

**DISGREGACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE-PIRITA: EFECTO
SOBRE SU SEPARACIÓN POR TÉCNICAS DE BENEFICIO DE MINERALES**

**LEIDY TATIANA POVEDA ROJAS
JAVIER ALEXIS SÁNCHEZ GARCÍA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2017

**DISGREGACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE-PIRITA: EFECTO
SOBRE SU SEPARACIÓN POR TÉCNICAS DE BENEFICIO DE MINERALES**

**LEIDY TATIANA POVEDA ROJAS
JAVIER ALEXIS SÁNCHEZ GARCÍA**

**Trabajo de grado proyecto de investigación presentado como requisito para optar al
título de Ingeniero Metalúrgico**

Director

PhD. ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA

Director

Dr. PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios por todas las bendiciones otorgadas y por permitirnos alcanzar este logro tan importante para nuestras vidas.

A nuestros padres, por su dedicación, su apoyo incondicional y por ser nuestros guías y fuente de motivación.

A nuestros hermanos por todo el apoyo brindado a lo largo de esta etapa.

A nuestros amigos, compañeros y todas aquellas personas que nos acompañaron durante todo este proceso de aprendizaje.

<< Tatiana & Javier >>

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, por ser nuestro segundo hogar y brindarnos esta formación profesional.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la Universidad Industrial de Santander, por la financiación del presente trabajo de grado, a través del proyecto de investigación titulado “Implementación del proceso CGA como una alternativa a los métodos tradicionales de amalgamación y cianuración para la recuperación de oro de minerales colombianos”, código 1884.

Agradecemos al Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalúrgia y Ambiente (GIMBA) por el apoyo económico e investigativo brindado durante la realización de este proyecto.

A todo el grupo de técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, especialmente al Técnico Ambrosio Carrillo por su tiempo, conocimiento e incondicional apoyo.

Al laboratorio de Rayos X, en especial al profesor Henao y al laboratorio de Microscopia, con sede en el parque tecnológico Guatiguará, por facilitarnos los equipos para el desarrollo de pruebas indispensables para el desarrollo de este trabajo de investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1 OBJETIVOS	17
1.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
2. ANTECEDENTES.....	18
2.1. PROCESO DE AGLOMERACIÓN DE ORO CON CARBÓN	18
2.1.1. Etapas del proceso CGA.....	19
2.2. TÉCNICAS ALTERNATIVAS DE SEPARACIÓN CARBÓN-MINERAL	20
2.2.1. Concentración gravimétrica por mesa concentradora.....	20
2.2.2. Concentrador gravimétrico Knelson.....	21
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	22
3.1. OBTENCIÓN DE AGLOMERADOS CARGADOS CON PIRITA.	22
3.1.1. Preparación y caracterización de los materiales usados en la investigación.....	22
3.1.2. Formación de aglomerados cargados.. ..	23
3.2. EVALUACIÓN DE LA DISGREGACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE-PIRITA(ORO)	23
3.2.1. Disgregación de aglomerados cargados mediante agitación magnética, con ayuda de diferentes sustancias desengrasantes.....	23
3.2.2. Disgregación de aglomerados cargados mediante agitación ultrasónica.....	24
3.3. ESTUDIO DE VARIABLES EN LA SEPARACIÓN DE LAS PARTÍCULAS MINERALES DEL CARBÓN	24
3.3.1. Concentración usando mesa concentradora.. ..	25
3.3.2. Concentración usando concentrador Knelson.....	25

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
4.1.	OBTENCIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE CARGADOS CON PIRITA	27
4.1.1.	Preparación y caracterización de los materiales usados en la investigación.....	27
4.1.2.	Formación de aglomerados cargados.	30
4.2.	EVALUACIÓN DE LA DISGREGACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE-PIRITA	32
4.2.1.	Disgregación de aglomerados cargados mediante agitación magnética, con ayuda de diferentes sustancias desengrasantes	32
4.2.2.	Disgregación de aglomerados cargados mediante agitación ultrasónica	35
4.3.	ESTUDIO DE VARIABLES EN LA SEPARACIÓN DE LAS PARTÍCULAS MINERALES DEL CARBÓN	36
4.3.1.	Concentración gravimétrica por mesa concentradora.....	36
4.3.2.	Concentración usando concentrador Knelson.....	38
5.	CONCLUSIONES	43
6.	RECOMENDACIONES	44
	REFERENCIAS	45
	BIBLIOGRAFÍA	48
	ANEXOS.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de la formación de aglomerados en el proceso CGA.	18
Figura 2. Esquema básico del funcionamiento de un concentrador Knelson.....	21
Figura 3. Distribución granulométrica del carbón del Cerrito luego de su conminución. ...	27
Figura 4. Distribución granulométrica del mineral de la mina Reina de Oro.	29
Figura 5. Fotografías de aglomerados carbón-aceite a) Antes de la etapa de contactación con la pulpa mineral b) Después de la etapa de contactación con la pulpa mineral.	31
Figura 6. Micrografía de aglomerados cargados después de la etapa de contactación con microscopio HIRUX KH-7700.	31
Figura 7. Fotografías de los aglomerados cargados luego de su lavado utilizando diferentes soluciones desengrasantes a 70 °C: a) Agua + detergente Ariel b) Agua + detergente FAB c) Agua + detergente Dersa d) Agua + Jabón Ariel e) Agua + Jabón FAB f) Agua + Mr. Músculo g) Agua + Easy h) Agua + Woolite.	33
Figura 8. Micrografías tomadas con microscopio focal de los aglomerados, luego de su lavado, utilizando soluciones con diferentes detergentes: a) Agua + detergente Ariel b) Agua + detergente FAB c) Agua + detergente DERSA.....	34
Figura 9. Fotografía de aglomerados contactados luego de la disgregación con agitación ultrasónica durante 2 horas.....	35
Figura 10. Productos de concentración en mesa concentradora a) 10° b) 15° c) 20°.....	37
Figura 11. Distribución del oro en los productos de concentración en mesa concentradora a diferentes ángulos de inclinación.....	38

Figura 12. Recuperación de oro en los diferentes productos obtenidos con el concentrador Knelson al variarse la fuerza de la gravedad. Flujo de agua de fluidización de 3,5 L/min.	39
Figura 13. Recuperación de oro en los diferentes productos obtenidos con el concentrador Knelson utilizando tres diferentes flujos de agua de fluidización. Fuerza centrífuga aplicada igual a 60 veces la fuerza de gravedad.....	40
Figura 14. Recuperación de oro en los productos de concentración en Knelson; de las pruebas realizadas a los disgregados.	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de las pruebas realizadas a través del análisis próximo del carbón.....	28
Tabla 2. Análisis químico del mineral obtenido mediante FRX.	29
Tabla 3. Fases presentes en el mineral aurífero, identificadas mediante DRX.	30
Tabla 4. Resultados finales prueba de concentración y recirculación utilizando concentrador Knelson. Fuerza centrífuga de 60 veces la fuerza de la gravedad y flujo de agua de 2 L/min.	42

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Diferentes soluciones desengrasantes a 70 °C, utilizadas para la disgregación de aglomerados carbón-aceite-pirita mediante agitación magnética.....	51
Anexo B. Fotografías de productos de disgregación antes y después del análisis con el software Digimizer 4.3.0 (a) Con detergente Ariel, (b) Con detergente FAB.	51
Anexo C. Fotografías de concentrados obtenidos mediante el uso del concentrador Knelson con un flujo de agua de fluidización de 3,5 L/min, variando la fuerza centrífuga aplicada. a) Fuerza centrífuga de 40 veces la fuerza de la gravedad b) Fuerza centrífuga de 60 veces la fuerza de la gravedad.	52
Anexo D. Fotografías de concentrados obtenidos mediante el uso del concentrador Knelson con una fuerza centrífuga de 60 veces la fuerza de gravedad, variando los niveles de flujo de agua. a) 3.5 L/min. b) 2.8 L/min. c) 2.0 L/min.....	52

RESUMEN

TÍTULO: DISGREGACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE-PIRITA: EFECTO SOBRE SU SEPARACIÓN POR TÉCNICAS DE BENEFICIO DE MINERALES*

AUTORES: POVEDA ROJAS, Leidy Tatiana. SÁNCHEZ GARCÍA, Javier Alexis.^{1**2}

PALABRAS CLAVES: Proceso CGA, mesa concentradora, concentrador Knelson.

DESCRIPCIÓN: En la actualidad el sector minero se ve en la necesidad de implementar técnicas de recuperación de oro que disminuyan la contaminación producida por las técnicas de recuperación de oro tradicionales (cianuración). Entre estas se encuentra el proceso CGA (Coal Gold Agglomeration), el cual se fundamenta en el aprovechamiento de las propiedades fisicoquímicas del oro, mediante la formación de aglomerados elaborados con carbón y aceite, que permiten atraparlos. Luego de esto, los aglomerados carbón-aceite-oro, son calcinados para recuperar las partículas de oro adheridos en ellos. Es en esta etapa del proceso donde se presenta un restrictivo, ya que se producen gases de combustión. Por tal razón, es conveniente implementar técnicas de beneficio de minerales que permitan separar el oro de los aglomerados sin calcinarlos. Para la realización de este proyecto se utilizó carbón Bituminoso con bajo contenido de volátiles, aceite crudo de soya y mineral de la mina Reina de Oro como principales materias primas. A partir de estas, se efectuaron las etapas de formación de aglomerados y recuperación de oro del proceso CGA. Posteriormente, se realizó un lavado a los aglomerados con ayuda de agitación magnética y ultrasónica, con el objetivo de determinar las mejores soluciones desengrasantes y el mecanismo de agitación más favorable para la separación del mineral y el carbón. Seguido a esto se implementaron las técnicas de concentración gravimétricas de mesa concentradora y Concentrador Knelson como métodos de recuperación del mineral. Para la primera, se alcanzó una recuperación de oro del 80,89%, mientras que para el concentrador Knelson alrededor del 91%. Con base a esto, se concluyó que los mecanismos de concentración empleados por los equipos de concentración estudiados, fuerzas alternantes (mesa vibradora) y fuerzas centrifugas (concentrador Knelson), son favorables para obtener una buena separación entre el carbón y el mineral de oro.

*Proyecto de grado investigativo

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
Director: Ph.D. Elcy María Córdoba Tuta. Codirector: Dr. Pedro Luis Delvasto Angarita.

ABSTRACT

TITLE: DISINTEGRATION OF AGGLOMERATES CARBÓN-OIL-PIRITA: EFFECT ON THEIR SEPARATION TECHNIQUES BENEFIT OF MINERALS*

AUTHORS: POVEDA ROJAS, Leidy Tatiana. SÁNCHEZ GARCÍA, Javier Sánchez. ^{1**2}

KEYWORDS: CGA process, Concentrating table, Knelson concentrator.

DESCRIPTION: At present, the mining sector is in need of implementing gold recovery techniques that reduce the pollution produced by traditional gold recovery techniques (cyanidation). Among these is the CGA (Coal Gold Agglomeration) process, which is based on the use of the physicochemical properties of gold, through the formation of agglomerates made with coal and oil, which allow it to be trapped. After this, the coal-oil-gold agglomerates are calcined to recover the gold particles adhered thereto. It is at this stage of the process that there is a restrictive, since combustion gases are produced. For that reason, it is convenient to implement techniques of benefit of minerals that allow separating the gold of the agglomerates without calcining them. For the realization of this project Bituminous coal with low volatile content, crude oil of soybean and mineral of the Reina de Oro mine as main raw materials were used. From these, the steps of formation of agglomerates and gold recovery of the CGA process were carried out. Subsequently, the agglomerates were washed with magnetic and ultrasonic agitation, in order to determine the best degreasing solutions and the most favorable stirring mechanism for mineral and coal separation. Following this, concentrate concentrating techniques and Knelson concentrator gravimetric techniques were implemented as mineral recovery methods. For the first, a gold recovery of 80.89% was achieved, while for the Knelson concentrator around 91%. Based on this, it was concluded that the concentration mechanisms used by the studied equipment, alternating forces (vibrating table) and centrifugal forces (Knelson concentrator), are favorable to obtain a good separation between the coal and the gold ore.

*Degree project (investigative)

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
Adviser: Ph.D. Elcy María Córdoba Tuta. Adviser: Ph.D. Pedro Luis Delvasto Angarita.

INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos, la urgente disminución de la contaminación ambiental provocada por la minería aurífera, ha generado la búsqueda continua de procesos alternativos a los tradicionales (cianuración y amalgamación) para la recuperación del oro, los cuales sean capaces de disminuir considerablemente el impacto que estos desechos tóxicos generan.

Así pues, como respuesta a esta necesidad, surge el proceso CGA (Coal-Gold Agglomeration) un método no lixivante fundamentado en el aprovechamiento de las propiedades fisicoquímicas superficiales, principalmente las propiedades hidrofóbicas y oleofílicas de las partículas de oro que serán atrapadas por aglomerados carbón-aceite al ser puestos en contacto mediante agitación mecánica con una pulpa mineral aurífera. Posteriormente, los aglomerados cargados son calcinados y las cenizas resultantes fundidas para así lograr la recuperación de las partículas de oro [1].

No obstante, en la última etapa del proceso aparece su gran limitante debido a que la calcinación de los aglomerados necesaria para liberar las partículas de oro trae consigo la presencia de gases de combustión (CO y CO_2), convirtiéndose así en otra forma de contaminación ambiental. Por este motivo, se requiere implementar nuevas técnicas amigables con el ambiente que permitan separar el oro de los aglomerados, eliminando así la etapa de combustión y, por ende, la presencia de gases contaminantes.

Con base en lo anterior, la finalidad de este proyecto de grado fue implementar técnicas de beneficio de minerales que sustituyan la etapa final de incineración de los aglomerados carbón-aceite-oro. En específico, se analizaron el efecto de la disgregación de los aglomerados CGA sobre la eficiencia de la separación de las partículas de oro presentes en ellos, haciendo uso de técnicas metalúrgicas de concentración gravimétricas; evitando de esta manera la problemática anterior.

1 OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar técnicas de beneficio de minerales que reemplacen la etapa de calcinación de los aglomerados cargados, para la recuperación de oro mediante el proceso CGA.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Obtener los aglomerados cargados CGA utilizando materias primas previamente establecidas.
- Determinar la viabilidad del uso de agitación magnética o ultrasónica, en la etapa de disgregación de los aglomerados cargados empleando diferentes soluciones desengrasantes.
- Evaluar la eficiencia de cada uno de los métodos de concentración gravimétrica utilizados para la recuperación de las partículas de oro de los aglomerados disgregados anteriormente.

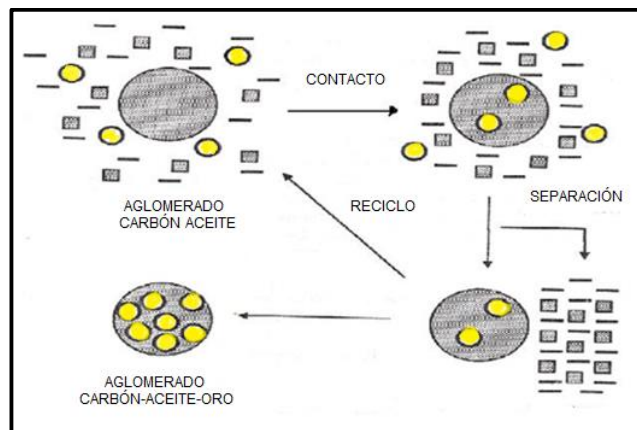
2. ANTECEDENTES

2.1. PROCESO DE AGLOMERACIÓN DE ORO CON CARBÓN

En 1988, House y colaboradores [2], publicaron una investigación realizada por la British Oil y la compañía de minerales Australiana BP, dentro de la cual se desarrolló un nuevo proceso para la recuperación de oro a partir del contacto entre suspensiones de mineral y aglomerados formados de carbón y aceite, al cual llamaron *Coal Gold Agglomeration (CGA)*; esto con la finalidad de evitar el uso de las técnicas tradicionales de cianuración y amalgamación con mercurio.

El proceso CGA, usa como principio básico la fisicoquímica de superficies, centrándose en las características hidrofóbicas y oleofílicas de las partículas de oro. El proceso inicia al poner en contacto los aglomerados de carbón-aceite con la pulpa mineral que contiene las partículas de oro a extraer. Estas últimas se adhieren a la superficie del carbón luego de una continua agitación hasta el punto en donde los aglomerados quedan lo suficientemente cargados de oro [1,3]. En la Figura 1, se presenta el esquema de recuperación de oro mediante este proceso.

Figura 1. Diagrama esquemático de la formación de aglomerados en el proceso CGA.



Fuente: Recuperación de oro libre mediante su aglomeración con un agregado carbón-aceite [4].

2.1.1. Etapas del proceso CGA. Las etapas del proceso CGA se detallan a continuación.

Formación de los aglomerados carbón-aceite: La aglomeración esférica es una técnica de unión de partículas en un medio con dos líquidos inmiscibles. Para el caso del proceso CGA el agua actúa como medio continuo, mientras que el aceite hace de puente líquido entre las partículas de carbón y de oro [1]. Una de las variables operacionales más influyentes en esta etapa es el tipo de carbón. Debido a sus propiedades fisicoquímicas los carbones con alto porcentaje de carbono fijo tienen mayor capacidad para formar aglomerados [3, 5]. Otro aspecto importante es el tipo de aceite; en estos las buenas propiedades aglomerantes están asociadas al largo de la cadena de átomos de carbono, por lo cual se sugiere el uso de aceites sin refinamiento, de alta viscosidad y con largas cadenas de átomos de carbono como los aceites vegetales crudos [1, 6]. Por otra parte, variables como el porcentaje de sólidos en la pulpa, la relación aceite-carbón, la velocidad y el tiempo de agitación influyen de manera significativa en la forma, tamaño y resistencia de los aglomerados [7].

Extracción del oro de la pulpa mineral: En esta etapa se ponen en contacto los aglomerados de carbón-aceite previamente formados con la pulpa de mineral aurífero. Así, luego de un determinado tiempo de agitación mecánica, las partículas de oro se adhieren a la superficie del carbón. Las variables más importantes en esta etapa son el porcentaje de sólidos en la pulpa, la cantidad de acondicionante, el tiempo de acondicionamiento, la relación en peso aglomerados/mineral y el tiempo de contactación [1, 3]. Cabe destacar que el proceso de adhesión de las partículas de oro mejora con la presencia de colectores; X.Q. Wu y colaboradores [8] concluyeron que en esta etapa de contactación el uso de colectores mejoraba la eficiencia del proceso y variaba según la cantidad adicionada y el tiempo de acondicionamiento con el mineral. Por otra parte, E.M Córdoba [1] concluyó que el tamaño apropiado de los aglomerados carbón-aceite para la etapa de contactación varía según el tipo de mineral evaluado.

Calcinación de los aglomerados cargados con oro: El oro atrapado en los aglomerados de carbón-aceite es recuperado por medio de la fusión de las cenizas de calcinación de los aglomerados cargados. Como se mencionó anteriormente, la quema de los aglomerados trae consigo afectaciones ambientales debido a los gases tóxicos liberados durante la combustión del carbón, por lo que resulta de interés implementar técnicas que no vinculen la quema del carbón manteniendo una buena eficiencia en la recuperación del metal precioso [10].

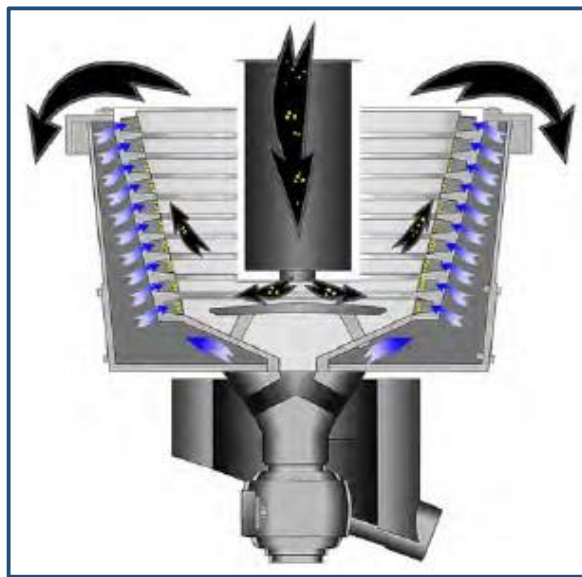
2.2. TÉCNICAS ALTERNATIVAS DE SEPARACIÓN CARBÓN-MINERAL

La diferencia de densidades entre el carbón y las partículas de oro permiten plantear la hipótesis que es posible reemplazar la etapa de calcinación de los aglomerados cargados mediante la implementación de técnicas de concentración gravimétrica de minerales [9] que permitan la separación de las partículas de oro y carbón, luego de la disgregación de los aglomerados. Teniendo en cuenta los equipos disponibles en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS, en el presente proyecto se planteó evaluar la eficiencia de la mesa concentradora y del concentrador Knelson para el fin antes descrito.

2.2.1. Concentración gravimétrica por mesa concentradora. En un estudio previo [10], se determinó que el uso de fuerzas alternantes, como las involucradas en la mesa Wilfley, favorece la separación gravitacional del carbón y el mineral rico en oro, alcanzándose recuperaciones cercanas al 88%, razón por la cual esta técnica se establece como un método ambientalmente amigable para la recuperación del oro de los aglomerados en el proceso CGA, reemplazando la etapa final de quema de aglomerados cargados. Sin embargo, en tal trabajo se encontró que una importante limitante de los métodos de separación gravimétrica es la dificultad para lograr la completa disgregación de los aglomerados, problema que se intentó solucionar en el presente proyecto.

2.2.2. Concentrador gravimétrico Knelson. En este proceso de concentración es posible recuperar partículas de oro de tamaños que van desde $\frac{1}{4}$ " hasta aproximadamente un micrón, debido a la fuerza centrífuga en el cono perforado de anillos internos que gira a gran velocidad (60 veces la fuerza de la gravedad). Además, posee una elevada capacidad de procesamiento y sus costos de operación y manutención son relativamente bajos [11]. En la Figura 2, se muestra el esquema interno del concentrador gravimétrico Knelson.

Figura 2. Esquema básico del funcionamiento de un concentrador Knelson.



Fuente: Manual de usuario concentrador Knelson Modelo KC-MD3 [12].

En este equipo; el porcentaje de sólidos, el flujo de agua de fluidización, la granulometría de las partículas y la duración del ciclo de concentración, son las variables que mayor influencia tienen en los resultados finales de concentración [13].

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología experimental empleada para el desarrollo de la investigación estuvo compuesta por tres etapas las cuales se describen a continuación.

3.1. OBTENCIÓN DE AGLOMERADOS CARGADOS CON PIRITA.

Esta etapa se fundamentó en la formación de los aglomerados contactados del proceso CGA utilizando como materias primas carbón mineral del Cerrito y aceite crudo de soya, los cuales presentan características y propiedades esenciales en el proceso de aglomeración. Además, se empleó un mineral concentrado de la mina Reina de Oro del departamento de Santander. Vale la pena aclarar que dadas las similitudes en las propiedades físico-químicas del oro y de la pirita, y teniendo en cuenta el alto costo del metal precioso, se decidió trabajar con un concentrado aurífero pirítico, en lugar de partículas de oro puras.

3.1.1. Preparación y caracterización de los materiales usados en la investigación. Se redujo el tamaño del mineral aurífero y del carbón, con el fin de que el primero presentara una granulometría de 100% -400 μm , y el carbón una granulometría -250+75 μm . Esto fue llevado a cabo mediante la secuencia molino de bolas – clasificación en tamices. Seguido de esto, se realizó un análisis granulométrico de las dos materias primas [14], a partir de una muestra representativa de 100 g de cada material, con el propósito de determinar la distribución de los tamaños de partículas presentes en ellas.

Posteriormente, mediante análisis por las técnicas de fluorescencia (FRX) y difracción de rayos X (DRX) realizadas al mineral, se determinó la composición química y mineralógica del mismo y, a través de la técnica de ensayo al fuego [15], se establecieron los tenores de oro y plata. De igual forma, a partir de los resultados obtenidos en la investigación realizada por D. Montoya y colaboradores [16], paralelamente a este trabajo, se clasificó el mineral de la mina Reina de Oro como “medianamente lixiviable”; esto debido a que cerca del 18% del oro presente en el mineral se encuentra asociado a sulfuros, especialmente pirita. Por otra

parte, se realizó análisis próximo del carbón, en base a la norma ASTM D-388 [17], con el fin de establecer su rango, según el porcentaje de carbono fijo presente en él.

3.1.2. Formación de aglomerados cargados. Inicialmente, se produjo una emulsión agua-aceite, mezclando mediante agitación mecánica 500 mL de agua y 15 g de aceite crudo de soya, a una velocidad de 2000 rpm durante 5 minutos. Pasado este tiempo y de manera ininterrumpida, se adicionaron 50 g de carbón a dicha emulsión y se continuó con la misma velocidad de agitación por 10 minutos más, dando como resultado los aglomerados carbón-aceite que luego se separaron con ayuda de un tamiz. A continuación, se formó una pulpa mineral acondicionada, mezclando 250 mL de agua, 50 g de mineral y 100 µl de colector (PROMOTER AEROFLOAT 208 acuoso) mediante agitación mecánica durante 5 minutos a una velocidad de 600 rpm. Luego, esta pulpa fue puesta en contacto con 50 g de aglomerados continuando con la misma agitación durante 45 minutos más, con el fin de que las partículas de oro se adhirieran a la superficie de los aglomerados. Finalmente, los aglomerados cargados con pirita-oro se mantuvieron sumergidos en agua hasta proceder con las pruebas de disgregación de los mismos.

3.2. EVALUACIÓN DE LA DISGREGACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE-PIRITA(ORO)

Después de terminada la etapa de contactación, los aglomerados cargados fueron sometidos a disgregación mediante agitación tanto magnética como ultrasónica, con el propósito de eliminar el puente líquido (aceite), y así conseguir la separación entre las partículas de carbón y aceite.

3.2.1. Disgregación de aglomerados cargados mediante agitación magnética, con ayuda de diferentes sustancias desengrasantes. Para esto, se llevó a cabo un lavado de los aglomerados cargados con diferentes soluciones desengrasantes (anexo A). Los desengrasantes utilizados en la preparación de estas soluciones fueron: Detergentes en polvo

FAB, Ariel y DERSA; detergentes líquidos FAB, Ariel y Woolite; Easy off Bang y Mr Musculo.

El procedimiento experimental consistió en tomar los aglomerados cargados formados en la etapa anterior (85 g) y adicionarlos a 200mL de la solución desengrasante. Esta mezcla se sometió a agitación magnética (1500 rpm) durante un tiempo de dos horas, manteniendo una temperatura de 70°C. Posteriormente, de manera visual se analizó cada uno de los productos obtenidos con cada solución desengrasante y aquellos que presentaron una buena separación, fueron analizados con ayuda de un microscopio con focal HIROX KH-7700. Las micrografías obtenidas fueron procesadas mediante el software de análisis de imágenes Digimizer 4.3.0, lo que permitió evaluar de forma cuantitativa los productos de disgregación obtenidos con las soluciones de los detergentes que generaron mayor separación entre el carbón y el mineral, con el propósito de seleccionar el más efectivo para tal fin.

3.2.2. Disgregación de aglomerados cargados mediante agitación ultrasónica. Partiendo de los resultados obtenidos anteriormente, se utilizó la solución desengrasante que permitió la mejor separación para realizar la disgregación utilizando un baño ultrasónico Elma E30H. Para esto, se mezclaron los aglomerados cargados (85g) con 200 mL de solución desengrasante y se sometieron al baño ultrasónico durante 2 horas a una frecuencia de ultrasonido de 37 KHz, manteniendo la temperatura de la solución a 70°C. Finalmente los resultados obtenidos fueron analizados visualmente, determinando la viabilidad de este método de agitación para la disgregación de los aglomerados.

3.3. ESTUDIO DE VARIABLES EN LA SEPARACIÓN DE LAS PARTÍCULAS MINERALES DEL CARBÓN

Los disgregados que presentaron la mejor separación de las partículas minerales del carbón, obtenidos en el proceso anterior, fueron sometidos a las siguientes pruebas de concentración gravimétrica, con el fin de recuperar las partículas minerales ricas en oro.

3.3.1. Concentración usando mesa concentradora. Este equipo de concentración gravimétrica se utilizó como técnica alternativa, porque genera movimientos longitudinales vibratorios sobre las partículas de los disgregados, ocasionando que estas se separen según su densidad específica y así, determinar qué tan favorable puede ser la recuperación mediante esta técnica. Con base en esto, se trabajó manteniendo constantes las variables operacionales del equipo, con excepción del ángulo de inclinación, el cual fue la variable de estudio, tomando los valores de 10°, 15°, y 20°. Para esto, se agregó la pulpa de disgregados obtenida en la etapa anterior y se procedió a analizar la influencia de los diferentes ángulos de inclinación sobre los productos alcanzados. Posteriormente, se tomó cada uno de los productos obtenidos y se le realizó un ensayo al fuego para determinar la recuperación de oro y de esta manera determinar el ángulo con el cual se obtuvieron los mejores resultados.

3.3.2. Concentración usando concentrador Knelson. Inicialmente se establecieron las mejores condiciones de operación del concentrador, evaluando el efecto producido tanto por el flujo de agua de fluidización como el de la fuerza de gravedad aplicada sobre la separación de las partículas disgregadas de carbón y mineral. Con base en esto, se realizó una mezcla sintética con la misma relación de carbón y mineral presente en los disgregados para efectuar los diferentes ensayos, los cuales se realizaron agregando 200 g de esta mezcla al concentrador durante 1 minuto.

Efecto de la fuerza de gravedad aplicada. Para la evaluación de este parámetro se mantuvo constante el flujo de agua de fluidización (3.5 L/min) y se varió entre 10, 40 y 60 veces la fuerza de la gravedad aplicada para realizar los ensayos de concentración. Las colas y los concentrados obtenidos fueron analizados visualmente y por ensayo al fuego con el fin de determinar la recuperación y eficiencia del proceso.

Efecto del flujo de agua de fluidización. Una vez determinado el valor de la fuerza de gravedad con la que se obtienen mejores resultados, se tomó este valor como constante y se procedió a evaluar el efecto de la cantidad de flujo de agua que entra en el equipo, seleccionando los siguientes niveles: alto (3.5 L/min), medio (2.8 L/min) y bajo (2.0 L/min).

Finalizado cada ensayo, se analizó mediante inspección visual cada producto y se determinó el nivel de la variable con la cual se obtuvo los mejores resultados. Además, con el fin de confirmar estos resultados, se realizó un ensayo al fuego a cada uno de los productos obtenidos. De esta forma, se logró determinar las condiciones de operación adecuadas para obtener buenos resultados y permitir su posterior repetitividad utilizando el concentrador Knelson. De este modo, con las mejores condiciones preestablecidas para el uso este equipo, se realizó un ensayo con 200 gramos de la pulpa de disgregados obtenidos en la etapa anterior. Adicionalmente, se recirculó el concentrado y colas por separado, para determinar el efecto de esto sobre la limpieza de estos productos y, además la eficiencia del proceso.

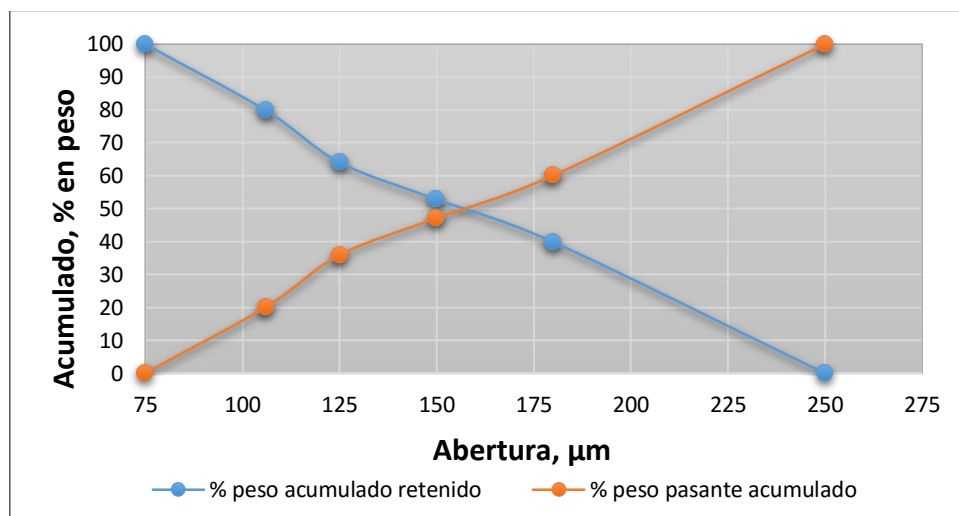
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. OBTENCIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE CARGADOS CON PIRITA

4.1.1. Preparación y caracterización de los materiales usados en la investigación.

Estudios previos [10] determinaron que la presencia de carbón demasiado fino afectaba los resultados alcanzados en la etapa de disgregación, ya que los productos resultantes evidenciaban partículas finas de carbón aún adheridas sobre la superficie de partículas de pirita. Por tal motivo, durante esta etapa de la investigación se dispuso a eliminar las partículas muy finas del carbón para la formación de aglomerados, trabajándose con un carbón de granulometría $-250 +75 \mu\text{m}$, el cual presenta un D50 aproximado de $160 \mu\text{m}$, como se evidencia en la Figura 3.

Figura 3. Distribución granulométrica del carbón del Cerrito luego de su conminución.



En la Tabla 1 se presentan los resultados del análisis próximo realizado al carbón, según el cual se clasificó como bituminoso bajo en volátiles [17]. Este carbón contiene 71.32% de carbono fijo y 10.55% de cenizas, presentando capacidad aglomerante con el aceite [1].

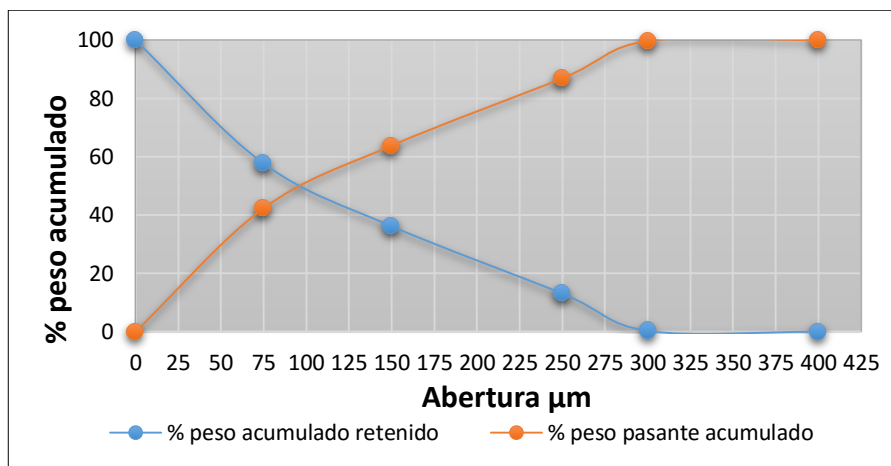
Tabla 1. Resultados de las pruebas realizadas a través del análisis próximo del carbón.

PROPIEDADES	
Humedad (%)	3,22
Cenizas (%)	10,55
Material volátil (%)	14,91
Carbono fijo (%)	71,32
Índice de hinchamiento	0
Poder calorífico (Btu/lb)	11.676,97
Azufre total (%)	0,58
Clasificación del carbón por rango	Bituminoso bajo en volátiles

En el caso del mineral, la reducción de tamaño de partícula se realizó con el fin de aumentar el grado de liberación de la pirita y conseguir así un tamaño óptimo de estas partículas (1 a 500 μm) para que así fuese más sencillo que el aglomerado de carbón-aceite las atrapara en su superficie [1, 3, 7].

Al observar la distribución granulométrica del mineral, presentada en la Figura 4 y compararla con la distribución granulométrica del carbón (Figura 3) se evidenció que el tamaño de partícula del carbón era más grueso que el del mineral, facilitando que las partículas de oro se adhirieran a la superficie del carbón en el proceso de contactación del proceso CGA [3].

Figura 4. Distribución granulométrica del mineral de la mina Reina de Oro.



El análisis químico por fluorescencia de rayos X realizado al mineral se muestra en la Tabla 2. En este se destaca la presencia de elementos como el S, As, Si, P, Cu y Zn, los cuales pueden formar asociaciones que afectan la extracción de oro, por el método de cianuración [16]. Igualmente, el alto contenido de Fe y S en el mineral, evidencia que el sulfuro de hierro puede ser uno de sus constituyentes mayoritarios.

Tabla 2. Análisis químico del mineral obtenido mediante FRX.

Elemento	Fe	S	Si	Al	K
Concentración (%)	20,63	18,99	7,24	2,33	0,86

Elemento	Ti	P	Zn	Ca	Pb
Concentración (%)	0,20	0,19	0,11	0,11	0,08

Elemento	As	Mg	Mn	Cu
Concentración (%)	0,25	0,20	0,04	0,04

Según el análisis cuantitativo del mineral por DRX presentado en la Tabla 3, se ratificó que la pirita (FeS_2) es uno de los principales constituyentes del mineral.

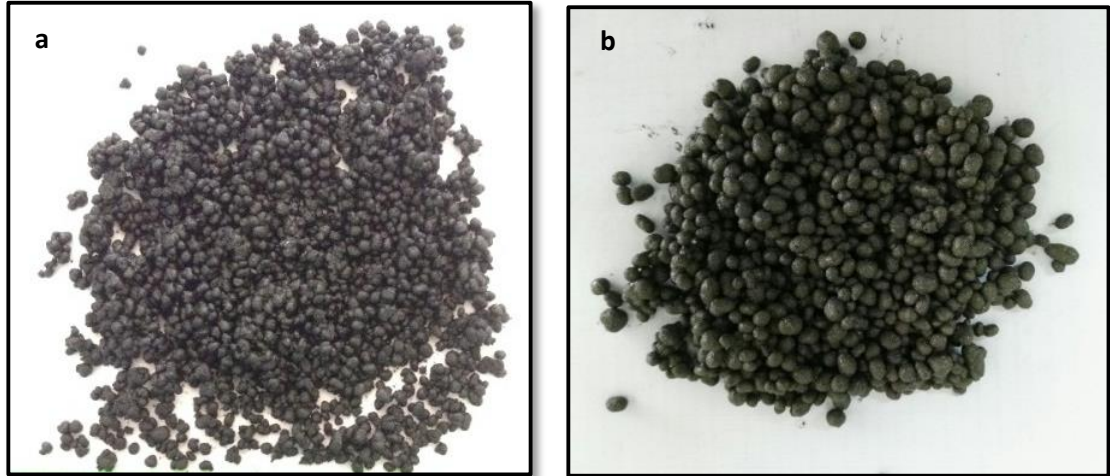
Tabla 3. Fases presentes en el mineral aurífero, identificadas mediante DRX.

Fase identificada		Nombre	Cuantitativo
Cristalino	Fórmula química		
	FeS_2	Pirita	13,2%
	SiO_2	Cuarzo	7,1%
	FeS_2	Marcasita	1,7%
	$KAl_{2,9}Si_{3,1}O_{10}(OH)_2$	Moscovita-2M	5,0%
	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	Caolinita	No cuantificable
	$MgAl_2(PO_4)_2(OH)_2$	Lazulita	1,3%
	$(K_{0,92}Na_{0,08})(Mg_{1,62}Fe_{1,23}Ti_{0,09})(Al_{1,02}Si_{2,98})O_{10}((OH)_{0,9}F_{1,1})$	Flogopita	No cuantificable
Total Cristalino			28,3%
Amorfos y otros			71,7%

Los tenores del mineral obtenidos a través del ensayo al fuego fueron 273,7 g/ton y 171 g/ton de oro y plata respectivamente.

4.1.2. Formación de aglomerados cargados. En la Figura 5 se muestra la apariencia de los aglomerados sin cargar (Figura 5a) y los aglomerados después de la etapa de contactación (Figura 5b). Para el caso de la Figura 5a se puede apreciar que los aglomerados formados presentaron un tamaño favorable (aproximadamente 2mm) y forma esférica uniforme [1]. Además, se observa que luego de cargados, estos toman un color dorado y un aumento de tamaño debido a la adhesión de las partículas piríticas del mineral sobre la superficie del aglomerado.

Figura 5. Fotografías de aglomerados carbón-aceite a) Antes de la etapa de contactación con la pulpa mineral b) Después de la etapa de contactación con la pulpa mineral.



En la Figura 6, se muestra la forma cómo están adheridas las partículas de mineral a la superficie del aglomerado. En la micrografía se evidencia que los aglomerados están prácticamente recubiertos en su totalidad por las partículas de mineral.

Figura 6. Micrografía de aglomerados cargados después de la etapa de contactación con microscopio HIRUX KH-7700.



Con base en los resultados anteriores (Figura 5 y 6), se determinó que al eliminarse las partículas de carbón con tamaños inferiores a 75 μm no se ven afectadas las etapas de formación de aglomerados carbón-aceite y de contactación de los mismos con la pulpa mineral.

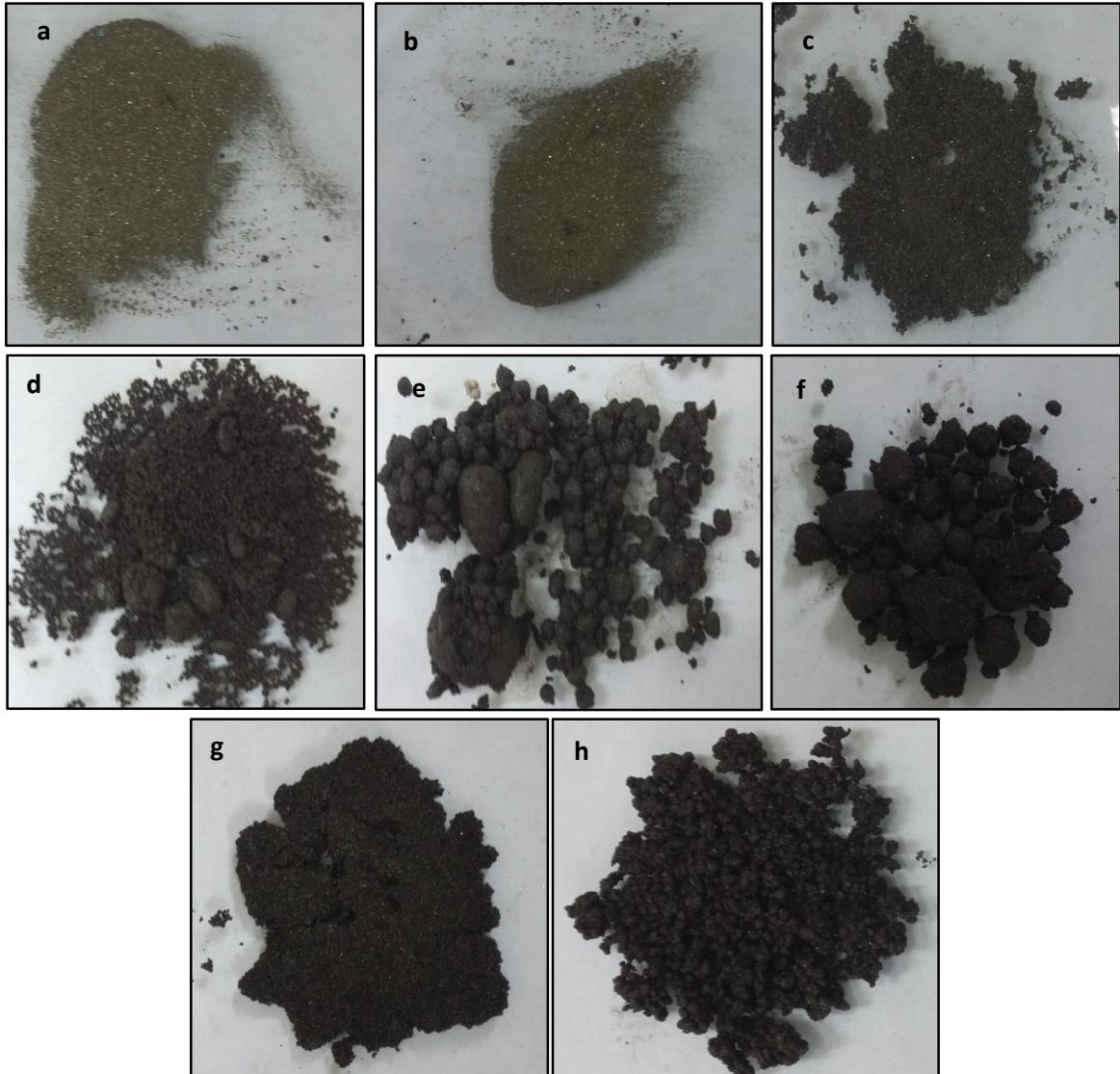
Posteriormente, mediante el ensayo al fuego de los aglomerados cargados se determinó que la recuperación de oro bajo las condiciones del estudio estuvo alrededor del 95% reafirmando así que, pese a que fueron eliminadas las partículas finas del carbón utilizado en el proceso, este exhibía un comportamiento apropiado para la recuperación de las partículas hidrofóbicas/oleofílicas presentes en el mineral [1, 2, 3].

4.2. EVALUACIÓN DE LA DISGREGACIÓN DE AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE-PIRITA

4.2.1. Disgregación de aglomerados cargados mediante agitación magnética, con ayuda de diferentes sustancias desengrasantes. Investigaciones previas [10] permitieron establecer que tanto el aumento de la temperatura (hasta 70 °C), como el tiempo de disgregación (durante 2 horas) causaban un efecto favorable en la disgregación de los aglomerados contactados al utilizarse una solución con detergente. Teniendo en cuenta esto se analizó el efecto de ocho diferentes soluciones desengrasantes sobre la disgregación de los aglomerados cargados. Las soluciones se detallan en el anexo I.

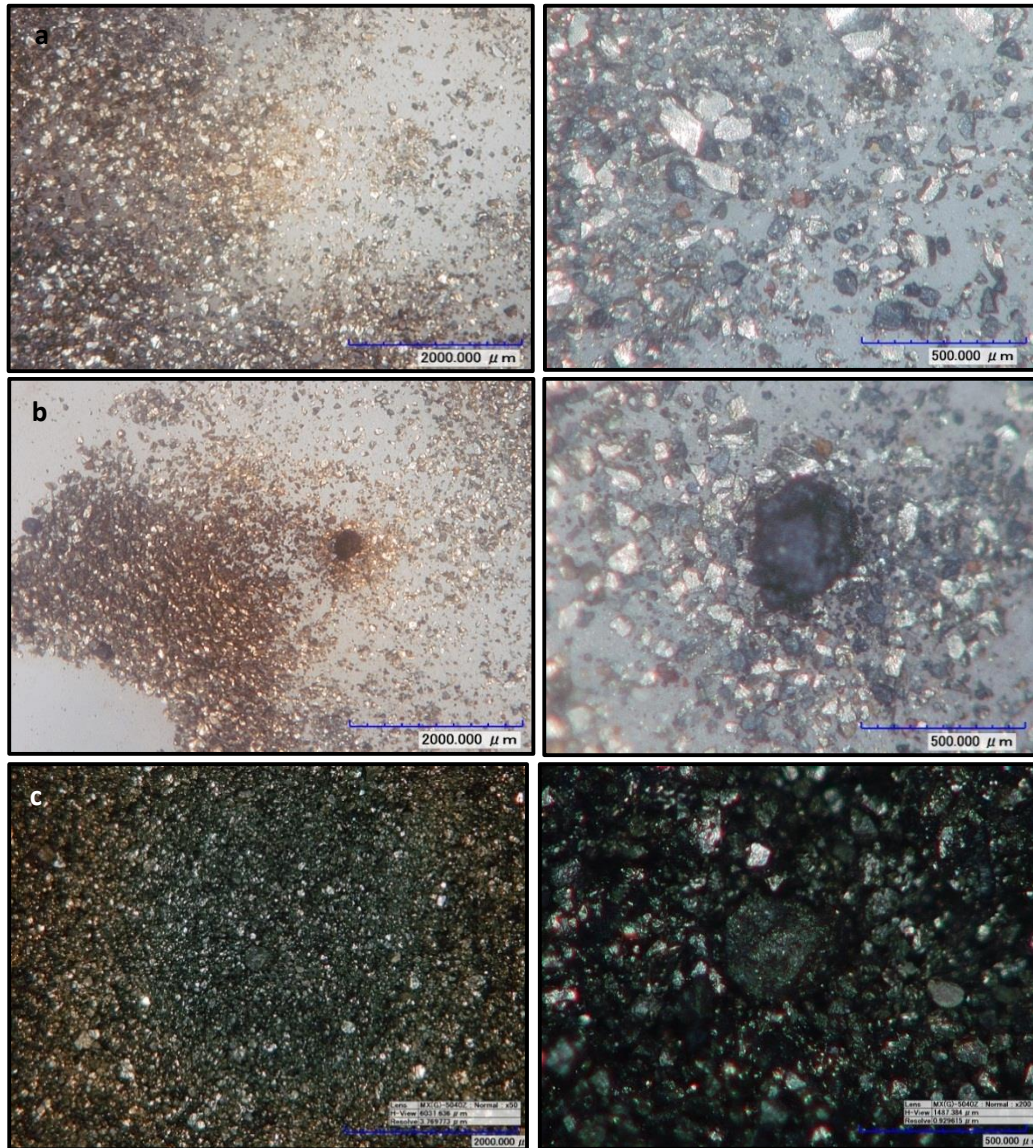
Los resultados presentados en la Figura 7, obtenidos mediante el uso agitación magnética, permiten demostrar visualmente que las soluciones de agua con detergentes líquidos Easy of Bang y Mr. Músculo no causaron un efecto favorable en la remoción del aceite ya que luego de terminado el tiempo del ensayo aún se observaron aglomerados formados, mostrando una mala separación entre el carbón y el mineral. Esto se debe a que los detergentes líquidos no incluyen en su fórmula ciertas sustancias limpiadoras eficaces, como Antical y agentes blanqueadores, ya que son muy contaminantes. Con base en esto, tales soluciones fueron descartadas en evaluaciones subsiguientes.

Figura 7. Fotografías de los aglomerados cargados luego de su lavado utilizando diferentes soluciones desengrasantes a 70 °C: **a)** Agua + detergente Ariel **b)** Agua + detergente FAB **c)** Agua + detergente Dersa **d)** Agua + Jabón Ariel **e)** Agua + Jabón FAB **f)** Agua + Mr. Músculo **g)** Agua + Easy **h)** Agua + Woolite.



En las siguientes microfotografías se muestran de manera más detallada los productos de disgregación obtenidos mediante la agitación magnética, utilizando las soluciones desengrasantes con detergentes en polvo.

Figura 8. Micrografías tomadas con microscopio focal de los aglomerados, luego de su lavado, utilizando soluciones con diferentes detergentes: **a)** Agua + detergente Ariel **b)** Agua + detergente FAB **c)** Agua + detergente DERSA.



Las micrografías mostradas en la Figura 8 permiten evidenciar que la separación entre el carbón y el mineral por medio de agitación magnética es prácticamente total al utilizar como medios disgregantes las soluciones con detergentes FAB y Ariel, mientras que para el detergente DERSA (Micrografías 8-c) no se presentó una separación tan satisfactoria.

Posteriormente, a partir de micrografías tomadas (Anexo B) con el microscopio estereoscopio OLYMPUS SZ51 a muestras de disgregados, tanto de detergente FAB como de Ariel, se cuantificó la presencia de cada especie mediante el software de análisis de imágenes Digimizer 4.3.0. De esta manera, se determinó que la solución desengrasante con detergente Ariel en polvo (Anexo B-a) presentaba la disgregación más eficiente ya que, al analizar estas muestras de disgregados, se evidenció la presencia de menores cantidades de carbón (aproximadamente un 19%) en comparación con el 35% las muestras de FAB.

4.2.2. Disgregación de aglomerados cargados mediante agitación ultrasónica.

Conociendo los resultados del ítem anterior, se procedió a combinar el efecto de la solución con detergente Ariel en polvo con la acción de la agitación ultrasónica manteniendo la temperatura a 70 ° C, para eliminar el aceite crudo de soya, con el objetivo de determinar si esta sería un mecanismo viable para la disgregación de los aglomerados cargados. En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos luego de dos horas de disgregación.

Figura 9. Fotografía de aglomerados contactados luego de la disgregación con agitación ultrasónica durante 2 horas.



De acuerdo a los resultados obtenidos al implementar la agitación ultrasónica, se puede concluir que este no es un método eficiente de disgregación ya que luego de transcurrido el tiempo de la prueba, aún se evidencia la presencia de algunos aglomerados formados, lo cual

indica que mediante este mecanismo (agitación ultrasónica + agua + detergente en polvo a 70 °C) no se logró eliminar por completo los puentes líquidos de aceite crudo de soya presente en los aglomerados. Esto se debe a que la frecuencia de onda ultrasónica (37KHz) emitida por el equipo utilizado es demasiado baja para lograr eliminar el aceite.

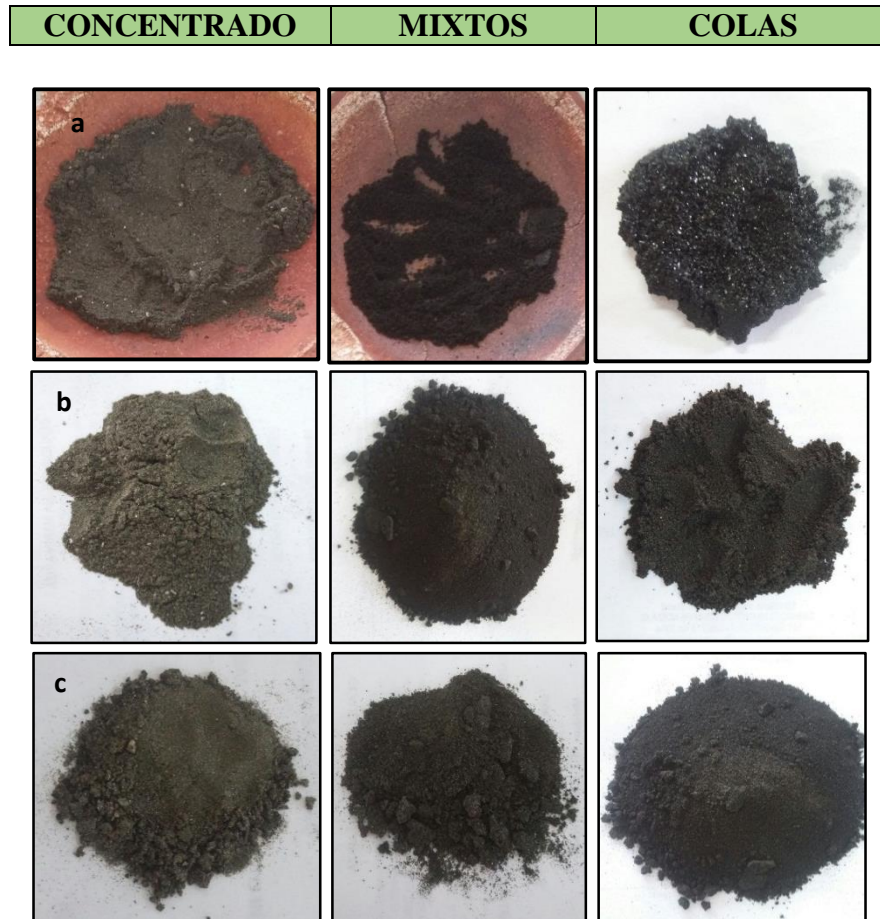
Con base en todo lo anterior, se evidenció que con el lavado mediante agitación magnética de los aglomerados con la solución agua + detergente Ariel en polvo a 70°C durante 2 horas, se consigue la disgregación prácticamente completa de las partículas de los aglomerados cargados. Por tal motivo, se seleccionó este mecanismo como el más adecuado para la disgregación de los aglomerados antes de las pruebas de concentración.

4.3. ESTUDIO DE VARIABLES EN LA SEPARACIÓN DE LAS PARTÍCULAS MINERALES DEL CARBÓN

4.3.1. Concentración gravimétrica por mesa concentradora. Para estas pruebas de concentración, se utilizaron alrededor de 180 g de aglomerados disgregados durante 2 horas con la solución agua + detergente Ariel a 70 °C, variando únicamente el ángulo de inclinación.

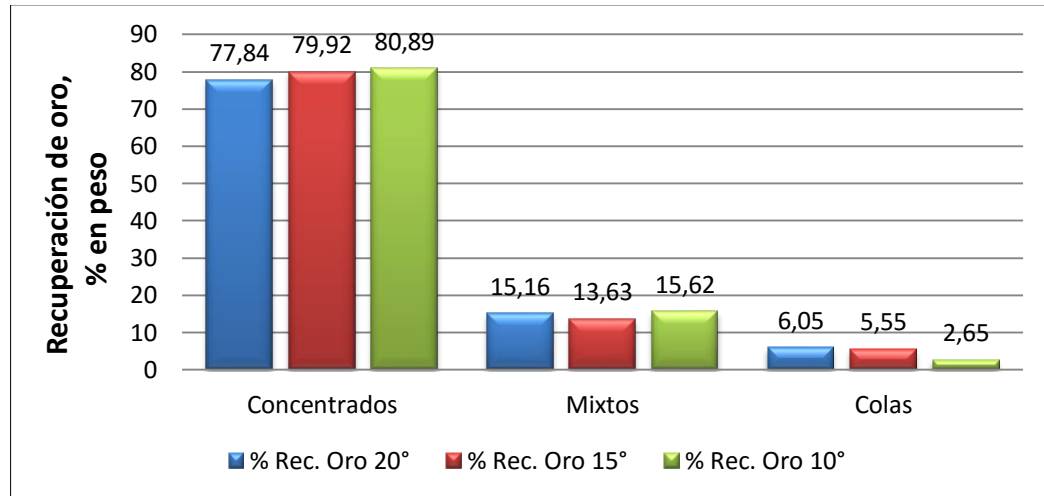
Efecto de la variación del ángulo de inclinación. La Figura 10 muestra el efecto del ángulo de inclinación sobre la distribución del mineral en los diversos productos de concentración. Los resultados visuales evidencian una mejor recuperación de mineral utilizando un ángulo de 10°, donde se aprecia tanto en mixtos como en colas poca presencia de mineral, mientras que, para el ángulo de 20° la presencia de mineral en mixtos y colas es un poco más notorio.

Figura 10. Productos de concentración en mesa concentradora a) 10° b) 15° c) 20°.



Los resultados de la distribución del oro en los productos de concentración obtenidos por ensayo al fuego, se muestran en la Figura 11. Estos reafirman que el mayor porcentaje de recuperación de oro se obtiene con un ángulo de 10° (80,89%) y el menor porcentaje en el ángulo de 20° (77,84%). También se evidencia que a medida que aumenta el ángulo de inclinación se disminuye la selectividad del proceso haciendo que la cantidad de mineral aurífero presente en las colas aumente, debido a que a mayores ángulos de inclinación de la mesa se genera un mayor arrastre de mineral por las partículas más livianas de carbón [18, 19].

Figura 11. Distribución del oro en los productos de concentración en mesa concentradora a diferentes ángulos de inclinación.

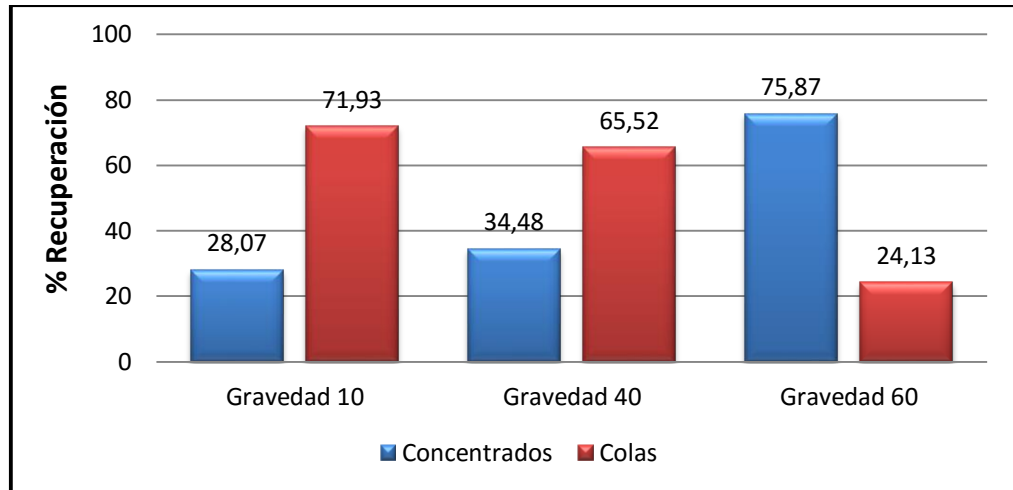


4.3.2. Concentración usando concentrador Knelson. Los resultados obtenidos luego finalizar la etapa de concentración utilizando el concentrador Knelson se muestran a continuación.

Efecto de la fuerza de gravedad aplicada. Para esto, se dejó un flujo de agua de fluidización constante igual a 3,5 L/min. y se procedió a evaluar el efecto de variación de la fuerza de gravedad aplicada. En el anexo C, se muestra los concentrados obtenidos mediante estos ensayos, los cuales evidencian que el aumento de la fuerza de la gravedad favorece la recuperación de mineral, ya que, al aumentar el nivel de esta variable, se obtuvo un concentrado mucho más limpio, aumentando así la cantidad de mineral aurífero presente en este.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos al fuego realizados a los productos obtenidos mediante la concentración con el concentrador Knelson, al variarse la fuerza de la gravedad aplicada al equipo.

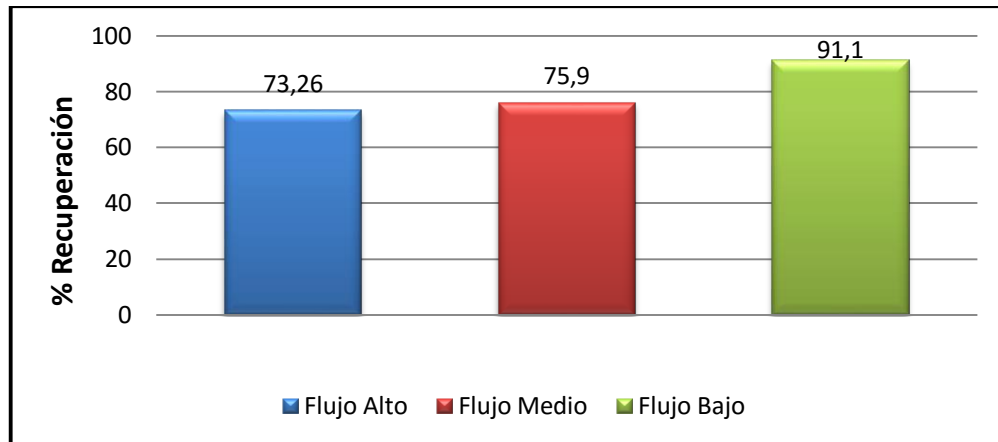
Figura 12. Recuperación de oro en los diferentes productos obtenidos con el concentrador Knelson al variarse la fuerza de la gravedad. Flujo de agua de fluidización de 3,5 L/min.



En los resultados mostrados en la Figura 12 se observa que el aumento de la fuerza centrífuga a 60 veces la fuerza de la gravedad, genera un incremento en la recuperación de oro, permitiendo obtener un valor máximo del 75,87%. Esto se debe, a que a medida que se aumenta la fuerza de gravedad aplicada al concentrador centrífugo, se genera un incremento en la diferencia de peso entre las partículas de pirita y carbón, por lo cual, las partículas más pesadas (pirita-oro) son separadas con mayor facilidad de las más livianas (carbón).

Efecto del flujo de agua de fluidización. Con base a los resultados obtenidos anteriormente, para esta segunda parte, se trabajó manteniendo una fuerza centrífuga igual a 60 veces la fuerza de la gravedad y variando el flujo de agua de fluidización con valores de 2.0, 2.8 y 3.5 L/min. En el anexo D, se muestran los concentrados obtenidos a los diversos niveles de agua de fluidización evaluados.

Figura 13. Recuperación de oro en los diferentes productos obtenidos con el concentrador Knelson utilizando tres diferentes flujos de agua de fluidización. Fuerza centrífuga aplicada igual a 60 veces la fuerza de gravedad.

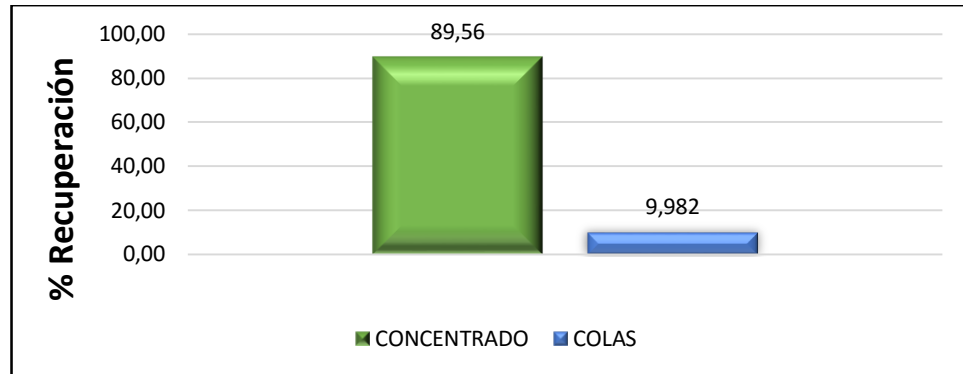


En los resultados mostrados en la Figura 13, se observa que la recuperación de mineral aurífero en el concentrado disminuye cuando el flujo de agua es incrementado. Esto se debe a que el incremento del flujo de agua de fluidización genera que una parte del mineral aurífero (partículas más finas) sea arrastrado hacia las colas, como consecuencia de la gran cantidad de flujo de agua dentro del sistema de fluidización [11].

Del análisis anterior, se destacan los resultados de recuperación con flujo bajo (2L/min) y gravedad alta (60 veces la fuerza de gravedad), pues con estas condiciones se facilita una fluidización del lecho de las partículas en el cono del concentrador y se aumenta la recuperación [11]. Partiendo de estas condiciones, se procedió a realizar las pruebas de concentración con los disgregados de los aglomerados cargados.

En la figura 14, se muestran los resultados obtenidos luego del proceso de concentración de los disgregados de los aglomerados cargados mediante el uso del concentrador Knelson.

Figura 14. Recuperación de oro en los productos de concentración en Knelson; de las pruebas realizadas a los disgregados.



Como era de esperarse, el porcentaje de recuperación de oro en el concentrado es bastante alto (89,56%), ratificando que las condiciones establecidas anteriormente permiten obtener los mejores resultados de recuperación utilizando el concentrador Knelson.

Cabe resaltar que, aunque mediante el uso del concentrador Knelson se obtuvieron mejores resultados de recuperación, en el concentrado se apreciaban partículas de carbón. Para disminuir este efecto, se realizaron dos ensayos adicionales mostrados en la tabla 4, para determinar qué tan favorable sería recircular tanto el concentrado como las colas de una primera etapa de concentración.

En los resultados mostrados en la tabla 4, puede apreciarse que a pesar de que se logró recuperar casi el 100% del mineral aurífero luego de haber recirculado el concentrado y las colas, no sé evidencio una limpieza satisfactoria en el producto de recirculación del concentrado inicial (Prueba 2). Con base en esto se estableció que dicha recirculación no beneficia la separación de las partículas de carbón presentes en el concentrado inicial.

Tabla 4. Resultados finales prueba de concentración y recirculación utilizando concentrador Knelson. Fuerza centrífuga de 60 veces la fuerza de la gravedad y flujo de agua de 2 L/min.

Prueba	Muestra (g)	Concentrado (g)	Colas (g)	Au Concentrado (g)	Ley Concentrado (g/ton)	Au Colas (g)	Ley colas (g/ton)	% Recuperación en concentrado
1	200	58.262	141.738	0.01956	335.725	0.00218	15.380	89.56
RECIRCULACIÓN								
Prueba	Muestra (g)	Concentrado (g)	Colas (g)	Au Concentrado (g)	Ley Concentrado (g/ton)	Au Colas (g)	Ley colas (g/ton)	% Recuperación en concentrado
2	58.262	58.262	0	0.01956	335.725	0	0	100
3	141.738	62.835	78.903	0.00214	34.057	0.0004	5.070	98.17

5. CONCLUSIONES

- Con base en el estudio realizado en la etapa de disgregación del proceso CGA, se concluye que la separación entre el carbón y el mineral es mejor cuando se emplea agitación magnética y los detergentes como agentes desengrasantes. Se determinó que el mecanismo de disgregación con una solución de agua + detergente Ariel a 70 °C, mediante agitación magnética, fue el más eficiente para eliminar el aceite crudo de soya presente en los aglomerados contactados, conllevando a una excelente separación entre el carbón y el mineral.
- De acuerdo a los resultados de recuperación obtenidos mediante la mesa concentradora, se determinó que esta se veía favorecida con la disminución del ángulo de inclinación de la mesa, ya que con el menor ángulo evaluado (10°) se obtuvo una recuperación de 80,89%.
- Se concluye que tanto la cantidad de fuerza centrífuga aplica como el flujo de agua de fluidización del concentrador Knelson son parámetros que intervienen considerablemente en los resultados de concentración, siendo favorable trabajar con una fuerza centrífuga igual a de 60 veces la fuerza de gravedad y manteniendo un flujo bajo de agua (2,0 L/min), condiciones con las cuales se obtuvo la mayor recuperación (91,13%).

6. RECOMENDACIONES

- Utilizar índices metalúrgicos tales como el índice de selectividad, rendimiento de concentración y la razón de enriquecimiento, con el objetivo de complementar los resultados de recuperación obtenidos en esta investigación.
- Se recomienda evaluar la etapa de disgregación de los aglomerados cargados haciendo uso de un baño ultrasónico con niveles de frecuencia mayores a los utilizados en esta investigación para determinar si este medio de agitación es favorable para separar las partículas de carbón y mineral.
- Teniendo en cuenta la reciente adquisición de una mesa concentradora por parte de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, se recomienda evaluar la etapa de recuperación de las partículas de pirita haciendo uso de este equipo.

REFERENCIAS

- [1]. CORDOBA TUTA, E.M. Recuperación de Oro Particulado con Aglomerados Carbón Aceite una Tecnología Limpia en la Extracción de Oro. Bucaramanga, 1998. Trabajo de grado de maestría (Magister en Ingeniería Metalúrgica). Universidad Industrial de Santander. Departamento de Metalurgia.
- [2]. HOUSE L., TOWNSEND, I.G., & VEAL, C.J. Coal gold agglomeration process. International Mining, 1998.
- [3]. AKCIL A., WU, X.Q. Coal-Gold Agglomeration: An Alternative Separation Process in Gold Recovery. En: Separation & Purification Reviews. Vol. 38, Issue 2, (Feb., 2009); p 173-201.
- [4]. ATEHORTÚA, A., GAVIRIA, A. Recuperación de oro libre mediante su aglomeración con un agregado carbón-aceite. En: Boletín de ciencias de la tierra. Número 18, (Jul., 2006).
- [5]. SAHINOGLU, E., USLU, T. Role of recovery sieve size in upgrading of fine coal coal oil agglomeration technique. En: Science Direct. Vol. 138, (Oct., 2.015); p 21-29.
- [6]. ARENAS, T., RUIDIAZ, E. Estudio del comportamiento de las espumas generadas en el lavado de carbones por flotación mediante el uso de mezclas densas tipo CCTA. Bucaramanga, 2.006. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.
- [7]. CALVEZ, J.P.S., KIM, M.J. Use of coal-oil agglomerates for particulate gold recovery. En: Minerals Engineering. Vol. 11, Issue 9, (Sep, 1998); p 803–812.

- [8]. WU, X.Q., GOCHIN, R.J., MONHEMIUS A.J. The adhesion of gold to oil-carbon agglomerates. En: Minerals Engineering. Vol. 17. Issue 1, (Jan. 2004); p 33-38.
- [9]. PYOR, E.J. Mineral Processing, 3rd Edition, London: Elsevier, 1965.
- [10]. OLARTE, B., PEÑALOZA, L. Implementación de técnicas alternativas a la tostación de los aglomerados carbón-aceite para la recuperación de oro mediante el proceso CGA. Bucaramanga, 2015. Trabajo de grado de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
- [11]. KÖKKILIÇ, O., LANGLOIS, R., WATERS. A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator. Minerals Engineering, vol. 72, pp. 73-86. (2015).
- [12]. FL SMIDTH, User Manual Model KC-MD3, Revision 2.3, Oct. 2015.
- [13]. ALVAREZ Q., A. Tecnología de la concentración centrífuga. Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia, Sept. 2009.
- [14]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates 2006. ASTM C136-06. Philadelphia, PA, United States. pp 1-5.
- [15]. ASTM E 400-02 Standard Test Method for Analysis of Ores, Minerals, and Rocks by the Fire Assay Preconcentration Optical Emission Spectroscopy. 2002.
- [16]. MONTOYA, D., HINOJOSA, C., PINZÓN, D. Aplicación del proceso CGA a minerales auríferos oxidados: establecimiento de los parámetros metalúrgicos de interés. Bucaramanga, 2017. Trabajo de grado de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

[17]. ASTM D-388. Standard Classification of Coals by Rank. 1998.

[18]. SIVAMOCHAN R., FORSSBERG E. Principles of tabling. International Journal of Mineral Processing, Vol. 15, November 1985, Pag. 281-295.

[19]. Facultad de Ingeniería. Evaluación de los procesos de concentración de minerales [en línea]. <http://ingenieria.udea.edu.co/cim2005/mineralurgia/concentracion.pdf>

BIBLIOGRAFÍA

- AKCIL A., WU, X.Q. Coal-Gold Agglomeration: An Alternative Separation Process in Gold Recovery. En: Separation & Purification Reviews. Vol. 38, Issue 2, (Feb. 2009); p 173-201.
- ALVAREZ Q., A. Tecnología de la concentración centrífuga. Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia, Sept. 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates 2006. ASTM C136-06. Philadelphia, PA, United States. pp 1-5.
- ARENAS, T., RUIDIAZ, E. Estudio del comportamiento de las espumas generadas en el lavado de carbones por flotación mediante el uso de mezclas densas tipo CCTA. Bucaramanga, 2.006. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.
- ASTM E 400-02 Standard Test Method for Analysis of Ores, Minerals, and Rocks by the Fire Assay Preconcentration Optical Emission Spectroscopy. 2002.
- ASTM D-388. Standard Classification of Coals by Rank. 1998.
- ATEHORTÚA, A., GAVIRIA, A. Recuperación de oro libre mediante su aglomeración con un agregado carbón-aceite. En: Boletín de ciencias de la tierra. Número 18, (Jul., 2006).

- CALVEZ, J.P.S., KIM, M.J. Use of coal-oil agglomerates for particulate gold recovery. En: Minerals Engineering. Vol. 11, Issue 9, (Sep, 1998); p 803–812.
- CORDOBA TUTA, E.M. Recuperación de Oro Particulado con Aglomerados Carbón Aceite una tecnología Limpia en la Extracción de Oro. Bucaramanga, 1998. Trabajo de grado de maestría (Magister en Ingeniería Metalúrgica). Universidad Industrial de Santander. Departamento de Metalurgia.
- Facultad de Ingeniería. Evaluación de los procesos de concentración de minerales [en línea]. <http://ingenieria.udea.edu.co/cim2005/mineralurgia/concentracion.pdf>
- FLSMIDTH, User Manual Model KC-MD3, Revision 2.3, Oct. 2015.
- HOUSE L., TOWNSEND, I.G., & VEAL, C.J. Coal gold agglomeration process. International Mining, 1998.
- KÖKKILIÇ, O., LANGLOIS, R., WATERS. A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator. Minerals Engineering, vol. 72, pp. 73-86. (2015).
- MONTOYA, D., HINOJOSA, C., PINZÓN, D. Aplicación del proceso CGA a minerales auríferos oxidados: establecimiento de los parámetros metalúrgicos de interés. Bucaramanga, 2017. Trabajo de grado de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
- OLARTE, B., PEÑALOZA, L. Implementación de técnicas alternativas a la tostación de los aglomerados carbón-aceite para la recuperación de oro mediante el proceso CGA. Bucaramanga, 2015. Trabajo de grado de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.
- PYOR, E.J. Mineral Processing, 3rd Edition, London: Elsevier, 1965.

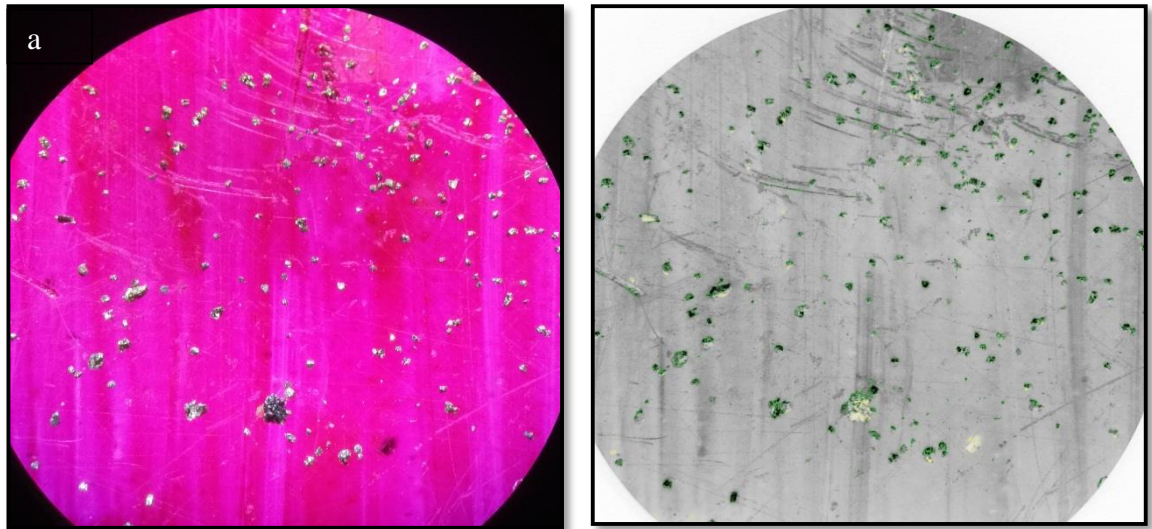
- SAHINOGLU, E., USLU, T. Role of recovery sieve size in upgrading of fine coal coal oil agglomeration technique. En: Science Direct. Vol. 138, (Oct., 2.015); p 21-29.
- SIVAMOCHAN R., FORSSBERG E. Principles of tabling. International Journal of Mineral Processing, Vol. 15, November 1985, Pag. 281-295.
- WU, X.Q., GOCHIN, R.J., MONHEMIUS A.J. The adhesion of gold to oil-carbon agglomerates. En: Minerals Engineering. Vol. 17. Issue 1, (Jan. 2004); p 33-38.

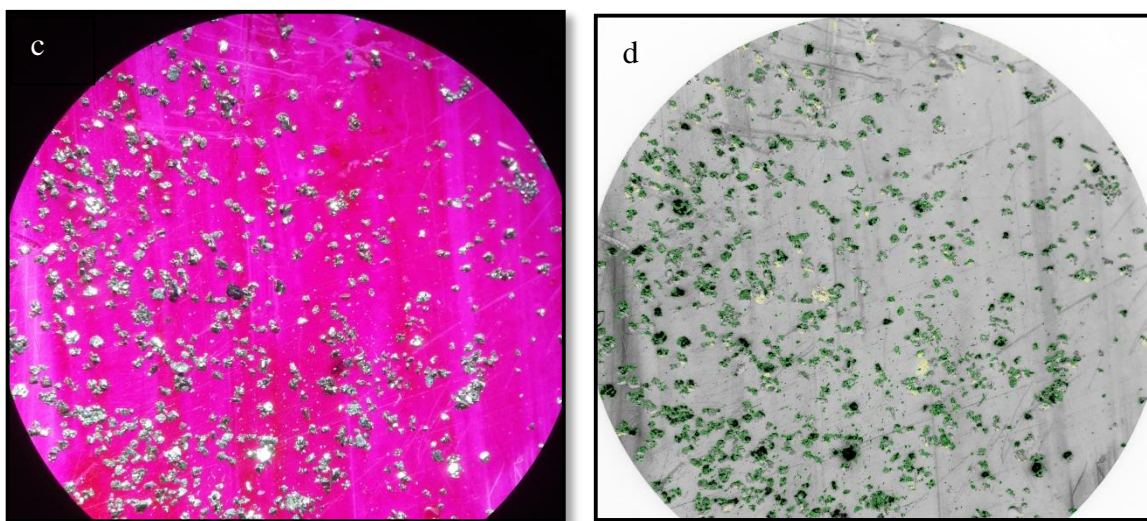
ANEXOS

Anexo A. Diferentes soluciones desengrasantes a 70 °C, utilizadas para la disgregación de aglomerados carbón-aceite-pirita mediante agitación magnética

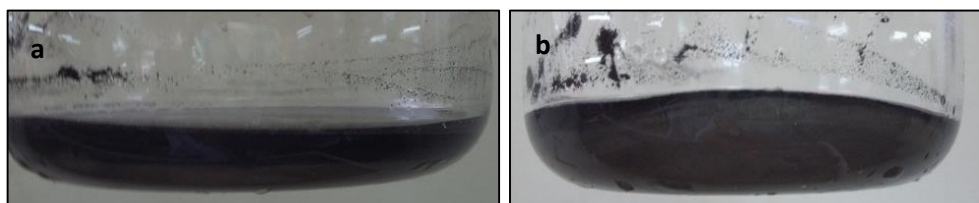
a. 6 g de detergente Ariel en 200ml de agua	b. 6 g de detergente FAB en 200ml de agua	c. 6 g de detergente Dersa en 200ml de agua	d. 5ml de detergente Ariel liquido en 200ml de agua
e. 5ml de detergente FAB liquido en 200ml de agua	f. 10ml de desengrasante Mr. Musculo en 200ml de agua	g. 10ml de desengrasante Easy of Bang en 200ml de agua	h. 10ml de deJabón Liquido Woolite en 200ml de agua

Anexo B. Fotografías de productos de disgregación antes y después del análisis con el software Digim�zer 4.3.0 (a) Con detergente Ariel, (b) Con detergente FAB.





Anexo C. Fotografías de concentrados obtenidos mediante el uso del concentrador Knelson con un flujo de agua de fluidización de 3,5 L/min, variando la fuerza centrífuga aplicada. **a)** Fuerza centrífuga de 40 veces la fuerza de la gravedad **b)** Fuerza centrífuga de 60 veces la fuerza de la gravedad.



Anexo D. Fotografías de concentrados obtenidos mediante el uso del concentrador Knelson con una fuerza centrífuga de 60 veces la fuerza de gravedad, variando los niveles de flujo de agua. **a)** 3.5 L/min. **b)** 2.8 L/min. **c)** 2.0 L/min.

