

Modelación de la distribución de tamaño de menas saprolíticas alimentadas al proceso Caron

Modeling the size distribution of saprolitic ores fed to Caron process

Hugo Javier Angulo-Palma^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-5012-0348>

Nerlan Manuel Guilarte-Rodríguez¹ <https://orcid.org/0009-0001-3033-404X>.

Ángel Legrá-Legrá¹ <https://orcid.org/0000-0002-4456-6546>

Mario Andrés Navarro-Consuegra² <https://orcid.org/0000-0002-9313-079X>

Carlos Hernández-Pedreira³ <https://orcid.org/0000-0003-2572-0891>

¹Centro de Investigaciones del Níquel, Moa, Holguín, Cuba

²Universidad de Moa, Holguín, Cuba

³Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Santiago De Cuba, Cuba

*Autor para correspondencia. Correo electrónico: hangulo@cil.moa.minem.cu

RESUMEN

En este estudio se determinó el modelo de distribución de tamaños de partícula que mejor caracteriza la composición granulométrica de las menas de saprolitas alimentadas al proceso Caron cubano. Se evaluaron tres muestras de serpentinas blandas y duras concernientes a los yacimientos de Punta Gorda, Camarioca Este y Yagrumaje Sur. Las principales fases mineralógicas de las muestras se identificaron por el método de difracción de rayos X en polvo. Se observó el predominio de las fases mineralógicas lizardita, clinocloro y clorita-serpentina en las diferentes muestras bajo estudio. La determinación de los parámetros de los modelos granulométricos y la evaluación de la calidad de su ajuste con técnicas estadísticas, permitió identificar que la función Swebrec es la que mejor describe la distribución de los tamaños de partículas experimentales de las muestras de serpentinas, con coeficientes de determinación superiores a 0,91 y errores residuales inferiores a 6,9%.



Palabras clave: distribución de tamaños de partículas; serpentinas blandas duras; proceso Caron.

ABSTRACT

In this study, the particle sizes distribution model that best characterizes the granulometric composition of saprolite ores fed to the Cuban Caron process was determined. Three samples of soft and hard streamers from the Punta Gorda, Camarioca Este and Yagrumaje Sur deposits were evaluated. The main mineralogical phases of the samples were identified by the X-ray powder diffraction method. The predominance of the mineralogical phases lizardite, clinochlore and chlorite-serpentine was observed in the different samples under study. The determination of the parameters of the granulometric models and the evaluation of the quality of their adjustment with statistical techniques, allowed us to identify that the Swebrec function is the one that best describes the distribution of the experimental particle sizes of the streamer samples, with determination coefficients higher than 0,91 and residual errors lower than 6,9%.

Keywords: particle sizes distribution; soft and hard saprolites; Caron process.

Recibido: 20/08/2023

Aceptado: 15/12/2023

Introducción

El agotamiento de las reservas sulfurosas con contenidos considerables de níquel (Ni) y cobalto (Co), ha obligado el uso alternativo de las menas lateríticas como fuente de materia prima en los diferentes procesos hidropirometalúrgicos; debido a que contiene el 72,2 % de los recursos niquelíferos disponibles en la superficie terrestre.⁽¹⁾

Una de las principales tecnologías que es capaz de extraer el Ni y el Co a partir de las menas lateríticas es el proceso Caron, comúnmente denominado tecnología carbonato-amoniaco.⁽²⁾

Específicamente en Cuba la entidad que actualmente utiliza la tecnología carbonato-amoniaco es la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECG),

la cual inicia sus operaciones a partir de 1987.⁽³⁾ La ECG se caracteriza por ser una entidad con un elevado consumo de energía, razón que ha justificado la ejecución de diversas investigaciones con el objetivo de garantizar el incremento de su rentabilidad.^(4,5)

Actualmente la ECG se encuentra en proceso de modernización de su esquema tecnológico para darle solución al elevado grado de agotamiento de la parte limonítica de las menas lateríticas cubanas, siendo una de las principales alternativas a tener en cuenta: la alimentación de menas lateríticas artificiales formuladas mediante las mezclas de las partes escombro y saprolita.⁽⁶⁾

Para la implementación de estas alternativas se requiere un riguroso control del proceso conminución, donde la distribución del tamaño de partícula (PSD) en los materiales que se alimentan resulta uno de los indicadores de calidad más importantes.⁽⁷⁾

Actualmente los principales modelos granulométricos que se utilizar para caracterizar los diferentes materiales son Gates–Gaudin–Schuhmann (GGS), Rosin–Rammler (RR) y la función Swebrec (SWEF).⁽⁸⁾

A pesar de los estudios desarrollados sobre la PSD en las menas lateríticas^(7,9), hasta la fecha no se reportan investigaciones en la que se analicen el comportamiento granulométrico de las menas saprolíticas de los principales yacimientos concebidos a la ECG. Atendiendo a estos elementos se propone esta investigación que tiene como objetivo determinar el modelo de distribución de tamaño que caracteriza la composición granulométrica de las menas saprolíticas que se alimentan al proceso Caron cubano.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en las instalaciones del Centro de Investigaciones del Níquel “Capitán Alberto Fernández Montes de Oca”. Los resultados se procesaron con la ayuda del software STATGRAPHICS Centurión XV y el Microsoft Excel.

Materiales

En la investigación se evaluaron seis tipos de saprolitas correspondientes a los principales yacimientos concesionados a la ECG que se alimentan con regularidad al proceso metalúrgico: Punta Gorda (PG), Camarioca Este (CE) y Yagrumaje Sur (YS). De cada yacimiento se analizaron muestras de serpentinas blandas (SB) y duras (SD) respectivamente. Las muestras de saprolitas quedaron constituidas con un tamaño máximo de partícula de 75 mm y de aproximadamente seis toneladas base seca, consideradas representativas y suficientes para ejecutar el programa de pruebas que se planificó.

Técnicas Analíticas

La principal técnica analítica que se utilizó fue la difracción de rayos X (DRX) para determinar las principales fases mineralógicas presentes en cada mena saprolítica bajo estudio.

Los difractogramas de DRX se realizaron por el método de polvo en un Difractómetro X'PERT³ de Panalytical con las siguientes condiciones: Barrido tipo Gonio en $[2\theta]$ registro angular desde 4,004 2 hasta 79,996 2 con distancia de paso en 2θ de 0,008 0 con radiación de Cu y filtro de níquel. La diferencia de potencial es de 40 kV y corriente de 30 mA. La calibración del equipo se chequea con patrón externo de silicio. El análisis cualitativo de las fases se realiza con la utilización del programa HighScore de Panalytical.

Equipos

1. Criba de 75 mm. Se utilizó para garantizar el tamaño máximo de partículas de las diferentes muestras de saprolitas, siendo su capacidad máxima de una tonelada.
2. Estufa. Se utilizó para garantizar el secado de cada muestra de serpentina. La marca de la estufa que se utilizó es MEMMERT, con una temperatura máxima de 250 °C y una capacidad de almacenamiento de mena de 100 a 200 kg.
3. Tamizadoras. Se usaron para lograr la separación de las fracciones granulométricas por vía seca y húmeda para los tamaños superiores e inferiores a 3,15 mm respectivamente. (Figura 1).

4. Trituradora de mandíbula. Se usó en la investigación una que posee una longitud en la quijada de 150 mm y una boca de descarga de 6,3 mm. Las principales dimensiones de la boca de alimentación son: ancho y largo de 55 y 75 mm respectivamente.

5. Molino de Bolas. El molino de bolas se utilizó para pulverizar, hasta que alcanzase el grado de fineza establecido por el proceso de caracterización mineralógica. Sus principales dimensiones son: diámetro y largo de 360 mm.

6. Balanza Analítica. La balanza analítica utilizada es de marca Radwag, con pesaje máximo de 10 Kg, error de $\pm 0,1$ gramos y corriente de 220 V.

7. Tamices de Serie Tyler. El juego de tamiz que se utilizó en la investigación se presenta en la tabla 1.

8. Cuarteadores. Para homogenizar y cuartear las muestras se utilizaron el de cruceta y el Johnson, comunmente denominado cuarteador de rifle, para pesos superiores e inferiores a 50 kg respectivamente.

Tabla 1- Juego de tamices seleccionado para el análisis granulométrico

N°	Tamaño (milímetros)						
1	75,00	4	10,00	7	1,70	10	0,15
2	50,00	5	6,30	8	0,50	11	0,075
3	20,00	6	4,00	9	0,25	12	0,045



Fig. 1- Tamizadoras para la caracterización granulométrica

Metodologías

Las metodologías que se utilizaron durante la investigación fueron:

1. Metodología para la preparación y toma de las menas saprolíticas.
2. Metodología para la caracterización granulométrica de las muestras de saprolitas mediante los modelos de GGS, RR y la función SWEF.

Metodología para la preparación y toma de las muestras de serpentinas

Cada muestra de saprolita se preparó de manera independiente. La preparación consistió en conformar una pila de cada una de las menas para realizar el proceso de prehomogenización mediante la utilización del método de formación de pilas cónicas sucesivas con un cargador frontal marca VOLVO modelo L-120. El proceso de prehomogenización se realizó en cinco pasos para lograr la segregación que experimenta los tamaños mayores de partículas y separar las rocas mayores de 150 mm. Las muestras prehomogenizadas se alimentaron a la sección de Preparación de Mineral de la Planta Piloto del CEDINIQ con el objetivo de realizar la toma de la muestra representativa de cada mena, alrededor de 70-170 kg, en flujo dinámico. A las muestras que se tomaron en flujo dinámico se le realizaron una caracterización granulométrica, luego del proceso de secado, con el objetivo de determinar el modelo granulométrico que mejor describe sus comportamientos.

Metodología para la evaluación del modelo granulométrico Gates-Gaudin-Schuhman

1. Determinar los porcentajes de las fracciones del peso de los tamaños retenidos en cada uno de los tamices bajo análisis mediante la expresión 1.

$$\%F_{\text{tamaño}} = \frac{m_R}{m_T} \times 100 \dots (1)$$

donde:

$\%F_{\text{tamaño}}$: es el porcentaje del peso de la fracción retenida en un tamiz,

m_R : es el peso del material retenido en un tamiz, g o kg.

m_T : es el peso de todo el material bajo análisis, g o kg.

2. Determinar los porcentajes de pasante (%P) y retenido (%R) acumulativo a partir de los valores de %F_{tamaño} para cada uno de los tamices bajo estudio.
3. Calcular los logaritmos naturales de cada porcentaje del pasante acumulativo, log (%P).
4. Graficar los resultados de los log (%P) en función de los logaritmos para cada tamaño de partícula correspondiente (log x).
5. Determinar los parámetros de modelo GGS y el coeficiente de determinación (R²) mediante el análisis de la línea recta que se obtuvo en el paso cuatro.
6. Calcular los %P mediante la utilización del modelo GGS propuesto.
7. Determinar el error residual que se obtiene al utilizar el modelo propuesto de GGS mediante la expresión 2.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\%P_{\text{modelo}} - \%P_{\text{experimental}})^2}{N-1}} \dots (2)$$

donde:

σ : es el porcentaje del error residual, %

$\%P_{\text{modelo}}$: es el porcentaje del pasante acumulativo que se determinó por el modelo granulométrico, %.

$\%P_{\text{experimental}}$: es el porcentaje del pasante acumulativo que se determinó al utilizar los datos experimentales, %.

N: es el número de datos, adimensional.

Metodología para la evaluación del modelo granulométrico Rosin-Rammler

1. Realizar los pasos 1 y 2 propuestos en la metodología para determinar el modelo granulométrico GGS.
2. Determinar el valor de A mediante la expresión 3.

$$A = \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{\%P}{100} \right) \right] \dots (3)$$

3. Graficar los resultados de A en función de los logaritmos neperianos para cada tamaño de partícula correspondiente ($\ln x$).
4. Determinar los parámetros de modelo RR y el coeficiente de determinación (R^2) mediante el análisis de la línea recta que se obtuvo en el paso tres.
5. Calcular los %P mediante la utilización del modelo RR propuesto.
6. Determinar el error residual que se obtiene al utilizar el modelo propuesto de RR mediante la expresión 2.

Metodología para la evaluación del modelo granulométrico de la función SWEBREC

1. Realizar los pasos 1 y 2 propuestos en la metodología para determinar el modelo granulométrico GGS.
2. Determinar los parámetros del modelo siguiendo las indicaciones de Quijano.⁽⁹⁾
3. Determinar el error residual que se obtiene al utilizar el modelo propuesto de la función SWEF mediante la expresión 2.

Resultados y discusión

Caracterización mineralógica de las muestras de serpentinas

En la figura 2 se relacionan las principales fases mineralógicas identificadas en las muestras. Aunque en todas las muestras los valores de concentración de aluminio son importantes, no se manifiesta claramente la fase de Gibbsita; lo que indica que dicho elemento se encuentra dentro de las estructuras de los silicatos o como compuestos amorfos.

Se identificaron como fases principales la lizardita, el clinocloro y la clorita-serpentina corroborando la presencia de altos contenidos de magnesio y silicio en las diferentes muestras. Resulta notable la baja y moderada presencia de cuarzo cristalino y la fase de hierro goethita respectivamente, mientras que la maghemita fue identificada en todas las muestras.

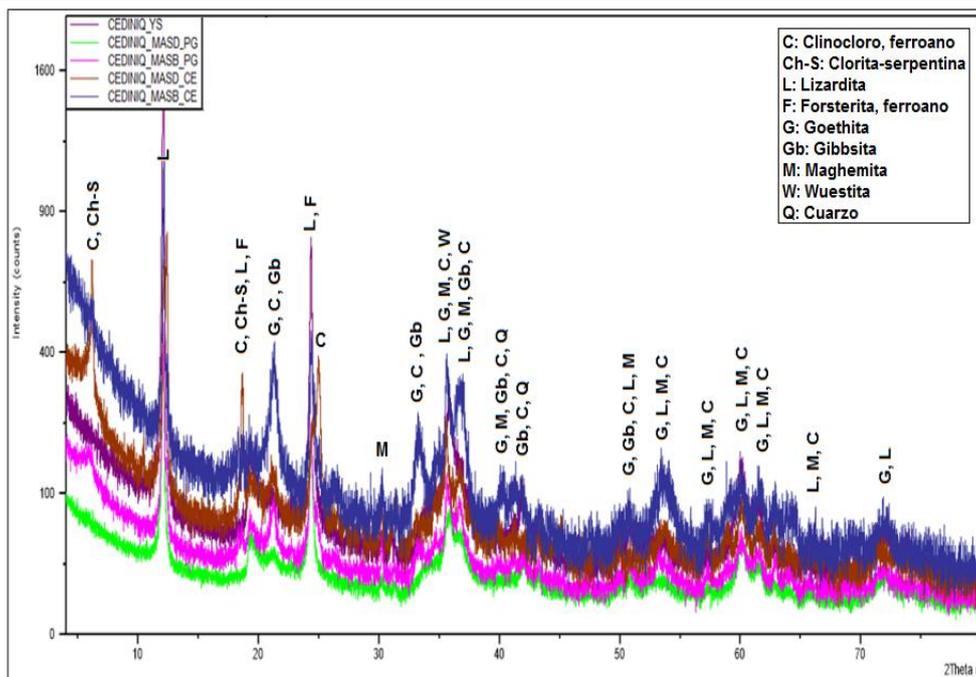


Fig. 2- Principales fases mineralógicas identificadas en las muestras

Diferentes investigaciones ^(4,10,11) identifican que la lizardita, el clinocloro y la clorita constituyen las fases mineralógicas principales presentes en el perfil saprolítico de las menas lateríticas cubanas.

Evaluación del comportamiento granulométrico

En la figura 3 se presenta el comportamiento granulométrico de las muestras de serpentinitas que se analizaron en la investigación. La forma cóncava de las curvas al relacionar el porcentaje del retenido acumulativo en función del tamaño de las partículas permite afirmar que en todas las muestras existe un predominio de los granos finos de acuerdo a las tendencias explicadas por Namindo.⁽¹²⁾

En todos los casos las muestras de saprolitas duras se caracterizaron por retener un mayor contenido de masa en todas las fracciones que se analizaron lo que revela que la alimentación de las menas blandas genera una mayor dilución de los contenidos de interés para el proceso minero-metalúrgico.

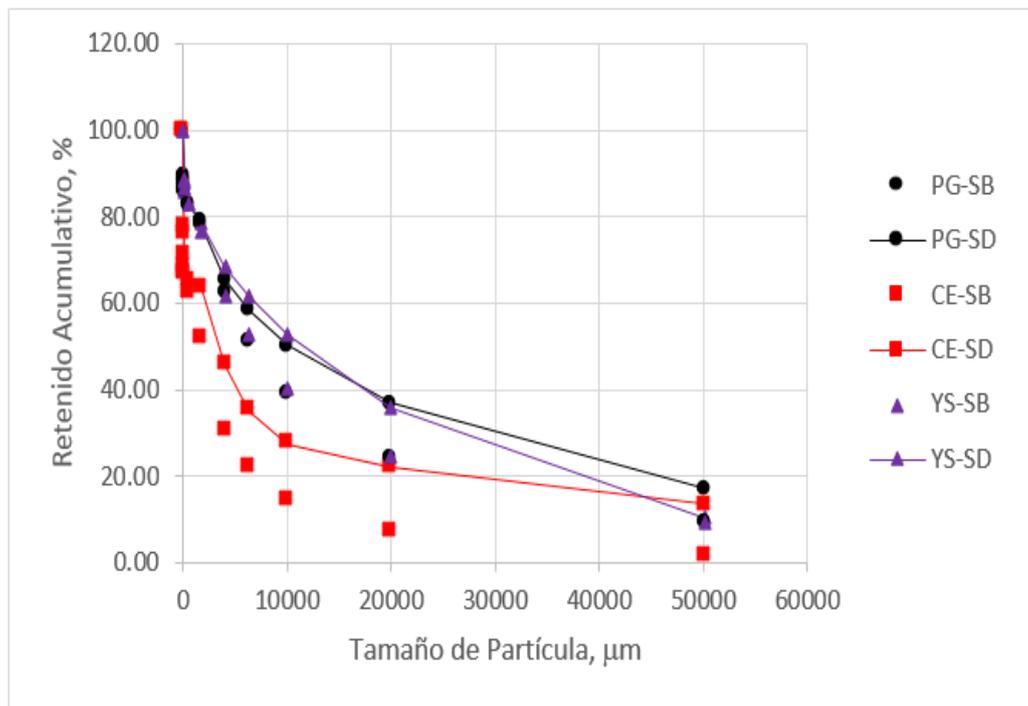


Fig. 3- Comportamiento granulométrico de los yacimientos bajo estudio

A partir de los resultados que se muestran en la figura 3, se evaluaron los modelos granulométricos GGS, RR y la función SWEF para cada una de las muestras de saprolita. En la figura 4 y en la tabla 2 se presentan los resultados referentes a la linealización y determinación de los modelos GGS, con coeficientes de determinación superiores a 0,87.

En todos los casos el módulo de tamaño fue de 75 000 μm , con módulos de distribución que oscilaron en el rango de 0,164 4 a 0,348 9.

Los errores residuales más bajos se lograron al utilizar el modelo GGS para caracterizar granulométricamente las muestras de saprolita del yacimiento de PG con valores inferiores 5,4 %, mientras que los más altos se obtuvieron al simular el comportamiento de las muestras del yacimiento de CE con valores de 12,68 y 7,19 para las saprolitas blandas y duras respectivamente.

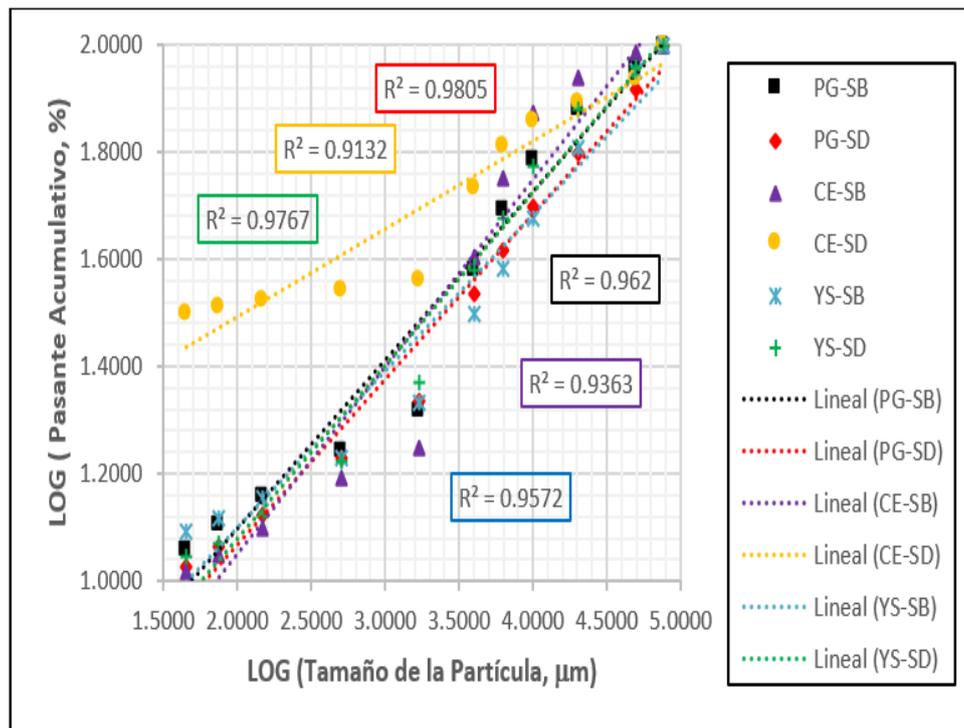


Fig. 4- Coeficientes de determinación de cada muestra para el modelo GGS

Tabla 2- Parámetros de los modelos Gates–Gaudin–Schuhmann

Muestras	Módulos de Tamaño, μm	Módulos de Distribución	σ , %	Modelos (G-G-S)
PG-SB	75 000	0,3137	5,39	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(\frac{X}{75\ 000}\right)^{0.3137}$
PG-SD		0,3083	4,75	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(\frac{X}{75\ 000}\right)^{0.3083}$
CE-SB		0,3489	12,68	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(\frac{X}{75\ 000}\right)^{0.3489}$
CE-SD		0,1644	7,19	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(\frac{X}{75\ 000}\right)^{0.1644}$
YS-SB		0,2919	6,93	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(\frac{X}{75\ 000}\right)^{0.2919}$
YS-SD		0,3224	4,74	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(\frac{X}{75\ 000}\right)^{0.3224}$

En la figura 5 y en la tabla 3 se presentan los resultados referentes a la linealización y determinación de los modelos RR, con coeficientes de determinación superiores a 0,87.

Se observaron similitudes en la distribución de los módulos de tamaño para los pares de muestras PG-SB / YS-SD y PG-SD / YS-SB con valores de pasantes

acumulativos superiores al 63 % cercanos 13,83 y 25,60 mm respectivamente; mientras que en el caso del yacimiento CE dicho pasante fue identificado en las fracciones de 8,38 y 6,12 mm para las saprolitas blandas y duras respectivamente. En el caso de los errores residuales se observaron valores superiores e inferiores a 6,70 y 10,40 % respectivamente.

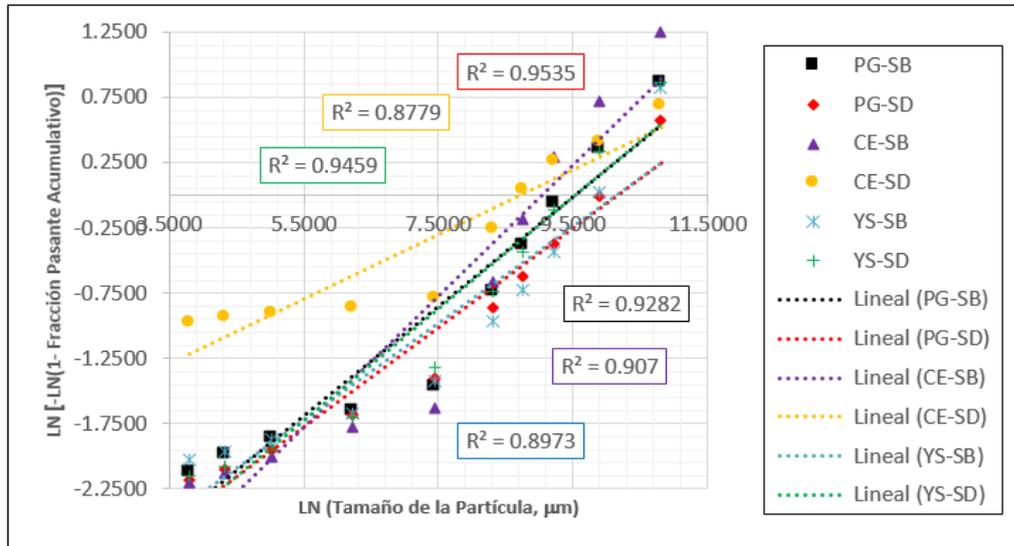


Fig. 5- Coeficientes de determinación de cada muestra para el modelo RR.

Tabla 3- Parámetros de los modelos Rosin-Rammler

Muestras	Módulos de Tamaño, µm	Módulos de Distribución	σ, %	Modelos (R-R)
PG-SB	13 832	0,4194	7,51	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{13\ 832}\right)^{0,4194}} \right)$
PG-SD	25 883	0,3804	8,54	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{25\ 883}\right)^{0,3804}} \right)$
CE-SB	8 377	0,5037	8,17	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{8\ 377}\right)^{0,5037}} \right)$
CE-SD	6 118	0,2463	8,23	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{6\ 118}\right)^{0,2463}} \right)$
YS-SB	25 450	0,3701	10,31	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{25\ 450}\right)^{0,3701}} \right)$
YS-SD	13 829	0,4291	6,78	$\% P_{(x)} = 100 \times \left(1 - e^{-\left(\frac{x}{13\ 829}\right)^{0,4291}} \right)$

En la tabla 4 y figura 6 se presentan los resultados referentes a la linealización y determinación de los modelos de la función SWEF para cada una de las muestras de serpentinas.

Los valores que se determinaron del parámetro de ondulación promedio para cada muestra se localizaron en el rango de 1,53 a 2,98, resultados cercanos a los que reportaron Coello et al.⁽⁷⁾ y Ouchterlony⁽¹³⁾ para diferentes tipos de minerales.

Tabla 4- Parámetros de las funciones SWEBREC

Muestras	X máximo (μm)	X ₅₀ (μm)	b promedio	σ, %	Modelos (SWEF)
PG-SB	75 000	6 400	2,4468	4,72	$P_{(x)} = 100 \times \left\{ \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{75\,000}{x}\right)}{\ln\left(\frac{75\,000}{6\,400}\right)} \right]^{2,4468}} \right\}$
PG-SD		10 160	1,5317	3,65	$P_{(x)} = 100 \times \left\{ \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{75\,000}{x}\right)}{\ln\left(\frac{75\,000}{10\,160}\right)} \right]^{1,5317}} \right\}$
.CE-SB		5 360	2,9795	4,58	$P_{(x)} = 100 \times \left\{ \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{75\,000}{x}\right)}{\ln\left(\frac{75\,000}{5\,360}\right)} \right]^{2,9795}} \right\}$
CE-SD		2 640	1,6651	6,86	$P_{(x)} = 100 \times \left\{ \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{75\,000}{x}\right)}{\ln\left(\frac{75\,000}{2\,640}\right)} \right]^{1,6651}} \right\}$
YS-SB		11 360	1,5999	1,73	$P_{(x)} = 100 \times \left\{ \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{75\,000}{x}\right)}{\ln\left(\frac{75\,000}{11\,360}\right)} \right]^{1,5999}} \right\}$
YS-SD		7 040	2,0382	2,75	$P_{(x)} = 100 \times \left\{ \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{75\,000}{x}\right)}{\ln\left(\frac{75\,000}{7\,040}\right)} \right]^{2,0382}} \right\}$

Al utilizar la función se observó un considerable grado de exactitud con coeficientes de determinación superiores a 0,91 y errores residuales inferiores a 6,9%.

El análisis de los coeficientes de determinación y la exactitud que presentaron los diferentes modelos granulométricos, permite afirmar que la función Swebrec es la que mejor describe la distribución de los tamaños experimentales de cada

una de las muestras de saprolita blanda y dura bajo estudio, concerniente a los yacimientos de Punta Gorda, Camarioca Este y Yagrumaje Sur.

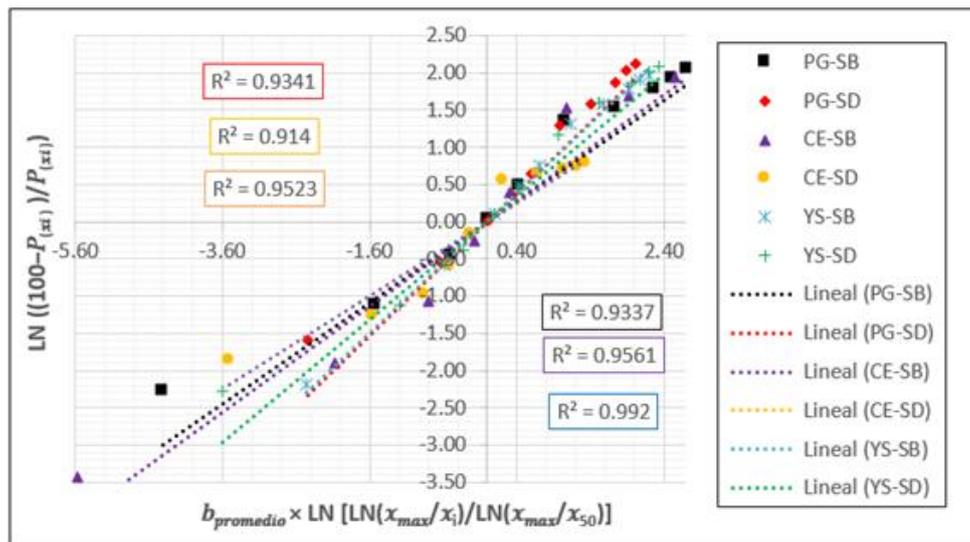


Fig. 6- Coeficientes de determinación de cada muestra de la función SWEF

Conclusiones

1. Todas las muestras de serpentinas se caracterizaron por el predominio de las fases mineralógicas de lizardita, el clinocloro y la clorita-serpentina.
2. La función Swebrec fue la más exacta para describir el comportamiento granulométrico de las seis muestras de serpentina, con coeficientes de determinación superiores a 0,91 y errores residuales inferiores a 6,9%.

Referencias bibliográficas

1. ZEVGOLIS, E. N. & DASKALAKIS, K. A. The Nickel Production Methods from Laterites and the Greek Ferronickel Production among Them. *Materials Proceedings*. 2022, **5**(104): p. 1-12. doi: <https://doi.org/10.3390/materproc2021005104>.
2. ROJAS VARGAS, A.; MAGAÑA HAYNES, M.E. & RIVERÓN, A.R. Lixiviación carbonato amoniacal: estimación del níquel disuelto en el efluente de destilación. *Revista de metalurgia*. 2019, **55**(3): p. e149-e149. doi: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.149>.

3. MIRANDA, J.L. Breve historia del surgimiento de la tecnología hidrometalúrgica del proceso de lixiviación carbonato-amoniaco del Ni y Co. *Tecnología Química*. 2014, **34**(3): p. 262-265. ISSN 2224 6185
4. ANGULO PALMA, Hugo Javier, et al. Post-combustion Effect on Nickel and Cobalt Extractions from the Caron Process. In: Bindhu V., R. S. Tavares J.M., Țălu Ș. (eds) *Proceedings of Fourth International Conference on Inventive Material Science Applications. Advances in Sustainability Science and Technology*. Springer, Singapore, 2022: p. 515-527. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7_43.
5. ANGULO PALMA, Hugo Javier, LEGRÁ-LEGRÁ, Ángel, HERNÁNDEZ PEDRERA, Carlos, LAMORÚ URGELLÉS, Alisa, & TORO VILLARROEL, Norman. Reducción de menas lateríticas utilizando como aditivo mezclas de carbón bituminoso y petróleo. *Tecnología Química*. 2020, **40**(1): p. 91-101. ISSN 2224 6185
6. GAINZA DELGADO, Y. & SÁNCHEZ GUILLEN, C. *Pruebas a escala de laboratorio de reducción-lixiviación de mezclas de pasivos mineros para la tecnología carbonato amoniaco*. Informe Final de Proyecto. Documento Inédito. Centro de Investigaciones del Níquel "Capitán Fernández Montes de Oca". 2020.
7. COELLO VELÁZQUEZ, A.L., et al. Use of the Swabrec Function to Model Particle Size Distribution in an Industrial-Scale Ni-Co Ore Grinding Circuit. *Metals*. 2019. **9**(882): p. 1-13. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/met9080882>.
8. COLORADO ARANGO, L., MENÉNDEZ AGUADO, J. M., & OSORIO CORREA, A. (2021). Particle Size Distribution Models for Metallurgical Coke Grinding Products. *Metals*. 2021. **11**(8), 1288. doi: <https://doi.org/10.3390/met11081288>.
9. QUIJANO ARTEAGA, V.A. *Modelación de la distribución de tamaño de los productos de la molienda del mineral laterítico*. Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales. Universidad de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Departamento de Metalurgia y Química. 2018.
10. DOMÈNECH, C., et al., Reactive transport model of the formation of oxide-type Ni-laterite profiles (Punta Gorda, Moa Bay, Cuba). *Mineralium Deposita*. 2017. **52**(7): p. 993-1010. doi: <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0713-0>.

11. TOIRAC LEYVA, V. & ROJAS PURÓN, A. Caracterización mineralógica de perfiles lateríticos del sector 048 en el yacimiento Punta Gorda, Holguín, Cuba. *Ciencia & Futuro*. 2021. **11**(4), p. 23-37. ISSN 2306-823X
12. NAMINDO NAMINDO, M. *Cinética de la molienda del carbón bituminoso*. Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales. Universidad de Moa, Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Departamento de Metalurgia y Química. 2015.
13. OUCHTERLONY, F.; SANCHIDRIÁN, J.A. & Genç, Ö. Advances on the fragmentation-energy fan concept and the swabrec function in modeling drop weight testing. *Minerals*. 2021. **11**(11): p. 1262. doi: <https://doi.org/10.3390/min11111262>.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Hugo Javier Angulo Palma: realizó el informe previo y dirigió el estudio completo.

Nerlan Manuel Guilarte-Rodríguez: realizó el estudio completo.

Ángel Legrá Legrá: participó en el estudio y revisó el informe final.

Mario Andrés Navarro Consuegra: participó en el estudio.

Carlos Hernández Pedrera: orientó metodológicamente y revisó el informe final.