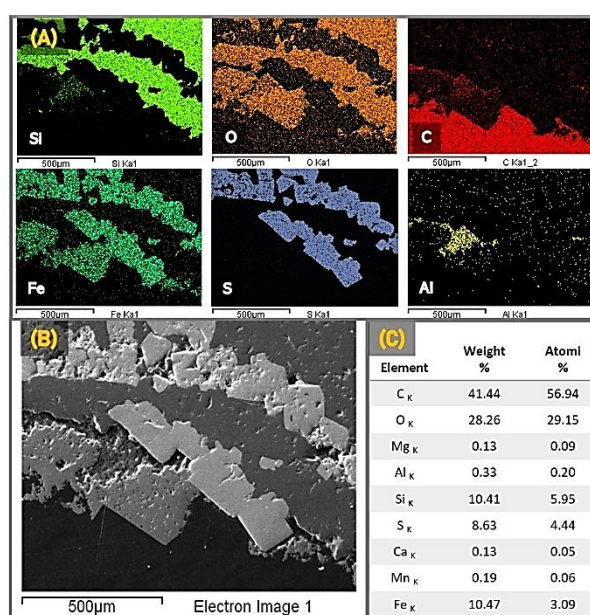


Figura 3: (A) Espectros XPS de los contenidos elementales, (B) micrografía de electrones retrodispersados y (C) tabla de contenido elemental de la muestra mineral.

La Figura 4 presenta las micrografías de una muestra de roca montada en resina epóxica y pulida para su observación en un microscopio óptico digital. La imagen obtenida empleando luz lateral se presenta en la figura 4 (a) donde se observan tres tonalidades donde las partes traslucidas corresponden a la matriz de óxido de silicio, las partes con brillo metálico a partículas de pirita (py) y los tonos rojizos a óxidos de hierro. La figura 4 (b) muestra fue obtenida empleando luz coaxial permitiendo observar tonalidades grisáceas correspondientes a magnetita (mt), color crema correspondiente a la pirita, mientras que la matriz de cuarzo es corresponde a la sección general gris oscuro-negro. De manera adicional se observan inclusiones de calcopirita (cp) identificables por un color amarillo oscuro, no teniendo un contenido significativo de ellas atribuido a su posible inclusión por atrapamiento de agua sulfurada durante la formación del yacimiento.

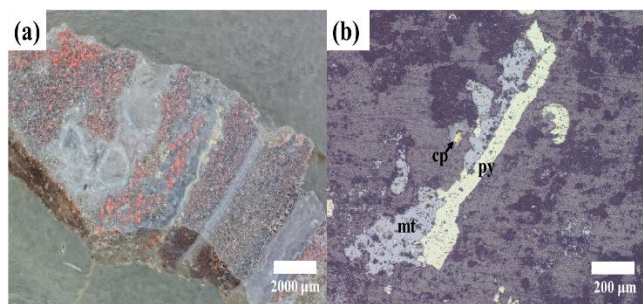


Figura 4: (a) Micrografía de superficie pulida a 20x usando iluminación lateral y (b) Micrografía de superficie pulida a 200x usando iluminación coaxial

Se realizó análisis elemental por medio de la técnica LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) en los polvos molidos y se llevó a cabo en un total de 75 puntos diferentes. Se realizó un promedio del contenido elemental de los puntos analizados, el cual se presenta en la tabla 2. Se determina que la roca tiene un 15% de hierro distribuido entre las dos fases minerales detectadas en DRX (pirita y magnetita). El contenido de hierro es característico de este tipo de yacimientos. Estos resultados fueron corroborados mediante una técnica de colorimetría digestando los polvos minerales y utilizando un UV-Vis, dando un 15.15 % en peso de hierro.

Tabla 2: Contenido elemental en porcentaje en peso (wt.%) en la roca de hierro bandeado

Si (wt %)	O (wt %)	S (wt %)	Fe (wt %)
32.23	29.33	22.11	15.14

La Figura 5 presenta la recuperación de mineral de hierro en porcentaje en peso. Para las partículas de tamaño grueso (mayor a 500 μm) se observa una baja recuperación debido a que las partículas de magnetita no están completamente liberadas del mineral de ganga. En los BIFs, la magnetita suele estar finamente diseminada en bandas de sílice, por lo que la fragmentación insuficiente impide una buena separación

Para las partículas con tamaño intermedio (74–53 μm) se alcanza el máximo de recuperación. Este es el rango óptimo donde la liberación de magnetita es suficiente y el tamaño permite una separación eficiente mediante métodos de separación magnética. Para tamaños inferiores a los mencionados la recuperación disminuye considerablemente, lo cual se puede deber a que las partículas finas interfieren con la separación magnética (por ejemplo, por atrapamiento en burbujas), o a una mayor contaminación con ganga finamente molida, lo cual dificulta una recuperación selectiva.

La Tabla 3 presenta los valores de recuperación promedio en porcentaje en peso de las 3 pruebas realizadas para cada rango de tamaño de partícula. De manera general se puede observar una desviación de ±3% en peso, siendo reproducibles las pruebas. La máxima recuperación obtenida es de alrededor del 34% en un tamaño de partícula en el rango de 74-53 μm (malla -270/+325). Estos valores de recuperación resultan congruentes con los reportados por el gobierno de Australia para yacimientos de BIF con minerales magnéticos de baja ley (15-25%). En el reporte de la región de Formación de

Hierro de Braemar (Braemar Iron Formation) (SA, Australia) se reporta una ley de cabeza de 15% de Fe y una DTR (recuperación por medio de tubo Davis en porcentaje en peso) de 15-25% (Australia, n.d.). Para la región de Mt Victor, Australia, se realizaron estudios preliminares de recuperación por medio de tubo Davis de distintos barrenos tomados a lo largo del proyecto determinando una recuperación de al rededor del 23.5% de mineral magnético (Davis Tube Recovery Results Braemar Iron Formation ‘ Mt Victor ’ Project - Curnamona, 2013). El proyecto minero australiano Lodestone Mines Olary Flats de igual manera reporta valores de DTR en el rango de 14-22% para leyes cabeza de 14.5-22% de Fe (Lodestone Mines, n.d.). Las recuperaciones obtenidas para el presente trabajo para el tamaño de 74–53 μm resultan, en general, superiores a las presentadas en los reportes antes mencionados, especialmente aquellas por debajo de la malla 150 (~104) por lo cual resulta beneficiosa la reducción de las partículas de mineral para incrementar el grado de liberación de la magnetita. Una vez dicho lo anterior se siguen presentando limitaciones cuando se emplean rutas de procesamiento tradicionales, siendo necesarias operaciones complementarias para incrementar la recuperación del hierro contenido en las especies no magnéticas. Especialmente el enriquecimiento de especies magnéticas por tostación, en la cual los sulfuros de hierro contenidos (pirita) se oxidan en minerales con propiedades magnéticas está siendo explorado ampliamente en la actualidad (Nunna et al., 2021).

Tabla 3: Porcentaje de recuperación en peso (%wt.) de magnetita en función del tamaño de partícula

Malla	Recuperación (%wt.)
+100	10.58±2
-100/+150	16.98±3
-150/+200	25.43±3
-200/+270	29.07±2
-270/+325	34.54±1
-325/400	27.38±2
-400	28.81±2

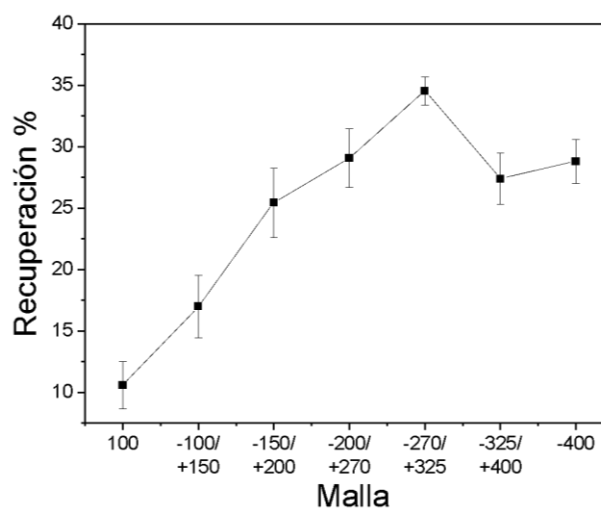


Figura 5: Recuperación de magnetita en porcentaje en peso en función del tamaño de partícula.

#### 4. Conclusiones

Por medio de la caracterización mineralógica de la muestra obtenida de la región de Durango, México, se determinó que es perteneciente a un yacimiento sedimentario tipo BIF. Los yacimientos tipo BIF con bajas leyes de hierro, alrededor del 15 %, en la mayoría de las ocasiones no se utilizan como fuente primaria para el beneficio de hierro. El estudio de la recuperación magnética por medio de tubo Davis en porcentaje en peso en función del tamaño de partícula muestra un incremento secuencial hasta alcanzar el máximo valor (34%) en tamaño de entre 74-53  $\mu\text{m}$  siendo mayores a las reportadas para minerales con leyes similares a la estudiada. Esta granulometría resulta óptima ya que (generalmente) es la que se trabaja para procesos de flotación, por lo cual la recuperación de magnetita se puede llevar en un paso intermedio antes del proceso hidrometalúrgico para optimizar la recuperación del hierro en este tipo de minerales. A pesar del incremento en porcentaje de recuperación en función del tamaño de partícula resulta evidente, y en concordancia con estudios actuales, que para mejorar la recuperación por medios magnéticos de minerales de Fe de baja ley se deben recurrir a nuevos procesos como lo puede ser la tostación. Un estudio complementario al presentado en este trabajo puede ser realizado con la finalidad de analizar el impacto ambiental/económico/viabilidad económica, para el enriquecimiento de mineral magnético en las muestras minerales, sin embargo, esto sale del alcance del presente trabajo.

#### Referencias

- Aftabi, A., Atapour, H., Mohseni, S., & Babaki, A. (2021). Geochemical discrimination among different types of banded iron formations (BIFs): A comparative review. *Ore Geology Reviews*, 136(September 2020). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104244>
- Australia, G. of S. (n.d.). *Energy and mining*. <https://www.energymining.sa.gov.au/industry/minerals-and-mining/mineral-commodities/iron-ore>
- Davis Tube Recovery Results Braemar Iron Formation ' Mt Victor ' Project - Curnamona (Issue August, pp. 1–3). (2013).
- França, J. R. O., Barrios, G. K. P., Turrer, H. D. G., & Tavares, L. M. (2020). Comminution and liberation response of iron ore types in a low-grade deposit. *Minerals Engineering*, 158(May), 106590. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106590>
- Lodestone mines. (n.d.). <https://www.lodestonemines.com/resources-and-reserves>
- Gunna, V., Hapugoda, S., Pownceby, M. I., & Sparrow, G. J. (2021). Beneficiation of low-grade, goethite-rich iron ore using microwave-assisted magnetizing roasting. *Minerals Engineering*, 166, 106826. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106826>
- Roy, S. K., Nayak, D., & Rath, S. S. (2020). A review on the enrichment of iron values of low-grade Iron ore resources using reduction roasting-magnetic separation. *Powder Technology*, 367, 796–808. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.047>
- Tripathy, A., Bagchi, S., Rao, D. S., Nayak, B. K., Rout, P. K., & Biswal, S. K. (2018). Recovery of magnetite from low grade banded magnetite quartzite (BMQ) ore. *Metallurgical Research & Technology*, 115(3), 302. <https://doi.org/10.1051/metal/2017101>
- Wang, Q., Li, Y., Li, H., Hou, K., & Zhang, Z. (2024). Paleoproterozoic hydrothermal overprinting over Neoproterozoic banded iron formation produced high-grade iron ores in the giant Gongchangling deposit of North China: Evidence from O–S–B isotopes. *Ore Geology Reviews*, 165(26), 105911. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105911>