

UNA REVISIÓN GENERAL DEL BALANCE DE MASA EN LA SEPARACIÓN DE CARBÓN ORGÁNICO CONTENIDO EN MINERALES TIPO SULFUROS

*A GENERAL REVIEW OF MASS BALANCE IN THE SEPARATION OF COAL CONTAINED IN
SULFIDE-TYPE MINERALS*

MARITZA A. VALADEZ-
CASTELLANOS¹

FELIPE LÓPEZ-SAUCEDO²

FRANCICO R. CARRILLO-
PEDROZA¹

RAMÓN Y. BATISTA-CRUZ²

JOSÉ A. BATISTA-RODRÍGUEZ²

YURI ALMAGUER-CARMENATRES²

RESUMEN

Los minerales tipo sulfuros contienen cantidades significativas de minerales que carecen de valor económico y que se reconocen como minerales ganga. La ganga se clasifica como sulfurosa y no sulfurosa, en este último grupo la materia orgánica ha tomado gran relevancia porque interfiere negativamente en la recuperación de los sulfuros de Pb, Zn y Cu. Este artículo proporciona una revisión bibliográfica que demuestra los retos que enfrenta la industria minera en la separación de carbono orgánico contenido en minerales tipo sulfuros. El objetivo del trabajo fue analizar el balance de masa del carbono orgánico y los metales de interés para destacar la importancia del balance de masa. Tres casos de estudio fueron seleccionados para ilustrar la sensibilidad de los datos metalúrgicos y su impacto en la recuperación y calidad del producto. La información se procesó a través de un algoritmo de reconciliación de datos para analizar el balance de masa del carbono orgánico y los metales de interés. Los resultados demostraron que la comparación entre los datos originales y los datos reconciliados permiten dimensionar la precisión del balance de masa, asimismo se revela que algunas prácticas de ajuste comunes pueden conducir a que las variables del proceso pierdan sentido físico.

Palabras clave: flotación de sulfuros; minerales ganga; materia carbonosa; balance de masa; reconciliación de datos.

1. Facultad de Metalurgia,
Unidad Norte, UAdeC.

2. Escuela Superior de
Ingeniería "Lic. Adolfo López
Mateos", Unidad Norte, UAdeC.

Correspondencia
mvaladez@uadec.edu.mx

Recepción de artículo
8 abril de 2024.

Artículo aceptado
6 de junio de 2024.



CienciAcierta

ABSTRACT

Sulfide-type ores contain significant quantities of minerals that have no economic value and are recognized as gangue minerals. The gangue is classified as sulfide and non-sulfide, in the latter group organic matter has taken great relevance because it interferes negatively in the recovery of Pb, Zn and Cu sulfides. This article provides a literature review that demonstrates the challenges faced by the mining industry in the separation of organic carbon contained in sulfide-type ores. The objective of the paper was to analyze the mass balance of organic carbon and metals of interest to highlight the importance of mass balance. Three case studies were selected to illustrate the sensitivity of the metallurgical data and its impact on recovery and product quality. The information was processed through a data reconciliation algorithm to analyze the mass balance of organic carbon and metals of interest. The results showed that the comparison between the original data and the reconciled data allows sizing the accuracy of the mass balance, also revealing that some common fitting practices can lead to process variables becoming physically meaningless.

Keywords: *flotation of sulfides; gangue minerals; carbonaceous matter; mass balancing; data reconciliation.*

INTRODUCCIÓN

Gran parte de las reservas de minerales metálicos se encuentran en forma de sulfuros, que son fuente importante para la obtención de metales no ferrosos, tal como: Cu, Pb, Zn, Mo, Co, Ni, Ag, entre otros. Al respecto, se reconoce que la producción de metales como el Pb, Zn, Cu, etc. es compleja y consta de varias etapas: involucra la extracción del mineral, trituración, molienda, concentración, fundición, refinación y gestión de residuos (Izydorczyk, y col., 2021). En particular, la etapa de concentración de minerales permite producir el concentrado de los metales de interés en los estándares



requeridos para la fundición. Uno de los procesos de separación más utilizados en la industria minero-metalúrgica es la flotación de espuma. Este proceso permite separar los minerales a través de la diferencia en la hidrofobicidad de los minerales de interés y la ganga-mineral.

Generalmente, los sulfuros de Pb, Zn y Cu están estrechamente asociados con otros minerales ganga en el mismo depósito, como pirita, cuarzo, calcita, dolomita, entre otros. Sin embargo, en los últimos años se ha reconocido la existencia de materia carbonosa en depósitos de Zn-Pb alojado en los sedimentos (e.g., depósitos tipo Mississippi-Valley), lo cual se reportan como un fenómeno común (Huang y col., 2021; Cordeiro y col., 2018).

Por ejemplo, Pan y col. (2022) indican que, durante la flotación primaria de sulfuros, las partículas de la materia carbonosa en suspensión pueden adsorber cantidades significativas de reactivos de flotación (e.g., colector) e influir en la estabilidad de la espuma, lo que tiene un efecto adverso en la recuperación y calidad del concentrado de plomo y zinc.

En la práctica, cuando el material carbonoso aparece en altas cantidades ($< 2\%$) es necesario establecer una etapa previa de separación, en la cual se favorezca la segregación de la materia carbonosa. En contraste, cuando aparece en pequeñas cantidades es posible deprimirlo empleando polímeros naturales como almidón, dextrina o carboximetilcelulosa (Foszcz y Drzymala, 2011). Por lo tanto, cuando el contenido de materia carbonosa es significativo, el reto para el proceso de flotación es muy grande.

Actualmente, las experiencias en la separación de materiales carbonosos en la flotación de minerales Pb-Zn son limitadas en la literatura, así como la información sobre el rendimiento metalúrgico de los procesos que se han utilizado. Lo cual despierta el interés por analizar las variables críticas, por ejemplo, en este caso la concentración de carbono orgánico (C_{Org}) y su distribución en las principales corrientes del proceso (i.e., alimentación, concentrado y colas). Al



respecto, la literatura especializada sugiere la aplicación métodos de reconciliación de datos en exceso porque favorece:

- 1) la identificación de discrepancias y errores en los datos.
- 2) la confianza en el balance de masa, es decir, que los datos cumplan con las restricciones del modelo de balanza de masa.
- 3) la aplicación de medidas correctivas en el proceso para evitar pérdidas significativas (Vasebi y Hodouin, 2014; Behnami y col., 2019).

Los métodos de reconciliación de datos en exceso se basan en ecuaciones de conservación de masa y energía en estado estacionario (Vasebi y Hodouin, 2014). Su aplicación fomenta las buenas prácticas en la toma de decisiones para fortalecer la producción, incrementar la calidad o disminuir los costos operativos. En el contexto anterior, el presente trabajo propone el desarrollo de una revisión bibliográfica que permita demostrar los retos que enfrenta la industria del procesamiento de minerales en la separación de carbono orgánico contenido en minerales tipo sulfuros. Esta revisión pretende ser interesante, concisa y fácil de comprender, por lo cual se seleccionaron tres casos de estudio. Para la selección, los autores priorizaron el análisis de procesos metalúrgicos de competencia industrial que permitan ilustrar el impacto de la reconciliación de datos sobre el balance de masa del proceso. Por lo tanto, la revisión bibliográfica se realizó con el objetivo de analizar el balance de masa del carbono orgánico y de los metales de interés (e.g, Pb, Zn y Cu) a través de los datos de la composición química y/o mineralógica de las corrientes de alimentación, concentrado y colas del proceso.

El objetivo del presente trabajo permite destacar la importancia del fundamento de conservación de masa. Al incorporar la reconciliación de datos en exceso, este estudio apunta a generar una argumentación sólida que contribuya al análisis crítico del balance de



masa, para fortalecer el conocimiento de la separación de C_{Org} presente en la ganga de sulfuros base metal.

MATERIALES Y MÉTODOS

La revisión del balance de masa en la separación selectiva de carbón orgánico contenido en minerales tipo sulfuros (e.g., PbS , ZnS , $CuFeS_2$, etc.), consistió en la selección de bases de datos con información de las leyes de alimentación (f), concentrado (c) y colas (t) del proceso de separación (e.g., flotación, medio denso, separación por gravedad, etc.).

Cada caso de estudio describe la problemática, la composición mineralógica, la descripción del proceso de separación utilizado y la concentración del metal de interés (eg., Pb , Zn , Cu , etc.) en las corrientes de f , c y t .

Para evaluar el balance de masa se propone la aplicación del método de reconciliación de datos en exceso propuesto por (Wills y Napier, 2006), este método se aplica principalmente en el procesamiento de minerales y tiene como objetivo analizar la contabilidad metalúrgica. En particular, se enfoca en el método de minimización de la suma de cuadrados de la clausura residual, que se define por la ecuación 1. Donde f_k , c_k y t_k son las leyes de alimentación, concentrado y colas de los componentes.

$$\hat{C} = \frac{\sum_{k=1}^n (f_k - t_k)(c_k - t_k)}{\sum_{k=1}^n (c_k - t_k)^2}$$

(1)

El propósito de este método es estimar un valor de C que minimice la suma de los cuadrados de los errores de cierre. Si C representa la fracción en masa que se deriva por la corriente de concentrado, $\hat{C}$



representa el ajuste necesario para estimar el valor de C , como se esquematiza en la Figura 1.

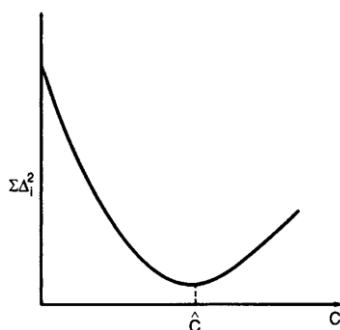


Figura 1. Suma de cuadrados vs. valores de $\hat{C}$ (Wills y Napier, 2006).

Posteriormente se calcula r_k , que representa el residuo en la ecuación de cierre generado por los errores experimentales en las mediciones del componente k . Esta ecuación es válida para $k = 1$, y donde f_k representa el valor del componente k en la corriente de alimentación; c_k representa el valor del componente k en la corriente de concentrado; t_k representa el componente k en la corriente de colas; r_k es el residual en la ecuación de cierre generada por errores experimentales en las mediciones del componente k .

$$r_k = f_k - \hat{C}c_k - (1 - \hat{C})t_k$$

(2)

Este problema de minimización convenientemente se puede resolver igualando a cero la ecuación 2 y aplicando multiplicadores de Lagrangian, a través de los cuales se define el valor de h y los valores de f_{ka} , c_{ka} y t_{ka} que representan el ajuste mínimo de los componentes en la alimentación, concentrado y colas:

$$h = 1 + \hat{C}^2 + (1 - \hat{C})^2$$

(3)



$$f_{ka} = \frac{r_k}{h}$$

(4)

$$c_{ka} = \frac{-\hat{C}r_k}{h}$$

(5)

$$t_{ka} = \frac{-(1-\hat{C})r_k}{h}$$

(6)

La diferencia entre los valores experimentales y la magnitud que se obtienen de las ecuaciones 4, 5 y 6 representa el valor reconciliado para cada corriente (i.e., f , c y t). Finalmente, para evaluar el balance de masa se aplican las ecuaciones 7 y 8.

$$R = \frac{(f - t)}{(c - t)} \times 100$$

(7)

$$R_i = \frac{c(f - t)}{f(c - t)} \times 100$$

(8)

Donde f , c y t , es la ley en las corrientes de alimentación, concentrado y colas, respectivamente.

Los criterios que se aplicaron para evaluar el balance de masa son los siguientes:



1. Calcular la recuperación de sólidos (R). Si la R es de la misma magnitud para todos los elementos entonces se describe el balance de masa.
2. Cuando la R es diferente para todos los elementos, entonces se aplica el método de reconciliación de datos en exceso y posteriormente se describe el balance de masa. Esto significa que los datos presentan discrepancias o pérdida de información que deben ser investigadas. En este caso, se aplica el método de reconciliación de datos en exceso para identificar y dimensionar los errores experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CASO DE ESTUDIO 1

El caso de estudio 1 se obtuvo de la revisión de (Gredelj y col., 2009) quienes investigaron la flotación selectiva de carbono orgánico en el circuito de flotación de Pb-Zn de la mina Century, Zinifex, Australia. La problemática de la investigación es la presencia de carbón orgánico contenido en la ganga del mineral, el cual disminuye la recuperación y contamina el concentrado. La composición química y mineralógica se determinó con técnicas de espectrometría de masas (e.g., fluorescencia de rayos-x, absorción atómica, ICP, etc.) como se describe en la Tabla 1.

Tabla1.

Leyes de alimentación al circuito de flotación de la planta.

C (%)	Zn (%)	Pb (%)	SiO ₂ (%)
3.6	12	2.16	48.3

Para enfrentar esta problemática Gredelj y col. (2009) definieron una etapa de separación previa a la flotación de minerales de Pb y Zn para segregar el carbono orgánico, a este proceso se le reconoce como pre-flotación. Los resultados experimentales de la pre-flotación



se muestran en la Tabla 2, se hace la aclaración que los datos disponibles solamente incluyen el análisis del Zn. El C_{Tot} se describe como la suma del contenido de carbono inorgánico (e.g., carbonatos) y orgánico (C_{Org}).

Tabla 2.
Resultados del balance de masa del caso de estudio 1.

Datos originales				Datos reconciliados		
Corriente	C_{Tot} (%)	C_{Org} (%)	Zn (%)	C_{Tot} (%)	C_{Org} (%)	Zn (%)
<i>f</i>	3.23	2.47	11.97	3.22	2.48	11.97
<i>c</i>	11.8	11.8	11.65	11.8	11.8	11.65
<i>t</i>	2.9	2.15	11.98	2.91	2.14	11.98
<i>R</i>	3.71	3.32	3.03	3.5	3.5	3.5
<i>Ri</i>	13.55	15.84	2.95	12.81	16.64	3.4

El balance de masa indicó que la recuperación de sólidos (*R*) varió de 3.03 a 3.71 %, por lo tanto, se aplicó el método de reconciliación de datos en exceso, los resultados indicaron que la *R* se normalizó en 3.5 %. Este resultado permite identificar que la recuperación de carbono orgánico en la pre-flotación es de 16.64 %. Esto significa que gran parte del C_{Org} aún permanece en el mineral de Pb-Zn. Otra observación es que, en la propia pre-flotación se recupera un porcentaje de la masa de Zn, particularmente 3.40 %, esta masa de Zn forma parte del rechazo junto con el C_{Org} .

Gredelj y col. (2009) concluyen que la baja recuperación de C_{Org} se debió a la oxidación de las partículas de materia carbonoso, lo cual influye de forma negativa en su flotabilidad. Por otra parte, la recuperación de zinc en la pre-flotación sigue el comportamiento de la recuperación de C_{Org} , debido probablemente a la presencia de partículas compuestas de esfalerita y material carbonoso.



CASO DE ESTUDIO 2

El caso de estudio 2 se obtuvo de la revisión de Konieczny y col., (2013), en este trabajo se evaluó la separación de carbono orgánico (C_{Org}) presente en un mineral de cobre (Cu) por medio de pre-flotación. El estudio de Konieczny y col. (2013) se desarrolló en la compañía minera KGHM Polska Miedź, Lubín, Polonia.

La problemática de la investigación se centra en la presencia de materia carbonosa en el mineral de alimentación, el cual tiene un efecto negativo en el proceso de flotación y, por consecuencia, en la recuperación y la calidad del concentrado de Cu. Para enfrentar esta problemática los autores establecieron dos esquemas de reactivos químicos, los cuales se describen en la Tabla 3, en la misma tabla se presenta la composición química del mineral, en particular el contenido de Cu y C_{Org} .

Tabla 3.

*Esquemas de reactivos químicos y composición química del mineral.
Colector Xantato; Espumante Corflot.*

Esquema	Acondicionamiento químico		Composición química	
	Colector (g/mg)	Espumante (g/mg)	Cu (%)	C_{Org} (%)
A	60	40	2.06	1.72
B	0	80	1.90	1.70

Los resultados experimentales de la pre-flotación se muestran en las tablas 4 y 5 que corresponden a los resultados del esquema de reactivos químicos A y B, respectivamente. El balance de masa en la Tabla 4 indicó que la recuperación de sólidos (R) varió de 3.11 a 3.50 %, por lo tanto, se aplicó el método de reconciliación de datos en exceso, los resultados demostraron que la R se normalizó a 3.31 %. Este resultado permitió identificar que la recuperación de C_{Org} en la pre-flotación es de 22.33 % bajo el esquema de acondicionamiento químico A.



Tabla 4.
Resultados del balance de masa
de la pre-flotación, esquema de reactivos A.

Corriente	Datos originales		Datos reconciliados	
	Cu (%)	Corg (%)	Cu (%)	Corg (%)
<i>f</i>	2.06	1.72	2.05	1.73
<i>c</i>	11.98	11.69	11.98	11.69
<i>t</i>	1.7	1.4	1.71	1.39
<i>R</i>	3.5	3.11	3.31	3.31
<i>Ri</i>	20.37	21.14	19.32	22.33

El balance de masa de la Tabla 5 reveló que la recuperación de sólidos (*R*) varió de 1.36 a 3.91 %, por lo tanto, se empleó el método de reconciliación de datos en exceso, los resultados demostraron que *R* se normalizó a 2.81 %. El análisis de resultados reportado por Konieczny y col. (2013) indicó que la pre-flotación se favorece con el esquema de acondicionamiento químico B. Este esquema permitió reducir el contenido de carbón orgánico en la alimentación del mineral de 1.63 a 1.28 %; mientras, los resultados del esquema A indicaron que, el contenido de C_{Org} disminuyó de 1.73 a 1.34 %. Asimismo, se reconoce que la aplicación del esquema B permitió una pérdida mínima de Cu del 16.15 % en la pre-flotación, significativamente menor en comparación con el esquema A, de 19.32 %.

Tabla 5.
Resultados del balance de masa
de la pre-flotación, esquema de reactivos B.

Corriente	Datos originales		Datos reconciliados	
	Cu (%)	Corg (%)	Cu (%)	Corg (%)
<i>f</i>	21.906	1.7	1.97	1.64
<i>c</i>	11.32	12.28	11.32	12.28
<i>t</i>	1.77	1.27	1.7	1.33
<i>R</i>	1.36	3.91	2.81	2.81
<i>Ri</i>	8.11	28.21	16.15	21.09



Los autores concluyen que, el problema del carbono orgánico es complejo y que influye en la efectividad económico-tecnológica de una planta de procesamiento de minerales. Por esta razón, este tema continúa siendo objeto de estudio.

CASO DE ESTUDIO 3

El caso de estudio 3 se obtuvo de la revisión de Tabatabaei y col. (2014) quienes evaluaron el efecto de los minerales ganga no sulfurosos (NSG) en la flotación de sulfuros, minerales tipo Carlin. Este tipo de minerales se distingue por la presencia de oro, razón por la cual se merece una atención particular. La problemática de la investigación se relaciona con el papel de los NSG especialmente la materia carbonosa y las arcillas, los cuales tienen un efecto adverso en la flotación de sulfuros y por consecuencia en la recuperación de oro. El estudio de Tabatabaei y col. (2014) se desarrolló en la compañía transnacional minera Barrick Gold Corporation, sede Australia. En la Tabla 6 se muestra la composición química y mineralógica del mineral de estudio. Las acciones experimentales que se proponen es procesar el mineral en dos etapas; separación por gravedad y flotación de espuma.

Tabla 6.
Composición química del caso de estudio 3.

S ²⁻ (%)	C _{Org} (%)	(CO ₃) ²⁻ (%)	SiO ₂ (%)	Al (%)
2.50	2.90	4.70	49.10	1.70

La separación por gravedad (en un sistema Mozley) se utilizó para separar el C_{Org} y las pruebas de flotación se orientaron para analizar la recuperación de sulfuros (S²⁻). Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 7.



Tabla 7.
Resultados del balance de masa
de la separación por gravedad.

Datos originales						Datos reconciliados				
Corriente	S ²⁻	C _{Org}	(CO ₃) ²⁻	SiO ₂	Al	S ²⁻	C _{Org}	(CO ₃) ²⁻	SiO ₂	Al
f	2.50	2.90	4.70	49.10	1.70	2.36	3.06	4.76	48.26	1.82
c	25.00	1.50	5.00	43.30	0.70	25.01	1.49	5.00	43.34	0.69
t	1.10	3.30	4.80	47.70	2.00	1.23	3.14	4.75	48.50	1.88
R	5.86	22.22	-50.00	-31.82	23.08	4.77	4.77	4.77	4.77	4.77
Ri	58.58	11.49	-53.19	-28.06	9.50	50.44	2.32	5.01	4.28	1.81

El balance de masa indicó que la recuperación de sólidos (R) varió entre -50 y 23.08 %, por lo tanto, se aplicó el método de reconciliación de datos en exceso, los resultados indicaron que la R se normalizó en 4.77 %. Este resultado permitió establecer las pruebas de flotación, en las cuales se varió la composición del mineral, ver Tabla 8; la prueba 1 y 5 corresponde al material de la corriente de concentrado y colas respectivamente de la Tabla 7 (datos reconciliados). En la misma tabla se presentan los resultados de las pruebas de flotación, que se describen en términos de la recuperación de sulfuros (R_s^{2-}).

Tabla 8.
Resultados de las pruebas de flotación
(Tabatabaei y col., 2014).

Prueba	S ²⁻ (%)	C _{Org} (%)	(CO ₃) ²⁻ (%)	SiO ₂ (%)	Al (%)	R _s ²⁻ (%)
1	25.00	1.49	4.99	43.34	0.69	89.87
5	1.23	3.14	4.74	48.50	1.88	31.33



Los resultados demuestran claramente que un incremento en la proporción de C_{Org} en la alimentación a la flotación tiene un gran efecto adverso en la recuperación de sulfuros. Por ejemplo, un incremento de 1.65 % en la proporción de C_{Org} en la alimentación de flotación da como resultado una disminución significativa en la recuperación de sulfuros (disminuye en 58.54 %). Los autores también complementan que los $(CO_3)^{2-}$ y SiO_2 no tienen un efecto directo en la recuperación de sulfuros. Tabatabaei y col. (2014) concluyen que los resultados proporcionan el contexto y la dirección para realizar estudios fundamentales orientados a la separación de la materia carbonosa, utilizando métodos de separación por gravedad.

DISCUSIÓN

Los resultados demostraron que la separación de carbón orgánico (C_{Org}) es un reto importante en la flotación de sulfuros de Pb, Zn y Cu (Pan y col., 2022). Asimismo, los resultados representan una visión general de las diversas estrategias que se han experimentado con el objetivo de disminuir el contenido de C_{Org} en minerales tipo sulfuros (Konieczny y col., 2013; Godirilwe, y col., 2021; Gupta, 2017).

En el presente trabajo se analizaron datos reportados en la literatura y se presentaron en forma de tres casos de estudio. Los datos analizados son mediciones que se obtuvieron de procesos industriales. Esto significa que la adquisición de los datos involucra un control riguroso de las variables que controlan el proceso. Sin embargo, la variación inherente del mismo (e.g., cambios en la ley de alimentación y flujo másico en la misma, etc.) y la variabilidad propia de los sistemas de control/medición propician datos inconsistentes que pueden afectar el análisis del balance de masa. Por lo tanto, estos problemas pueden reducir en gran medida el rendimiento y la rentabilidad del proceso de separación. En el contexto anterior los autores del presente trabajo utilizaron este



enfoque para analizar particularmente el balance de masa de la separación de C_{org} presente en minerales tipo sulfuros. Para enfrentar este reto se aplicó la reconciliación de datos en exceso, la cual se basa en ecuaciones de conservación de masa y energía (en estado estacionario).

Esta técnica de análisis de datos es aplicada con mucha frecuencia en la industria del procesamiento de minerales a través de softwares como Bilmat®, Matbal®, JKSim®, etc. En el presente trabajo se aplicó el método de minimización de suma de cuadrados de la clausura residual que se describe en (Wills y Napier, 2006). Los resultados indicaron que la diferencia, relativamente pequeña, entre la contabilidad metalúrgica del C_{org} para los datos reconciliados y los medidos permite desarrollar un balance de masa con un enfoque confiable, tal y como se observó en el caso de estudio 1 y 3. Sin embargo, en el caso de estudio 2 se encontró que la diferencia entre los datos de C_{org} medidos y los reconciliados es significativa, esto demuestra que, el método no está comprometido a ofrecer resultados inmediatamente satisfactorios. Sino más bien, el método proporciona argumentos significativamente congruentes para realizar un análisis crítico del balance de masa. Un tercer caso de estudio que describió la operación de un circuito de separación por gravedad reveló que el estado estacionario es una condición fundamental en la aplicación de la reconciliación de datos, lo cual mejora la precisión del balance de masa.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló una revisión general sobre la separación de carbón orgánico contenido en minerales tipo sulfuros. La revisión muestra el impacto negativo del carbón orgánico en la flotación selectiva de sulfuros de Pb, Zn y Cu. Asimismo, la revisión ofrece una visión general de las diversas estrategias que se han reportado en la literatura para enfrentar este reto.



A través del análisis de tres casos de estudio se demostró la importancia del balance de masa del carbono orgánico en procesos metalúrgicos industriales. La precisión del balance de masa se analizó con la aplicación de un modelo fundamental de reconciliación de datos en exceso en estado estacionario. El método de reconciliación utilizado permitió observar el ajuste de los datos para satisfacer las condiciones del modelo de balance de masa y proporcionó estimaciones de recuperación de carbón orgánico independientemente del proceso metalúrgico utilizado.

No obstante, los resultados de este estudio sugieren profundizar en los fundamentos del balance de masa para analizar otros aspectos importantes como; la optimización técnica y económica de los procesos metalúrgicos utilizados para separar el carbón orgánico en minerales tipo sulfuros.

REFERENCIAS

- Behnami, A., Zoroufchi Benis, K., Shakerkhatibi, M., Fatehifar, E., Derafshi, S., & Chavoshbashi, M. M. (2019). Integrating data reconciliation into material flow cost accounting: The case of a petrochemical wastewater treatment plant. *Journal of Cleaner Production*, 218: 616–628.
- Cordeiro, P. F., Oliveira, C. G., Paniago, L. N., Romagna, G., & Santos, R. V. (2018). The carbonate-hosted MVT Morro Agudo Zn-Pb deposit, central Brazil. *Ore Geology Reviews*, 101: 437-452.
- Foszcz, D., & Drzymala, J. (2011). Differentiation of organic carbon, copper and other metals contents by segregating flotation of final Polish industrial copper concentrates in the presence of dextrin. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 47.
- Godirilwe, L. L., Magwaneng, R. S., Sagami, R., Haga, K., Batnasan, A., Aoki, S., Kawasaki, T., Matsuoka, H., Mitsuhashi, K., Kawata, M., & Shibayama, A. (2021). Extraction of copper from complex carbonaceous sulfide ore by direct high-pressure leaching. *Minerals Engineering*, 173(107181): 107181.



- Gredelj, S., Zanin, M., & Grano, S. R. (2009). Selective flotation of carbon in the Pb–Zn carbonaceous sulphide ores of Century Mine, Zinifex. *Minerals Engineering*, 22(3): 279-288.
- Gupta, N. (2017). Evaluation of graphite depressants in a poly-metallic sulfide flotation circuit. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(2): 285–292.
- Huang, Z., Wang, G., Li, N., Fu, Y., Lei, Q., & Mao, X. (2021). Genetic link between Mississippi Valley-Type (MVT) Zn-Pb mineralization and hydrocarbon accumulation in the Nanmushu, northern margin of Sichuan Basin, SW China. *Geochemistry*, 81(4): 125805.
- Izydorczyk, G., Mikula, K., Skrzypczak, D., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A., & Chojnacka, K. (2021). Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management. *Environmental Research*, 197: 111050.
- Konieczny, A., Pawlos, W., Krzeminska, M., Kaleta, R., & Kurzydło, P. (2013). Evaluation of organic carbon separation from copper ore by pre-flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49(1): 189-201.
- Pan, Z., Xiong, J., Cui, Y., Wei, Q., Jia, W., Zhang, Z., Jiao, F., & Qin, W. (2022). Effect mechanism of carbonaceous materials on the flotation separation of lead–zinc ore. *Separation and Purification Technology*, 294(121101): 121101.
- Tabatabaei, R. H., Nagaraj, D. R., Vianna, S. M. S. M., Napier-Munn, T. J., & Gorain, B. (2014). The effect of non-sulphide gangue minerals on the flotation of sulphide minerals from Carlin-type gold ores. *Minerals Engineering*, 60: 26–32.
- Vasebi, A., Poulin, É., & Hodouin, D. (2014). Selecting proper uncertainty model for steady-state data reconciliation – Application to mineral and metal processing industries. *Minerals Engineering*, 65: 130–144.
- Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2006). Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery (7a ed.). Butterworth-Heinemann.

