



FLOTACIÓN DE PALIGORSKITA NATURAL CUBANA PARA EL AUMENTO DE SU CALIDAD Y LA DIVERSIFICACION DE SUS APLICACIONES

Rubén Alcalá Fariñas, Heidy Carpio Morales, Yaysel Lozada García, Martha Velázquez Garrido, José Antonio Alonso Pérez

Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM), Carretera Varona No. 12028, km 1½, Boyeros, Ciudad Habana, Cuba. Correo electrónico: Eliecer@cipimm.minem.cu

RESUMEN

En este trabajo se estudia el incremento de la ley del mineral de paligorskita a través del proceso de flotación, con vistas a incrementar el aprovechamiento de los recursos de baja ley del yacimiento Pontezuela y contribuir a la diversificación de sus aplicaciones. Se realizaron 8 pruebas de flotación aniónica y catiónica con vistas a depresar el cuarzo y flotar la Paligorskita, con granulometría 100 % bajo 200 mallas. Se utilizaron como colectores el ácido oleico y el acetato de amina y como depresores el H₂SO₄, el silicato de sodio, y el ácido fluorhídrico (HF), variando el tiempo de flotación en un rango entre 5 y 10 minutos. Se obtuvieron resultados positivos en cuanto a los análisis de difracción por RX realizados a las muestras de concentrado y cola obtenidas durante el proceso, pudiendo afirmar que se logra un aumento de un 15% en la ley de la paligorskita flotada. Los mejores resultados se obtienen en la flotación directa con silicato de sodio y ácido oleico y depresando el cuarzo.

Finalmente se determinó su capacidad de adsorción de agua, aplicando la Técnica Westinghouse a la muestra inicial o cabeza y al producto de la flotación, obteniéndose un incremento en la capacidad de adsorción de un 21% en la muestra flotada, lo que demuestra el efecto positivo que tiene en el aumento de la ley de Paligorskita. Uno de los reactivos del proceso de flotación es el ácido oleico que es un reactivo con un costo relativamente elevado por lo cual se repetirán las pruebas realizadas utilizando oleato de sodio, que es un subproducto producido por nuestras industrias refinadoras de aceites, con vistas a disminuir el costo económico del proceso de flotación. La investigación desarrollada aumenta el nivel de reserva existente en el yacimiento de paligorskita ya que incrementa la ley de este mineral, que posteriormente puede ser utilizado como desecante, aditivo para dieta animal con moringa, titonia y morera, soporte de fármacos entre otras aplicaciones del mismo.

ABSTRACT

In this work Pontezuela and contributing to the diversification of her application softwares studies the increment of the law of paligorskita's mineral through the process of floating, with an eye to increment the use of the resources of low law of the deposit herself. 8 tests of anionic floating and catiónica with an eye to depresar sold off quartz themselves and to float the Paligorskita, with classification by size of particles 100 % under 200 meshes. The H₂SO₄, the sodium silicate used like collectors oleic acid and the amine acetate and like depressors themselves and the HF, varying the time of floating in a status between 5 and 10 minutes. They obtained positive results as to the analyses of diffraction for RX sold off to the concentrate samples and tail obtained in the process, could have affirmed that an increase of a 15 % (6580 %) in the floated paligorskita's law turns out well. The best results obtain in the direct floating with sodium silicate and oleic acid and depresando quartz themselves.

Finally his capacity of adsorption of water was determined, applying to the Technique Westinghouse the initial sample or head and to floating's product, getting out increments of 21 % the capacity of adsorption in the floated sample, what the positive effect that has the increment of Paligorskita's law demonstrates.

One of the reagents of the process of floating is the oleic acid that is a reagent with a cost relatively raised by which the realized proofs using sodium oleate, that is a byproduct produced by our refining oils industries, with an eye to decrease the economic cost of the process of floating will be repetitive. The developed investigation increases the level of existent reserve at paligorskita's deposit since you increment the law of this mineral, that at a later time can be used like desiccant, additive for animal diet with moringa, titonia and white mulberry, support of pharmaceuticals between other application softwares of the same.



INTRODUCCIÓN

La **flotación** es un proceso fisicoquímico de tres fases (sólido-líquido-gas) que tiene por objetivo la separación de especies minerales mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a burbujas de aire.

Los principios básicos en que se fundamenta el proceso de la flotación son los siguientes:

- La hidrofobicidad del mineral que permite la adherencia de las partículas sólidas a las burbujas de aire.
- La formación de una espuma estable sobre la superficie del agua que permite mantener las partículas sobre la superficie.

Para establecer estos principios se requiere la adición de reactivos químicos al sistema. Estos reactivos de flotación son los colectores, depresores, activadores y modificadores, cuyas acciones principales es inducir e inhibir hidrofobicidad de las partículas y darle estabilidad a la espuma formada.

Las partículas minerales hidrofóbicas tienen la capacidad de adherirse a la burbuja, en tanto que las hidrofílicas, como la ganga, no se adhieren. La superficie hidrofóbica presenta afinidad por la fase gaseosa y repele la fase líquida, mientras que la superficie hidrofílica tiene afinidad por la fase líquida.

La flotación es un proceso muy utilizado en la recuperación de los minerales sulfurados de cobre debido a la hidrofobicidad natural que tienen. También se usa para la limpieza de aguas usadas con contenidos de grasas o aceites para su reutilización. Existen equipos que realizan este proceso como las celdas de flotación y las columnas de flotación; estas últimas han ido reemplazando a las celdas por sus menores costos operacionales.

La flotación es un proceso selectivo que se emplea para llevar a cabo separaciones específicas de minerales complejos, basándose en las diferentes propiedades superficiales de cada uno de ellos. Esta técnica se fundamenta en la adhesión selectiva de los minerales en el seno de una pulpa acuosa a unas burbujas de aire que se introducen en ella. Los minerales adheridos a las burbujas se separan en forma de espuma mineralizada constituyendo el concentrado, mientras que los demás se quedan en la pulpa y constituyen el estéril.

En este método de separación los reactivos son el componente y la variable más importante, ya que el número de especies de flotabilidad natural es tan reducido: talco, azufre, grafito, molibdenita y pocos más, y su importancia comercial tan reducida que se puede afirmar que la flotación industrial moderna no se podría efectuar sin reactivos. La flotabilidad natural depende de la polaridad, que es un elemento tan importante del proceso, ya que no solo tiene repercusión el tipo de reactivo, sino también su combinación, dosis, forma y orden de adición. El problema es complejo ya que la acción de los reactivos está basada en equilibrios iónicos, y este equilibrio es difícil de controlar, ya que aparte de los reactivos que introducimos en la pulpa, hay una considerable cantidad de iones en ella, procedentes de las impurezas que aporta el mineral así como el agua de tratamiento. (**Razumob. K.A, 1982**).



Tipos de reactivos

La clasificación moderna divide a los reactivos en función del papel que desarrollan en el proceso:

Colectores: Proporcionan características hidrofóbicas a los minerales.

Modificadores: Regulan las condiciones de funcionamiento de los colectores.

Espumantes: Permiten la formación de una espuma estable.

Reactivos Colectores

Es un grupo grande de reactivos orgánicos de composiciones diversas. Su misión es la hidrofobización selectiva de las superficies minerales, creando condiciones favorables a su adherencia a las burbujas de aire, disminuyendo la humectación, aumentando el ángulo de contacto con las burbujas.

Modificadores

La función específica de los reactivos modificadores es preparar las superficies minerales para la adsorción o desorción de un determinado reactivo sobre ellas y crear en la pulpa las condiciones propicias para realizar una buena flotación. Tradicionalmente los modificadores se clasifican en:

- Modificadores del medio o de pH, que controlan la concentración iónica de las pulpas y sus reacciones a través de la acidez o basicidad.
- Activantes, que fomentan las propiedades hidrofóbicas de los minerales y aumentan su flotabilidad. Los reactivos de este tipo sirven para aumentar la adsorción de los colectores o para fortalecer el enlace entre el colector y la superficie mineral.
- Depresores, que hidrofilizan las superficies minerales e impiden su flotación. La función específica de los depresores es la de disminuir la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrófila o impidiendo la adsorción de colectores que puedan hidrofilarla.

Reactivos espumantes

La producción de una espuma estable requiere la introducción de agentes orgánicos conocidos como espumantes, que suelen ser sustancias tensoactivas heteropares que pueden adsorberse en la interfase agua- aire. (S.V.Dudenkov, L.Y. Shubov, L.A. Glazunov y otros, Editorial MIR, Moscu).

Objetivo General: Estudiar el incremento de la ley del mineral de paligorskita utilizando el proceso de flotación, con vistas a incrementar el aprovechamiento de los recursos de baja ley del yacimiento Pontezuela y contribuir a la diversificación de sus aplicaciones.

MATERIALES Y METODOS

Las pruebas de flotación a realizadas pretenden separar parte del cuarzo que posee el mineral para aumentar la ley o pureza de la paligorskita a través del proceso de beneficio.

Moler la muestra de paligorskita bajo 200 mallas o 74 micrones

Preparar 1 ml de H₂SO₄ en 100 ml de H₂O hasta alcanzar pH=0,2

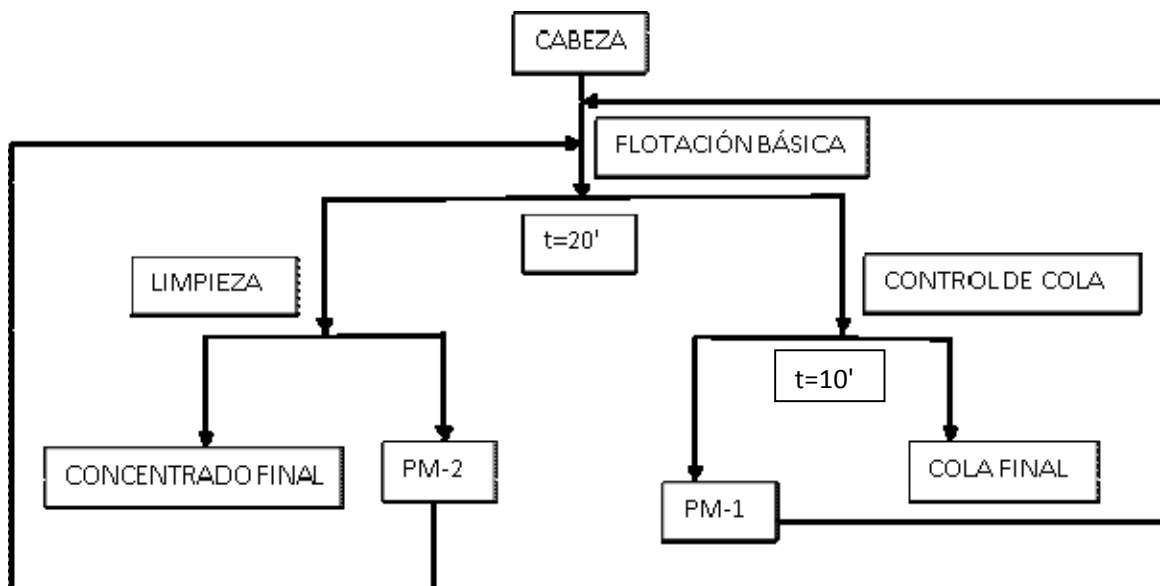
Preparar 8 g de silicato de sodio en 100 ml de H₂O hasta alcanzar pH=11,80

Preparar 1 ml de ácido oleico en 100 ml de alcohol al 90%

Preparar 1g de acetato de amina en 100 ml de H₂O



Molienda 100% bajo 200 mallas
pH = 10
Na₂SiO₃ = 3 kg/Tm
Ácido oleico = 2 kg/Tm



Flotación Directa- Flotar la paligorskita y Depresar el cuarzo

Prueba # 1:

Depresar el cuarzo con H₂SO₄ utilizando como colector y espumante el ácido oleico.

- Verificar que la válvula de aire de la celda de flotación este cerrada.
- Colocar el mineral de paligorskita (100 g) en la celda de flotación.
- Añadir H₂O en la celda de flotación hasta llegar al nivel requerido.
- Encender el equipo, tomar la muestra y medir el pH₁.
- Añadir 20 ml de H₂SO₄ como depresor con la celda en funcionamiento esperar 2 min y medir el pH₂.
- Se añaden otros 20 ml de H₂SO₄ con la celda en funcionamiento esperar 2min y medir el pH₃
- Se da un tiempo de agitación de 5 min para luego añadir 20 ml de ácido oleico.
- Se espera 1min y se abre el aire para luego empezar a sacar la espuma durante un tiempo de flotación de 5 min
- Se toma la espuma extraída de la celda como la muestra de concentrado de paligorskita y la muestra que queda en la celda será la cola de paligorskita obtenida del proceso

Muestra	Producto	Peso (g)
# 3231	Concentrado de paligorskita	23,40
# 3230	Cola de paligorskita	73,65



Prueba # 2:

Depresar el cuarzo con silicato de sodio utilizando como colector y espumante el ácido oleico.

- Verificar que la válvula de aire de la celda de flotación este cerrada.
- Colocar el mineral de paligorskita (100 g) en la celda de flotación.
- Añadir H₂O en la celda de flotación hasta llegar al nivel requerido.
- Encender el equipo, tomar muestra y medir el pH₁.
- Añadir 20 ml del depresor silicato de sodio con la celda en funcionamiento esperar 5 min y medir el pH₂
- Se añaden otros 20 ml de silicato de sodio con la celda en funcionamiento esperar 5 min y medir el pH₃
- Se da un tiempo de agitación de 5 min para luego añadir 20 ml de ácido oleico
- Se espera 1 min y se abre el aire para luego empezar a sacar la espuma durante un tiempo de flotación de 10 min
- Se añaden otros 20 ml de ácido oleico a los 5 min de flotación
- Se toma la espuma extraída de la celda como la muestra de concentrado de paligorskita y la muestra que queda en la celda será la cola de paligorskita obtenida del proceso

Muestra	Producto	Peso (g)
#3308	Concentrado de paligorskita	37,65
#3309	Cola de paligorskita	50,11

Prueba # 3:

Depresar el cuarzo con ácido fluorhídrico utilizando como colector y espumante el ácido oleico.

- Verificar que la válvula de aire de la celda de flotación este cerrada.
- Colocar el mineral de paligorskita (100 g) en la celda de flotación.
- Añadir H₂O en la celda de flotación hasta llegar al nivel requerido.
- Encender el equipo, tomar muestra y medir el pH.
- Añadir 20 ml del depresor ácido fluorhídrico con la celda en funcionamiento esperar 5min y medir el pH₂.
- Se da un tiempo de agitación de 5 min para luego añadir 20 ml de ácido oleico
- Se espera 1min y se abre el aire para luego empezar a sacar la espuma durante un tiempo de flotación de 10 min
- Se añaden otros 15 ml de ácido oleico a los 5min de flotación
- Se toma la espuma extraída de la celda como la muestra de concentrado de paligorskita y la muestra que queda en la celda será la cola de paligorskita obtenida del proceso

Muestra	Producto	Peso (g)
#3310	Concentrado de paligorskita	4,39
#3311	Cola de paligorskita	73,28

Flotación Inversa- Flotar el cuarzo y Depresar la paligorskita

Prueba # 4:

Depresar la paligorskita y flotar el cuarzo utilizando como colector y espumante el ácido oleico.



- Verificar que la válvula de aire de la celda de flotación este cerrada.
- Colocar el mineral de paligorskita (100 g) en la celda de flotación.
- Añadir H₂O en la celda de flotación hasta llegar al nivel requerido.
- Encender el equipo, tomar muestra y medir el pH₁.
- Añadir 1 g de cal (CaOH₂) con la celda en funcionamiento esperar 5 min y medir el pH₂. Se le añade nuevamente 1 g de cal con la celda en funcionamiento se espera 5 min y se mide el pH=8,81. Se le añaden finalmente 4g de cal se espera 5 min y se mide el pH₃.
- Se da un tiempo de agitación de 5 min para luego añadir 20 ml de ácido oleico
- Se espera 1min y se abre el aire para luego empezar a sacar la espuma durante un tiempo de flotación de 5 min

Muestra	Producto	Peso (g)
#3341	Concentrado de cuarzo	45,70
#3342	Cola de paligorskita	43,80

Prueba # 5:

Depresar la paligorskita y flotar el cuarzo utilizando como colector y espumante el acetato de amina.

- Verificar que la válvula de aire de la celda de flotación este cerrada.
- Colocar el mineral de paligorskita (100 g) en la celda de flotación.
- Añadir H₂O en la celda de flotación hasta llegar al nivel requerido.
- Encender el equipo, tomar muestra y medir el pH₁.
- Añadir 1 g de cal (CaOH₂) con la celda en funcionamiento esperar 5min y medir el pH₂.
- Se da un tiempo de agitación de 5 min para luego añadir 20 ml de acetato de amina y se espera 1 min. Se le añade nuevamente 20 ml de acetato de amina.
- Se espera 1min y se abre el aire para luego empezar a sacar la espuma durante un tiempo de flotación de 5 min

Muestra	Producto	Peso (g)
#3343	Concentrado de cuarzo	11,69
#3344	Cola de paligorskita	79,03

Prueba # 6:

Depresar la paligorskita y flotar el cuarzo presente en la cola de la **prueba # 2**, utilizando como colector y espumante el ácido oleico.

- Verificar que la válvula de aire de la celda de flotación este cerrada.
- Colocar el mineral de paligorskita (100 g) en la celda de flotación.
- Añadir H₂O en la celda de flotación hasta llegar al nivel requerido.
- Encender el equipo, tomar muestra y medir el pH₁.
- Añadir 20 ml del depresor silicato de sodio con la celda en funcionamiento esperar 5min y medir el pH₂
- Se da un tiempo de agitación de 5 min para luego añadir 20 ml de ácido oleico. Se añaden otros 20 ml de ácido oleico a los 5 min de flotación
- Se espera 1 min y se abre el aire para luego empezar a sacar la espuma durante un tiempo de flotación de 5 min



- Se toma la espuma extraída de la celda como la muestra de producto intermedio o concentrado de paligorskita y la muestra que queda en la celda será la cola final de paligorskita obtenida del proceso

Muestra	Producto	Peso (g)
#3815	Producto intermedio (Concentrado)	5,23
#3814	Cola final de paligorskita	43,31

Prueba # 7:

Depresar el cuarzo con H_2SO_4 y flotar la paligorskita presente en el concentrado de la **prueba # 2**, utilizando como colector y espumante el ácido oleico.

- Verificar que la válvula de aire de la celda de flotación este cerrada.
- Colocar el mineral de paligorskita (100 g) en la celda de flotación.
- Añadir H_2O en la celda de flotación hasta llegar al nivel requerido.
- Encender el equipo, tomar muestra y medir el pH_1 .
- Añadir 13 ml del depresor H_2SO_4 con la celda en funcionamiento esperar 5 min y medir el pH_2 .
- Se da un tiempo de agitación de 5 min para luego añadir 10ml de ácido oleico. Se añaden otros 10ml de ácido oleico a los 5 min de flotación
- Se espera 1 min y se abre el aire para luego empezar a sacar la espuma durante un tiempo de flotación de 5 min.
- Se toma la espuma extraída de la celda como la muestra de concentrado de paligorskita y la muestra que queda en la celda será la cola de paligorskita obtenida del proceso.

Muestra	Producto	Peso (g)
# 3825	Concentrado	11,08
# 3826	Cola final de paligorskita	25,89

Prueba # 8:

Depresar el cuarzo y flotar la paligorskita presente en la cola de la **prueba # 5**, utilizando como colector y espumante el acetato de amina.

- Verificar que la válvula de aire de la celda de flotación este cerrada.
- Colocar el mineral de paligorskita (100 g) en la celda de flotación.
- Añadir H_2O en la celda de flotación hasta llegar al nivel requerido.
- Encender el equipo, tomar muestra y medir el pH_1 .
- Añadir 1,75 g de cal ($CaOH_2$) con la celda en funcionamiento esperar 5 min y medir el pH_2 .
- Se da un tiempo de agitación de 5 min para luego añadir 40 ml de acetato de amina y se espera 1 min. Se le añade nuevamente 12 ml de acetato de amina.
- Se espera 1 min y se abre el aire para luego empezar a sacar la espuma durante un tiempo de flotación de 5 min
- Se toma la espuma extraída de la celda como la muestra de concentrado de paligorskita y la muestra que queda en la celda será la cola de paligorskita obtenida del proceso

Muestra	Producto	Peso (g)
# 3856	Concentrado	15,35
# 3857	Cola final de paligorskita	70,16



Al concentrado obtenido en la prueba # 2 se le realizó la norma o técnica Westinghouse que describe el método para la determinación de la capacidad de adsorción estática de agua de granulares absorbentes, mediante la inmersión del granular en agua hasta saturación.

Procedimiento:

- Se toman 20 g de granos del mineral (P_1)
 - Se pesan conjuntamente la muestra y el cono (P_2)
 - El cono se sumerge completamente en el beaker de 500 ml con agua por un período de tiempo de 30 minutos.
 - Se extrae el cono del baño de agua y se deja escurrir por 30 minutos.
 - Se pesa el cono con la muestra (P_3)
- Porcentaje absorbido = $(P_3 - P_2) / P_1 \times 100$
 $P_3 - P_2$: N^{ro} de gramos absorbidos (agua)
 P_1 : N^{ro} de gramos de granos absorbentes

ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Prueba	pH ₁	pH ₂	pH ₃
#1	7,9	7,26	3,74
#2	7,9	9,7	10,11
#3	7,9	3,76	-
#4	7,9	8,20	11,86
#5	7,9	8,20	-
#6	7,9	10,23	-
#7	7,9	8,5	-
#8	7,9	6,33	-

El servicio analítico reporta la composición cualitativa y el análisis semicuantitativo de una muestra de arcilla palygorskita del yacimiento "Pontezuela", lo que permite evaluar la calidad de los concentrados obtenidos por flotación, mediante el empleo de la técnica de Difractometría de polvos de rayos-X (DRX) y Calorimetría Diferencial de Barrido-Termogravimetría (CDB-TG).

Los difractogramas de polvos se registraron en un equipo Philips, modelo PW - 1710 con los siguientes parámetros de operación:

Los resultados numéricos de intensidades relativas y ángulos de difracción obtenidos se interpretaron mediante el empleo del programa "X-Pert High Score", el cual incluye la Base de Datos PCPDF WIN-2003, compatible con WINDOWS "7" para Office.

Para el análisis semicuantitativo, los datos de Intensidad (número de conteos) vs. Ángulos de difracción (2θ), se convirtieron en difractogramas continuos con el empleo del programa "Origin 7.0", compatible con Windows para Office.

Los termogramas simultáneos CDB - TG, se obtuvieron en un termoanalizador de la firma NETZSCH de Alemania, modelo STA 449 F3.

Los resultados de por cientos de pérdidas de masa (%P.M) se consignan en los termogramas TG en color rojo.



Solo se muestran para cada técnica, los resultados que se lograron para la mejor prueba de beneficio (prueba #2, muestras 3308 y 3309) respectivamente.

RESULTADOS

Tabla I. Análisis semicuantitativo de fases obtenidos por DRX en dos muestras representativas de arcilla palygorskita del yacimiento “Pontezuela”, (%)

Muestra	Mineral	Cuarzo	Cl - H	Mord	Calcita	Plag	Material Amorfo	Cristob.	Mont	Paly.
2721	Palygorskita Pontezuela	51	-	-	5	3	5	1	11	24

- Los resultados se expresan en por ciento másico (g /100 g muestra)
- Como materiales amorfos se consideran en el caso de la palygorskita el ópalo
- y/o calcedonia ($\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$) y en la zeolita el vidrio volcánico (aluminosilicato no cristalino)

Leyenda:

Arcilla montmorillonita – $\text{Si}_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_4 (\text{Al}_{4-x} \text{Mg}_x) (\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})^+ \cdot n \text{H}_2\text{O}$

Cuarzo - αSiO_2

Zeolita Mordenita – $(\text{Ca}, \text{Na}_2, \text{K}_2)_4 [\text{Al}_8 \text{Si}_{40} \text{O}_{96}]. 28 \text{H}_2\text{O}$

Arcilla Palygorskita – $\text{Mg}_5 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_8$

Calcita - CaCO_3

Zeolita Cinoptilolita-Heulandita – $(\text{Na}, \text{K}) \text{Ca}_4 [\text{Al}_9 \text{Si}_{27} \text{O}_{72}]. 24 \text{H}_2\text{O}$

Material amorfo - $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (mezcla de óxidos de silicio; ópalo y/o calcedonia) y vidrio volcánico (aluminosilicato no-cristalinos; $(\text{Na}, \text{K}) \text{Ca}_4 [\text{Al}_9 \text{Si}_{27} \text{O}_{72}]. n \text{H}_2\text{O}$)

Cristobalita – αSiO_2 (modificación de baja temperatura)

Los difractogramas de las muestras analizadas se presentan en las figuras 1 y 2. Las fases de interés para el beneficio por flotación lo constituyen entonces: cuarzo, material amorfo, cristobalita y albita (plagioclasa) respectivamente, cuyos respectivos por cientos en peso se muestran en la tabla I.

Como aspecto de interés se señala que en el caso de la muestra de palygorskita, esta se corresponde con el tipo natural de mena (IV) según la clasificación que se propone por Alonso J.A et al. (2013) y la zeolita se corresponde con el tipo I (según la NC de especificaciones, 2008). El error relativo del análisis semicuantitativo es de $\pm 10\%$.

Tabla II. Resultados DRX del beneficio por flotación de la paygorskita, (%)

MUESTRA	Cuarzo	Palygorskita	Montmorillonita	Calcita	Cristobalita	Basanita	Clorita
2721 (cabeza)	55	33	9	3	1	-	-
3308*	22	52	14	9	1	-	4
3309	62	30	3	4	1	-	-
3310	54	34	7	4	1	-	-
3311	42	38	14	5	1	-	-
3230	48	32	15	-	1	5	-
3231	47	36	12	-	1	4	-



Muestra 3308: Mejor prueba (66% ARCILLA) y 22% cuarzo. La basanita es sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$)

Tabla III. Resultados de análisis cuantitativo combinado de arcillas (Palygorskita + Montmorillonita) obtenidos por DRX - DSC-TG en pruebas de flotación del mineral de Pontezuela. (%)

MUESTRA	Palyg.	Montm.	Cuarzo (SiO_2)	Calcita (CaCO_3)	Basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	Goethita (FeOOH)	Plagioclasa (Silicato de sodio y calcio)	Arcilla clorita	Ley Palyg + Mont
2721 (Cabeza)	45	21	30	3	-	1	-	-	66
3230 P-1 (Conc.)	46	22	26	-	3	2	-	-	68
3231 P-1 (Cola)	48	28	20	-	2	2	-	-	76 (10%)
3308 P-2 (Conc.)	51	29	13	6	-	2	-	4	80 (14%)
3309 P-2 (Cola)	42	16	39	1	-	2	-	-	58
3310 P-3 (Conc.)	47	17	31	1	-	4	-	-	64
3311 P-3 (Cola)	43	20	30	2	2	3	-	-	63
3341 P-4 (Conc.)	37	21	34	6	-	2	-	-	58
3342 P-4 (Cola)	45	23	20	11	-	1	-	-	68
3343 P-5 (Conc.)	42	22	30	3	-	3	-	-	64
3344 P-5 (Cola)	44	24	27	3	-	2	-	-	68
3486 P-6 (Conc.)	45	25	23	1	-	2	4	-	70
3487 P-6 (Cola)	46	25	24	2	-	2	-	1	71

Muestra Cabeza nuevamente analizada para confrontar valores obtenidos.

Tabla IV. Resultados de Análisis Cuantitativo Combinado de Arcillas (Palygorskita + Montmorillonita) obtenidos por DRX - DSC-TG en pruebas de flotación del mineral de Pontezuela, (%)

MUESTRA	Palyg.	Montm.	Cuarzo (SiO_2)	Calcita (CaCO_3)	Basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	Goethita (FeOOH)	Plagioclasa (Silicato de sodio y calcio)	Arcilla clorita	Ley Palyg + Mont
3814	44	10	44	2	-	-	-	-	54
3815	36	19	33	11	-	-	-	1	55
3825	52	15	27	6	-	-	-	1	67
3826	42	14	27	15	-	-	-	2	56
3827	34	22	31	12	-	-	-	1	56
3855	40	7	48	3	-	-	-	1	47
3856	42	26	29	6	-	-	-	1	68
3857	44	16	31	7	-	-	-	2	60
2721 (Cabeza)	45	21	30	3	-	1	-	-	66

La prueba # 2 fue la más satisfactoria debido a que se logro aumentar la ley del mineral en un 15% obteniendo una recuperación de 80% como se muestra en los resultados del balance expuesto en la tabla V a continuación.

Tabla V. Resultados del balance

Muestra	Peso (g)	% Peso	Ley (%)	ξ (%) Recuperación
Concentrado	37,65	65,0	80,0	80,0
Cola	50,11	35,0	37,14	20,0
Cabeza	87,76	100	65,0	100

$$\% \text{ Peso} = (P_{\text{concentrado}} / P_{\text{cabeza}}) * 100$$

$$\text{Ley (\%)} = \% \text{ Palygorskita} + \% \text{ Montm}$$

$$\xi (\%) = \% \text{ Peso} * \text{Ley (\%)} / \text{Ley}_{\text{cabeza}}$$



Tabla VI. Resultados de análisis cuantitativo combinado de arcillas (Palygorskita + Montmorillonita) obtenidos por DRX Y DSC-TG en pruebas de flotación de la arcilla de Pontezuela, (%)

MUESTRA	Palyg.	Montm.	Cuarzo (SiO ₂)	Calcita (CaCO ₃)	Basanita (CaSO ₄ .H ₂ O)	Goethita (FeOOH)	Plagioclasas	Arcilla clorita	Ley Palyg + Mont
2721 (Cabeza)	45	21	30	3	-	1	-	-	66
3230 P-1 (Conc.)	46	22	26	-	3	2	-	-	68
3231 P-1 (Cola)	48	28	20	-	2	2	-	-	76 (10%)
3308 P-2 (Conc.)	51	29	13	6	-	2	-	4	80 (14%)
3309 P-2 (Cola)	42	16	9	1	-	2	-	-	58
3310 P-3 (Conc.)	47	17	31	1	-	4	-	-	64
3311 P-3 (Cola)	43	20	30	2	2	3	-	-	63
3341 P-4 (Conc.)	37	21	34	6	-	2	-	-	58
3342 P-4 (Cola)	45	23	20	11	-	1	-	-	68
3343 P-5 (Conc.)	42	22	30	3	-	3	-	-	64
3344 P-5 (Cola)	44	24	27	3	-	2	-	-	68
3486 P-6 (Conc.)	45	25	23	1	-	2	4	-	70
3487 P-6 (Cola)	46	25	24	2	-	2	-	1	71

Tabla VII. Resultados de análisis cuantitativo combinado de arcillas (Palygorskita + Montmorillonita) obtenidos por DRX Y DSC-TG en productos de colas de flotación de la arcilla de Pontezuela, (%)

MUESTRA	Palyg.	Montm.	Cuarzo (SiO ₂)	Calcita (CaCO ₃)	Basanita (CaSO ₄ .H ₂ O)	Goet (FeOOH)	Plagioclasa	Arcilla clorita	Ley Palyg+Mont
3814	44	10	44	2	-	-	-	-	54
3815	36	19	33	11	-	-	-	1	55
3825	52	15	27	6	-	-	-	1	67
3826	42	14	27	15	-	-	-	2	56
3827	34	22	31	12	-	-	-	1	56
3855	40	7	48	3	-	-	-	1	47
3856	42	26	29	6	-	-	-	1	68
3857	44	16	31	7	-	-	-	2	60

Como primer aspecto de interés se señala que en el caso de la muestra cabeza de palygorskita (2721), esta se corresponde por el contenido másico de palygorskita con el tipo natural de mena (III), según la clasificación preliminar propuesta por Alonso J.A et al. (2013). El error relativo del análisis semicuantitativo es de $\pm 10\%$. Los difractogramas de las muestras para la mejor prueba, se presentan en las figuras 1, 2 y 3 respectivamente.

Las impurezas minerales para el enriquecimiento de la ley de arcillas (palygorskita + montmorillonita) mediante el método de beneficio por flotación, lo constituyen en este caso según se observa por DRX las siguientes: cuarzo, material amorfo (óxidos de silicio), cristobalita y albita (plagioclasa), cuyos respectivos por cientos en peso se muestran en la tabla I. Asimismo, para la evaluación de la composición sustancial de las fases en las muestras de interés por dicha técnica, se utilizó el método RIR propuesto por Chung et al. (1978).

Por otra parte, con relación a los resultados que se lograron por CDB-TG, se seleccionaron los dos efectos endotérmicos de salida del agua entre poros y estructural del mineral palygorskita (236 y 440°C), así como otro similar de la misma naturaleza por pérdida de agua estructural para evaluar el contenido de la arcilla montmorillonita (500°C) correspondientemente.



La tabla I muestra que, los mejores resultados de enriquecimiento de la ley de ambas arcillas lo constituye sin dudas la prueba 2, con un estimado promedio del 14% de incremento, la cual utilizó como reactivos de flotación el silicato de sodio como depresor y ácido oleico como espumante. En la tabla II por su parte, los resultados de las pruebas de refLOTACIÓN de las colas demuestran que la ley de arcillas se mantiene similar a la del mineral de cabeza inicial (67-68%).

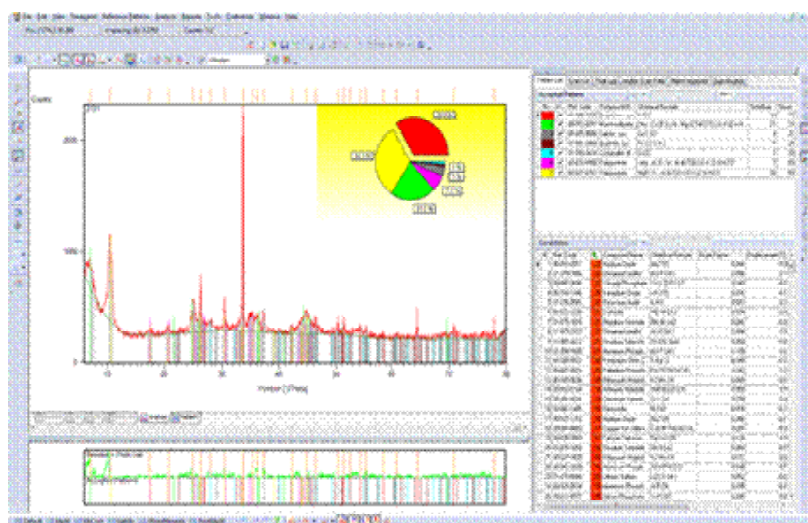
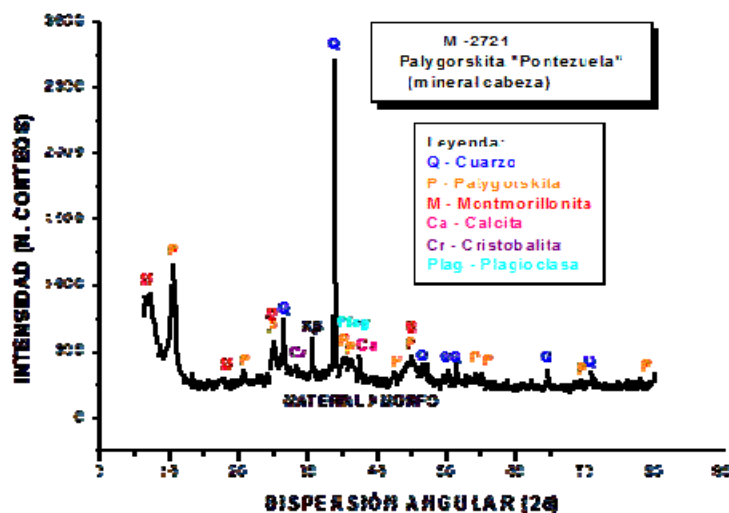


Figura 1. Difractograma de la muestra 2721 de la arcilla palygorskita del yacimiento Pontezuela

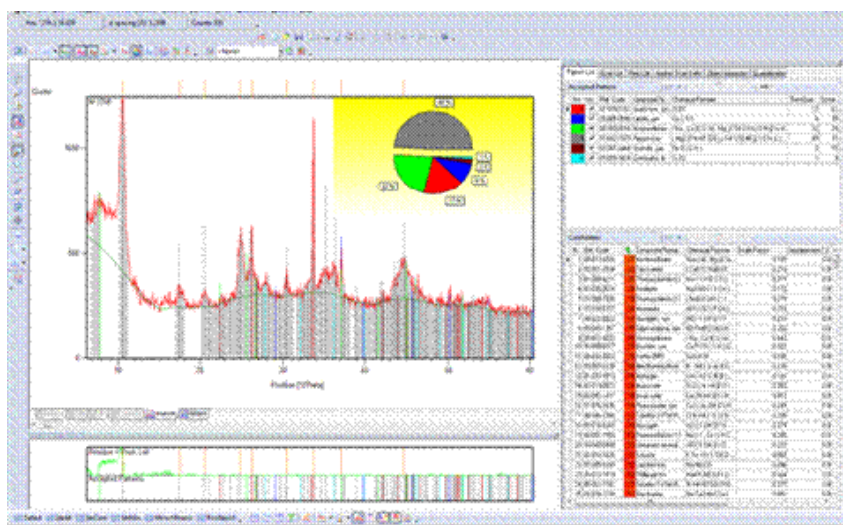


Figura 2. Difractograma de la prueba 2 (muestra 3308) concentrado de arcilla (palygorskita + montmorillonita) del yacimiento Pontezuela

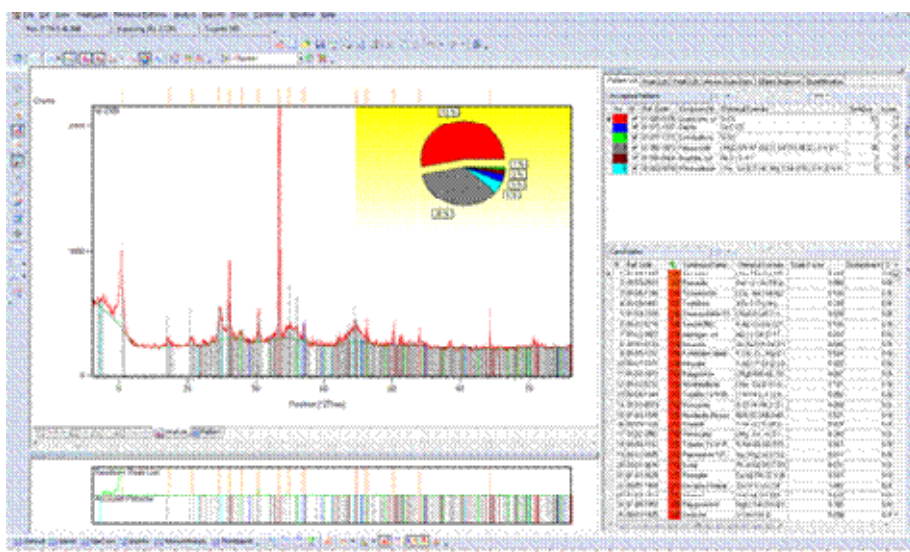


Figura 3. Difractograma de la prueba 2 (muestra 3309) producto de cola de la arcilla (palygorskita + montmorillonita) del yacimiento Pontezuela

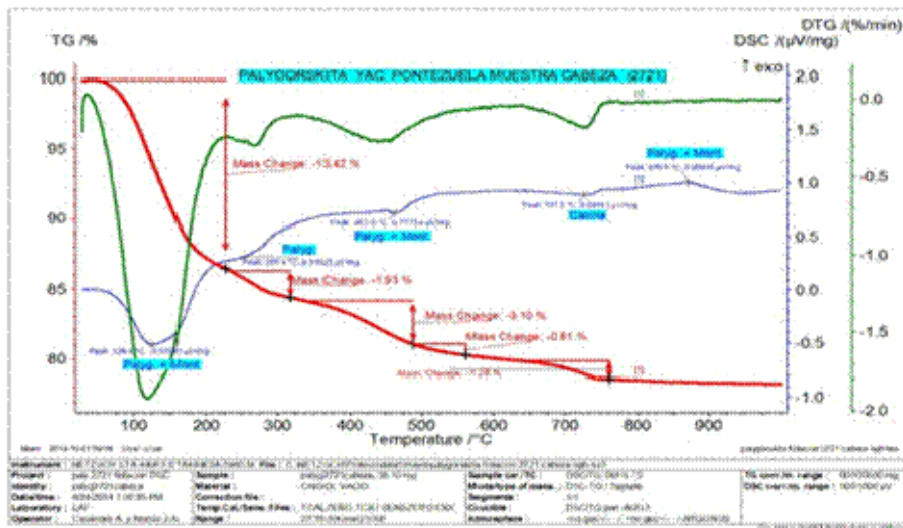


Figura 4 Termograma de la muestra 2721 (cabeza) de la arcilla palygorskita del yacimiento Pontezuela

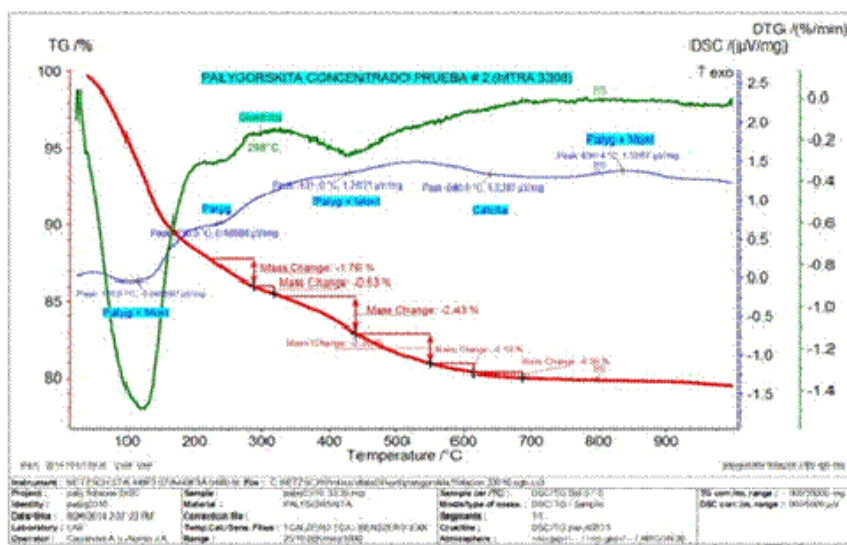


Figura 5. Termograma de la prueba #2 (silicato de sodio) de flotación de la arcilla palygorskita de Pontezuela (concentrado, muestra 3308)

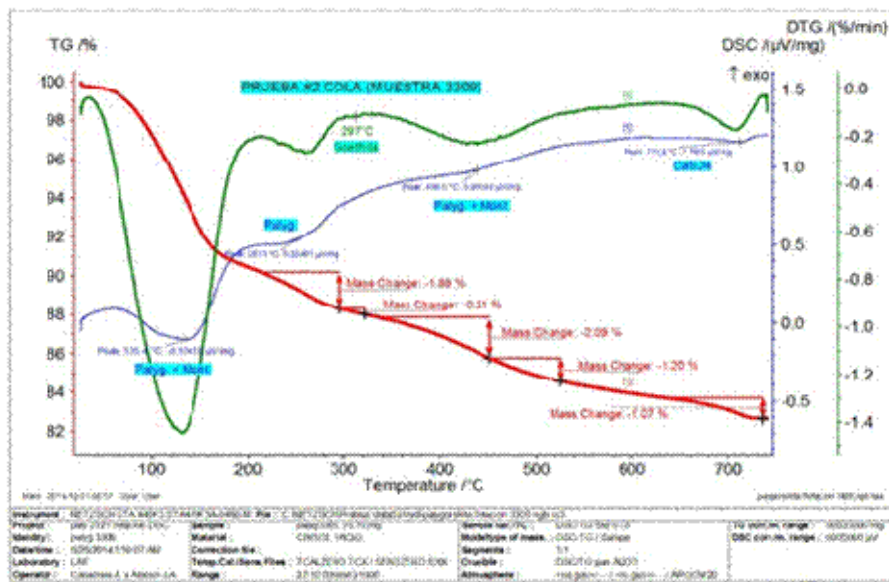


Figura 6. Termograma de la prueba #2 (silicato de sodio) de flotación de la arcilla palygorskita de Pontezuela (producto de cola, muestra 3309)

Tabla VIII. Resultados de la técnica Westinghouse realizada a la paligorskita natural y flotada, (%W)

Paligorskita	P ₁ (g)	P ₂ (g)	P ₃ (g)	%W
Natural	20	17,10	33,15	160,5
Flotada	20	15,53	35,88	203,5

$$\text{Incremento} = 100 - (160,3/203,5) * 100 = 21\%$$

Finalmente se determinó la capacidad de adsorción de la paligorskita, aplicando la Técnica Westinghouse a la muestra inicial o cabeza y al producto de la flotación, obteniendo como resultado un incremento de un 43%W que se traduce en un 21% en la capacidad de adsorción de la muestra flotada, lo que demuestra el efecto positivo que tiene el incremento de la ley de Paligorskita durante el proceso de flotación.

VALORACIÓN ECONÓMICA

Es importante desde el punto vista técnico económico disponer de un proceso, en este caso la flotación, que nos permita acrecentar el nivel de reserva existente en el yacimiento de paligorskita, mediante el incremento de la ley de este mineral. La metodología desarrollada es generalizable a las condiciones de trabajo relacionadas con anterioridad.

Es preciso destacar que de todas las pruebas realizadas, la # 2 es la más satisfactoria ya que se logro aumentar la ley del mineral en un 15% obteniendo una recuperación de un 80% En cuanto a los reactivos utilizados en esta prueba, donde se depresó el cuarzo con silicato de sodio utilizando como colector y espumante el ácido oleico, podemos decir que desde el punto de vista de precios, el ácido oleico es un reactivo que se importa con costo relativamente elevado (4 USD/ kg), mientras que el



silicato de sodio se produce en nuestro país a un costo de 1 USD/ kg. Por lo anterior se deben repetir las pruebas realizadas utilizando oleato de sodio, que es un subproducto producido por nuestras industrias refinadoras de aceites, con vistas a disminuir el costo económico del proceso de flotación.

CONCLUSIONES

1. Los esquemas de flotación desarrollados demostraron que el más satisfactorio para la paligorskita es el que utiliza como depresor del cuarzo el silicato de sodio y como colector el ácido oleico, ya que con este esquema se logra subir la ley de 65% del mineral cabeza a un 80% en el caso del mineral flotado, sabiendo según los análisis realizados que esta ley es una mezcla de paligorskita y montmorillonita.
2. El resultado alcanzado nos permite obtener un producto más rico en ley, con lo cual se amplían las reservas del yacimiento de paligorskita.
3. La recuperación o extracción del elemento útil durante el proceso fue de un 80%, valor que se puede considerar como aceptable desde el punto de vista técnico.
4. Los reactivos utilizados en el proceso de flotación se pueden producir en el país como subproductos

RECOMENDACIONES

- Realizar las pruebas substituyendo el ácido oleico por un residuo obtenido de la purificación del aceite de comer, que es una sal del ácido oleico (oleato de sodio) obtenido en nuestra industria.
- Hacer pruebas adicionales con el objetivo de disminuir el índice de molienda y flotar la fracción - 1,25 + 0,6 mm.
- Hacer otras pruebas de adsorción para definir el aumento de la eficiencia y la ley obtenida en el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

Documentos Normativos de Referencia

PT 10-002. Análisis cualitativo de fases mediante difracción de rayos-X Norma CIPIMM

Razumob., K.A, Método de enriquecimiento por flotación. Editorial Leningrado, URSS, año 1982.

Dudenkov., S.V; Shubov, L.Y; Glazunov, L.A y otros, Fundamentos de la teoría y la práctica de empleo de reactivos de flotación. Editorial MIR, Moscú.

Andreiev, S.E; Perov, V.A; Zverievich, V.V. Trituración, Desmenuzamiento y Cribado de Minerales.