

**ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DE FORMACIÓN DE  
AGLOMERADOS DE CARBÓN Y ACEITE PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO  
POR EL PROCESO CGA A PARTIR DE UN MINERAL AURÍFERO  
COLOMBIANO**

**YURY VANESSA NIÑO PICÓN  
LINDA KAREN PEÑA SUAREZ**

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

**2015**

**ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DE FORMACIÓN DE  
AGLOMERADOS DE CARBÓN Y ACEITE PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO  
POR EL PROCESO CGA A PARTIR DE UN MINERAL AURÍFERO  
COLOMBIANO**

**YURY VANESSA NIÑO PICÓN  
LINDA KAREN PEÑA SUAREZ**

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

**Director  
ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA  
Ingeniería Metalúrgica, Ph.D**

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

**2015**

## DEDICATORIA

*En primer lugar a Dios por las bendiciones brindadas y por permitirme culminar esta importante etapa en mi vida.*

*A mi madre Nubia Picón, por ser la persona que me acompaña y apoya en todo momento, y que siempre con sus palabras sabias me motiva a seguir a delante.*

*A mi padre Armando Niño por ser un ejemplo de perseverancia y dedicación.*

*A mi hermano Oscar Niño por brindarme sus consejos.*

*A mis amigos y compañeros que siempre me apoyaron y acompañaron durante el todo el proceso de aprendizaje.*

*-Yury Vanessa Niño Picón-*

## DEDICATORIA

*A Dios por las bendiciones ofrecidas a lo largo de mi vida.*

*A mis padres Yamile Suarez León y José Francisco Peña Del Río por ser ejemplo de fortaleza determinación y seguridad a la hora de perseguir mis objetivos trazados.*

*A mis hermanos Yul Brainer, Lisley y en especial a Ana Elcida por las frases de aliento en los momentos de debilidad.*

*A mis amigos por brindarme su amistad, en especial a Sonia, Leydi y Eduard Osses por su apoyo incondicional*

*A bienestar universitario en especial al equipo en comedores por haberme permitido compartir con ustedes, aprendiendo cada día el valor del trabajo en equipo*

*<< Linda Karen Peña Suarez >>*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la universidad industrial se Santander por ser el alma mater que nos permitió realizar nuestra formación integral como personas y profesionales.

Al técnico Ambrosio Carrillo por brindarnos su apoyo y colaboración en el continuo progreso de esta investigación.

A la profesora Elcy María Córdoba Tuta por su acompañamiento.

Al grupo de investigación GIMBA por permitirnos trabajar en sus instalaciones durante el desarrollo de este proyecto.

Al laboratorio de Electroquímica del Centro de Materiales y Nanociencias (CMN) y el laboratorio de rayos X, 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
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>20</b>
<b>1. OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
<b>2.CONCEPTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>23</b>
2.1 PROCESOS CONVENCIONALES DE RECUPERACIÓN DE ORO .....	23
2.1.1 Proceso de amalgamación en la recuperación del oro .....	23
2.1.2 Proceso de cianuración.....	23
2.2 RECUPERACIÓN DE ORO POR AGLOMERACIÓN DE CARBÓN Y ACEITE (CGA).....	24
2.2.1 Etapas del proceso CGA.....	25
2.2.1.1 Etapa 1: Formación de los aglomerados carbón-aceite .....	26
2.2.1.2 Etapa 2: Extracción del oro del mineral.....	26
2.2.1.3 Etapa 3: Recuperación del oro de los aglomerados .....	26
2.3 AGLOMERACIÓN DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EN UNA EMULSIÓN DE AGUA-ACEITE.....	28
2.3.1 Aglomeración esférica .....	28

2.3.2 Aglomeración de carbón fino con aceite .....	31
2.4 NATURALEZA DE LOS CARBONES.....	31
2.4.1 Clasificación del carbón .....	32
2.5 NATURALEZA Y PROPIEDADES DE LOS ACEITES. ....	32
2.6 FISICOQUÍMICA DE SUPERFICIES .....	33
2.6.1 Ángulo de contacto .....	33
2.6.2 Mojabilidad.....	34
<b>3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>35</b>
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL .....	36
3.1.1 Muestra mineral .....	36
3.1.2 Análisis granulométrico .....	36
3.1.3 Caracterización química y mineralógica .....	36
3.1.4 Cianuración en botella .....	37
3.1.5 Cianuración por agitación mecánica .....	37
3.1.6 Lixiviación diagnóstica .....	38
3.1.7 Determinación del tenor de oro.....	38
3.2 CARACTERIZACIÓN DE ACEITES.....	39
3.2.1 Medición de densidad.....	39
3.2.2 Viscosidad.....	39

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES.....	39
3.3.1 Análisis próximo de carbones .....	39
3.3.2 Ángulo de contacto .....	40
3.3.3 Aglomeración de carbones .....	40
3.3.4 Análisis granulométrico .....	40
3.4 IMPLMETACIÓN DEL PROCESO CGA .....	40
3.4.1 Pruebas preliminares .....	41
3.4.1.1 Preliminar 1: velocidad de agitación para la formación de aglomerados ...	41
3.4.1.2 Preliminar 2: etapa de contactación .....	42
3.4.2 Pruebas finales. ....	42
3.4.3 Caracterización morfológica y mineralógica de los aglomerados cargados..	43
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL. ....	45
4.1.1 Análisis granulométrico y distribución granulométrica .....	45
4.1.2 Caracterización mineralógica.....	46
4.1.3 Caracterización química.....	48
4.1.4. Cianuración en botella. ....	48
4.1.5 Cianuración por agitación mecánica .....	50
4.1.6 Lixiviación diagnóstico .....	51

4.2 CARACTERIZACIÓN DE ACEITES. ....	51
4.2.1 Medición de densidad y viscosidad.....	52
4.3 CARACTERIZACIÓN DE CARBONES. ....	52
4.3.1 Análisis próximo de carbones. ....	52
4.3.2 Ángulo de contacto. ....	53
4.3.3 Aglomeración de carbones. ....	55
4.3.4 Análisis granulométrico.....	56
4.4 PRUEBAS PRELIMINARES DEL PROCESO CGA. ....	57
4.4.1 Preliminar 1: Variación de la velocidad de agitación para la formación de aglomerados .....	57
4.4.2 Preliminar 2: Ensayos preliminares de la etapa de contactación del proceso CGA.....	59
4.4.2.1 Influencia de la variación en la cantidad de colector sobre la recuperación de oro .....	59
4.4.2.2 Influencia de la variación en el tiempo de contactación sobre la recuperación de oro.....	60
4.5 PRUEBAS FINALES: ENSAYOS DE AGLOMERACIÓN DE CARBÓN CON ACEITE.....	61
4.5.1 Relación en peso aceite/carbón.....	62

4.5.1.1 Influencia de la variación en la relación aceite/carbón sobre la resistencia y tamaño de los aglomerados formados. ....	62
4.5.1.2 Influencia del tipo de aceite.....	65
4.5.1.3 % Recuperación de oro a partir de los aglomerados seleccionados con la variación en la relación en peso aceite/carbón .....	65
4.5.2 Tiempo de aglomeración.....	67
4.5.2.1 Influencia de la variación en el tiempo de aglomeración sobre la resistencia y tamaño de los aglomerados formados. ....	67
4.5.2.2 % recuperación de Au a partir de los aglomerados obtenidos con la variación del tiempo de aglomeración.....	69
4.6 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y MINERALÓGICA DE LOS AGLOMERADOS CARGADOS. ....	70
4.6.1 Evaluación de la adhesión de las partículas de mineral a los aglomerados	70
4.6.2 Caracterización mineralógica de aglomerados y colas. ....	73
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>77</b>
<b>CITAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>86</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Condiciones implementadas para la evaluación de la variación de la velocidad de agitación. ....	42
<b>Tabla 2.</b> Niveles de estudio de la etapa de contactación del proceso CGA. ....	42
<b>Tabla 3.</b> Niveles de estudio de la etapa de formación de aglomerados del proceso CGA. ....	43
<b>Tabla 4.</b> Fases mineralógicas presentes en el mineral Reina de Oro. ....	46
<b>Tabla 5.</b> Composición química del mineral reina de oro. ....	48
<b>Tabla 6.</b> Grado de lixiviabilidad de minerales. ....	49
<b>Tabla 7.</b> Resultados de medición de densidad y viscosidad para cada uno de los aceite considerados en el estudio. ....	52
<b>Tabla 8.</b> Análisis próximo de carbones. ....	52
<b>Tabla 9.</b> Medidas de ángulo de contacto. ....	53
<b>Tabla 10.</b> Poder aglomerante de los carbones. ....	55
<b>Tabla 11.</b> Medición de tamaños y resistencia de los aglomerados formados a partir de la variación de la relación en peso aceite/carbón tanto para el aceite crudo de soya como el aceite de motor. ....	62
<b>Tabla 12.</b> Medición de tamaños y resistencia de los aglomerados formados a partir de la variación del tiempo de aglomeración para el aceite crudo de soya y quemado de motor. ....	67

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Representación esquemática del procedimiento en laboratorio para la recuperación de oro por el proceso CGA.....	27
<b>Figura 2.</b> Principales factores implicados para que exista el proceso de aglomeración de partículas sólidas de carbón en una emulsión de agua-aceite. ...	28
<b>Figura 3.</b> Formas de aglomerados. ....	29
<b>Figura 4.</b> Representación gráfica del ángulo de contacto. (a) el líquido moja el sólido (<math><90^\circ</math>). (b) el líquido no moja el sólido (>math>>90^\circ</math>). ....	33
<b>Figura 5.</b> Esquema de la metodología empleada en esta Investigación. ....	35
<b>Figura 6.</b> Distribución granulométrica del mineral Reina de Oro después de la molienda. ....	45
<b>Figura 7.</b> Micrografías SEM y espectros EDS del mineral reina de oro. ....	47
<b>Figura 8.</b> Cinética de lixiviación de oro con cianuro del mineral Reina de Oro durante 96 horas de lixiviación en botella, a una concentración de 1 g/L de NaCN y pH=10. ....	49
<b>Figura 9.</b> Cinética de lixiviación de oro con cianuro del mineral Reina de Oro durante 44 horas de lixiviación por agitación mecánica a una concentración de 1 g/L de NaCN y pH=10.....	50
<b>Figura 10.</b> Lixiviación diagnóstico. Asociación del oro con los diversos compuestos presentes en el mineral reina de oro.....	51

<b>Figura 11.</b> Imágenes de las medidas de ángulo de contacto entre los carbones La Grande, Zipaquirá, y Ubaté con los diferentes líquidos: A) agua, B) aceite crudo de soya, C) aceite quemado de motor. ....	54
<b>Figura 12.</b> Análisis granulométrico carbón La Grande. ....	57
<b>Figura 13.</b> Aglomerados producto de variar la velocidad de agitación: A) 1400 rpm, B) 1600 rpm, C) 1800 rpm. ....	58
<b>Figura 14.</b> Influencia de la variación de colector sobre la recuperación de oro en el proceso CGA. ....	60
<b>Figura 15.</b> Influencia de la variación del tiempo de contactación sobre la recuperación de oro. ....	61
<b>Figura 16.</b> Productos resultantes de la variación en la relación aceite/carbón. Aceite crudo de soya (A-D). Aceite quemado de motor (F-H).....	64
<b>Figura 17.</b> % recuperación de oro con los aglomerados obtenidos con la variación de la relación A/C. a) aceite crudo de soya. b) aceite quemado de motor.....	66
<b>Figura 18.</b> Morfología de los aglomerados formados a partir de la variación del tiempo de aglomeración, con aceite crudo de soya. ....	68
<b>Figura 19.</b> Comparación de las recuperaciones de oro obtenidas con los aglomerados formados a diferentes tiempos de aglomeración con aceite crudo de soya y aceite quemado de motor. ....	69
<b>Figura 20.</b> Adhesión de mineral a la superficie e interior de los aglomerados. Micrografías tomadas a 90X. ....	71
<b>Figura 21.</b> EDS del aglomerado cargado con 45 minutos de contactación. 1) EDS superficie del aglomerado cargado, 2 y 3 EDS del interior del aglomerado.....	73

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Procedimiento de laboratorio para la recuperación de oro mediante el proceso CGA .....	86
<b>Anexo B.</b> Análisis granulométrico inicial del mineral Reina de Oro .....	87
<b>Anexo C.</b> Productos resultantes de las pruebas de aglomeración de carbones ..	88
<b>Anexo D.</b> Productos resultantes de la variación del tiempo de aglomeración. Aceite crudo de soya (A-C). Aceite quemado de motor (D-F).....	89
<b>Anexo E.</b> Fotos de adhesión del oro a aglomerados.....	90
<b>Anexo F.</b> Difractogramas para colas y aglomerados puestos en contactación durante 15 y 45 minutos. ....	91

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE LAS PRINCIPALES VARIABLES DE FORMACIÓN DE AGLOMERADOS DE CARBÓN Y ACEITE PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO POR EL PROCESO CGA A PARTIR DE UN MINERAL AURÍFERO COLOMBIANO\*

**AUTORES:** NIÑO PICÓN, Yury Vanessa; PEÑA SUAREZ, Linda Karen. \*\*

**PALABRAS CLAVE:** CGA, recuperación de oro, aglomeración de carbón.

### DESCRIPCIÓN:

En esta investigación se estudió la influencia de las principales variables que afectan la formación de aglomerados de carbón y aceite, para su posterior uso en la recuperación de oro de un mineral aurífero colombiano por el proceso CGA. Inicialmente se hicieron estudios de caracterización de materias primas tales como el mineral aurífero colombiano, al igual que los aceites crudo de soya y quemado de motor, en conjunto con los tres carbones (Zipaquirá, Ubaté, y La Grande) considerados inicialmente para este estudio. Dicha etapa de caracterización conlleva a determinar algunas propiedades fisicoquímicas de los materiales usados, además de permitir seleccionar el carbón La Grande como el más adecuado para su uso en la formación efectiva de aglomerados.

Posteriormente, con la realización de pruebas preliminares se establecieron condiciones de trabajo experimentales como la velocidad de agitación necesaria para la formación de aglomerados, y otras variables como la cantidad de colector y tiempo de contacto de los aglomerados con la pulpa mineral a partir de las cuales se obtenían mejores recuperaciones de oro.

La realización de los estudios principales concernientes a la etapa de formación de aglomerados se llevaron a cabo variando la relación en peso de aceite-carbón (A/C) al igual que el tiempo de aglomeración y tipo de aceite. A partir de estos ensayos se evaluó simultáneamente la resistencia y tamaño de los aglomerados obtenidos, en conjunto con su eficiencia en la captación de oro. Finalmente con los aglomerados que presentaron las mejores características (resistencia, tamaño, mayor eficiencia en el %recuperación Au) se realizó un análisis morfológico y mineralógico, mediante la implementación de las técnicas de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X respectivamente.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales, directora. PhD. Elcy María Córdoba Tuta.

## ABSTRACT

**TITLE:** STUDY OF THE MAIN FORMATION VARIABLES OF COAL AND OIL AGGLOMERATES FOR GOLD RECOVERY WITH THE CGA PROCESS FROM AN AURIFEROUS COLOMBIAN MINERAL \*

**AUTHORS:** NIÑO PICÓN, Yury Vanessa; PEÑA SUAREZ, Linda Karen. \*\*

**KEY WORDS:** CGA, gold recovery, coal agglomeration.

### DESCRIPTION:

On this investigation, the influence of the main variables that affect the coal-oil agglomerates formation was studied, to be able to recover gold from an auriferous Colombian mineral with the CGA process. At the beginning some tests were made about the characterization of the raw materials: like the auriferous Colombian mineral, the crude soybean oil and burned engine oil, together with the three coals (Zipaquirá, Ubaté, and La Grande) initially considered for this study. This characterization stage helped to determine some physicochemical properties of the used materials, and allowed selecting the coal La Grande as the most suitable for use in the effective formation of agglomerates.

Then, with preliminary tests, experimental work conditions were established for the best gold recovery, examples of these are the agitation speed needed to the formation of agglomerates and other variables like the quantity of collector and the contact time of the agglomerates with the mineral pulp.

The main tests, about the agglomerate formation stage were made varying the ratio of oil-coal weight, the agglomeration time and oil type. From this test we were evaluated simultaneously the resistance and size of the obtained agglomerates, and their efficiency on gold catchment. Finally, the agglomerates with the best properties were chosen (resistance, size, gold recovery percent) and they were subject of a morphological and mineralogical analysis, by implementing the techniques of scanning electron microscopy and DRX.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physico-Chemical Engineering . School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director. Elcy María Córdoba Tuta.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la preocupación por el incremento en la contaminación del medio ambiente y deterioro de diversos ecosistemas, se encuentra fuertemente ligado al sector de la minería, más específicamente a los procesos convencionales implementados para la recuperación del oro, como lo son la cianuración y amalgamación. Por tal razón, recientemente se ha reforzado la necesidad de estudiar métodos alternativos que permitan la recuperación del oro, reduciendo significativamente los efectos nocivos sobre el medio ambiente y también que representen una forma sostenible de implementación a gran escala. [1]

Justamente, los diversos problemas ambientales se han venido incrementado debido a múltiples factores relacionados con la regulación y funcionamiento en la minería a pequeña y gran escala; mecanismos como la deficiencia en políticas en pro del medio ambiente, la utilización de sustancias tóxicas, falta de planeación y control de desechos posteriores, entre otros, son los que posibilitan la aparición de grandes problemas tanto ambientales como económicos y sociales. [2]. En este contexto, desafortunadamente la industria minera, en especial la encargada de la explotación y beneficio de metales preciosos como el oro, se ha venido posicionando como una de las industrias más contaminantes de épocas más recientes.

En el caso del proceso de cianuración, se han dirigido múltiples investigaciones para atenuar el efecto de residuos cianurados sobre el medio ambiente [1]. Sin embargo no ocurre lo mismo con el manejo del mercurio debido a que es una sustancia que no se degrada fácilmente y tiende a acumularse por mucho tiempo en el medio ambiente, lo cual contribuye en gran medida a la contaminación,

principalmente de fuentes hídricas tales como quebradas y ríos, ocasionando no solo daños en plantas y animales sino también en los seres humanos.

Una de las medidas que se ha venido utilizando respecto al uso del mercurio es la prohibición definitiva de este. Desafortunadamente en algunos países menos desarrollados a través de la minería ilegal lo siguen utilizando, puesto que es un proceso muy sencillo y con alta rentabilidad.

Finalmente, y teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, existe la necesidad de buscar nuevas alternativas que generen un impacto ambiental relativamente bajo, es decir, que no requieren el uso de sustancias tóxicas que afecten gravemente al medio ambiente y a la salud. En tal sentido, en este proyecto se plantea el estudio del proceso de aglomeración de oro con carbón (conocido como CGA por sus siglas en inglés), como método alternativo a la cianuración y a la amalgamación para la extracción de oro de minerales colombianos. Siendo el principal alcance del proyecto, encontrar las condiciones más adecuadas para la preparación de los aglomerados de carbón-aceite, que favorezcan la eficiencia en la extracción de oro a partir de un mineral aurífero colombiano.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto de las principales variables de formación de aglomerados de carbón y aceite en la recuperación de oro por el proceso CGA, a partir de minerales auríferos colombianos.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar materias primas tales como carbón, aceite y mineral con el fin de evaluar las propiedades fisicoquímicas que estos poseen.
- Realizar un estudio preliminar del proceso CGA, para determinar las condiciones adecuadas en la etapa de contactación de los aglomerados con el mineral aurífero.
- Obtener aglomerados de carbón y aceite bajo diferentes condiciones experimentales, teniendo en cuenta las variables: tipo de carbón, tipo de aceite, tiempo de aglomeración y % en peso de aceite/carbón.
- Determinar la eficiencia del proceso CGA utilizando los aglomerados de carbón y aceite, obtenidos bajo diferentes condiciones, para la recuperación de oro de un mineral aurífero colombiano.

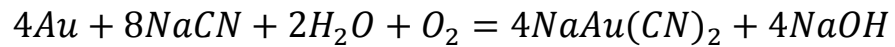
## 2. CONCEPTOS TEÓRICOS

### 2.1 PROCESOS CONVENCIONALES DE RECUPERACIÓN DE ORO

**2.1.1 Proceso de amalgamación en la recuperación del oro.** Este proceso se basa en la capacidad que tiene el mercurio en absorber las partículas de oro libre contenidas en la pulpa mineral formando una amalgama, la cual es separada por procesos gravimétricos (con corrientes de agua) y seguidamente es quemada hasta lograr evaporar completamente el mercurio obteniendo así el oro libre. [2].

Las ventajas de esta técnica se resumen principalmente en la simplicidad, baja inversión y recuperaciones considerablemente altas ( $\approx 98\%$ ). [2] Sin embargo, no compensa la problemática ambiental que este conlleva, dado que al ser la amalgama tratada para recuperar el oro se desecha gran cantidad de mercurio mediante su vertimiento a fuentes hídricas, así como su liberación mediante vapores tóxicos que a su vez contaminan el aire, perjudicando principalmente aquellas zonas aledañas donde se desarrolle la actividad minera. [3]

**2.1.2 Proceso de cianuración.** La cianuración consiste en la disolución selectiva de los metales preciosos (oro y plata) en soluciones de cianuro alcalino, para luego reducirlos a su estado metálico mediante la cementación o la electrodeposición. [3]. Este proceso ha sido estudiado desde años atrás por diferentes científicos, y cada uno de ellos ha contribuido al mejor entendimiento de la cinética y termodinámica de la cianuración de minerales auroargentíferos. [3][4]. El proceso está gobernado por la reacción:



Cabe resaltar que la eficiencia de los procesos de cianuración está determinada por los siguientes parámetros:

- Concentración de cianuro.
- Grado de acidez.
- Concentración de oxígeno en solución.
- Velocidad de agitación.
- Granulometría del mineral.
- Presencia de cianicidas y consumidores de oxígeno.

## **2.2 RECUPERACIÓN DE ORO POR AGLOMERACIÓN DE CARBÓN Y ACEITE (CGA).**

El proceso de CGA fue desarrollado y patentado por el equipo de investigación de British Petroleum (BP) a principios de los años ochenta y se basa en la recuperación de partículas de oro, a partir de suspensiones de mineral y aglomerados formados partiendo de carbón y aceite. [5][6]

En dicho proceso, el aceite actúa como el puente líquido entre las partículas de carbón y de oro donde, el carbón es el portador del mineral y permite la separación eficaz de la fase de aceite. Los aglomerados de carbón-aceite son recirculados hasta alcanzar una determinada carga de oro, momento en el cual se separan de la pulpa y son calcinados hasta obtener cenizas, las cuales posteriormente son sometidas a un proceso adicional de fundición para de tal manera conseguir el botón de oro metálico.

El proceso CGA combina una de las formas de separación mineral con una tecnología establecida para la limpieza de carbón, además de que aprovecha el comportamiento hidrofóbico de las partículas de oro, que les permite que se adhieran a los aglomerados de carbón-aceite, es decir, el oro puede ser recuperado por procesos basados en la química de superficies. [6]

Entre las ventajas que se destacan del proceso CGA, con respecto a los procesos convencionales de recuperación de oro, como lo son la amalgamación y cianuración, se tiene [5]:

- La recuperación es alta e independiente del rango de tamaños de partículas de oro, el cual puede estar entre mayores de 300 micrones y menores de 5 micrones.
- Comprende menores tiempos de residencia, así como menor consumo de reactivos, lo que a su vez contribuye en una notable disminución de costos, aspecto particularmente importante para los minerales que tienen altos consumos de cianuro.
- Impacto ambiental inferior con respecto al no uso de sustancias tóxicas como el cianuro y mercurio.
- En minerales donde el oro está libre, la cinética de recuperación es constante con el tiempo debido a que no se tiene limitaciones en cuanto a la carga de los aglomerados.

**2.2.1 Etapas del proceso CGA.** El proceso CGA consiste de 3 etapas, las cuales se describen a continuación:

**2.2.1.1 Etapa 1: Formación de los aglomerados carbón-aceite.** Esta etapa comprende todos los procesos y procedimientos requeridos para la formación de los aglomerados de carbón y aceite, como se enuncia a continuación:

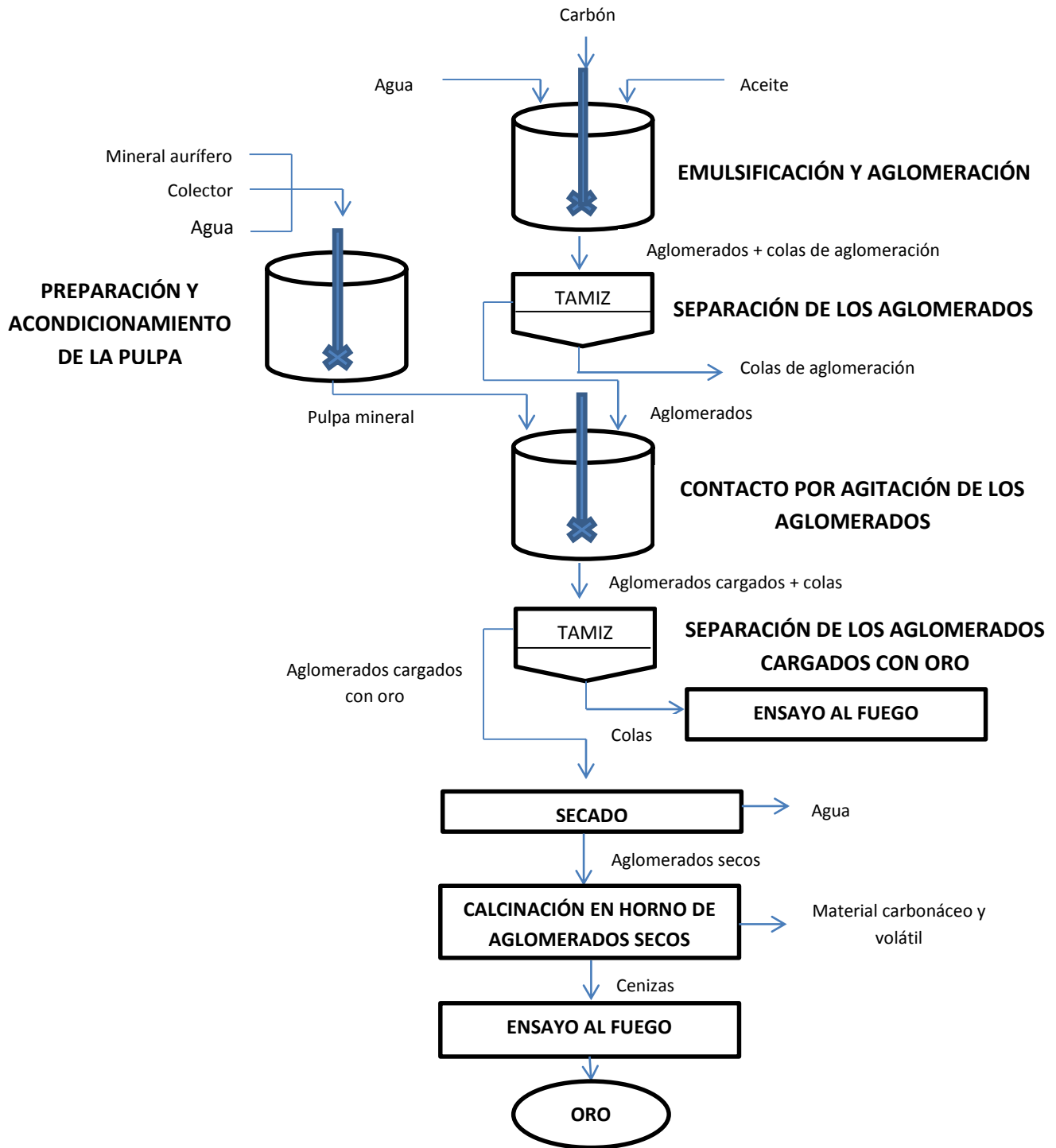
- Formación de una emulsión de agua y aceite, la cual se agita mecánicamente.
- Adición del carbón previamente molido, a la emulsión de agua y aceite con agitación mecánica constante, esto con el fin de formar los aglomerados.
- Separación de los aglomerados formados, de las colas de aglomeración, mediante el método de tamizaje.

**2.2.1.2 Etapa 2: Extracción del oro del mineral.** Esta etapa se da generalmente, al poner en contacto los aglomerados de carbón-aceite previamente formados, con la pulpa acondicionada de mineral, esto con el fin de que en los aglomerados se adhieran las partículas de oro. Finalmente, los aglomerados cargados con oro se separan de las colas mediante tamizado.

**2.2.1.3 Etapa 3: Recuperación del oro de los aglomerados.** El oro atrapado en los aglomerados de carbón y aceite es recuperado por medio de la fusión de las cenizas de calcinación de los aglomerados.

A continuación en la Figura 1, se muestra un esquema de las diversas etapas seguidas para la recuperación de oro por la implementación del proceso CGA. Además en el Anexo A se describen cada uno de los procedimientos mencionados en dicha figura.

**Figura 1.** Representación esquemática del procedimiento en laboratorio para la recuperación de oro por el proceso CGA.

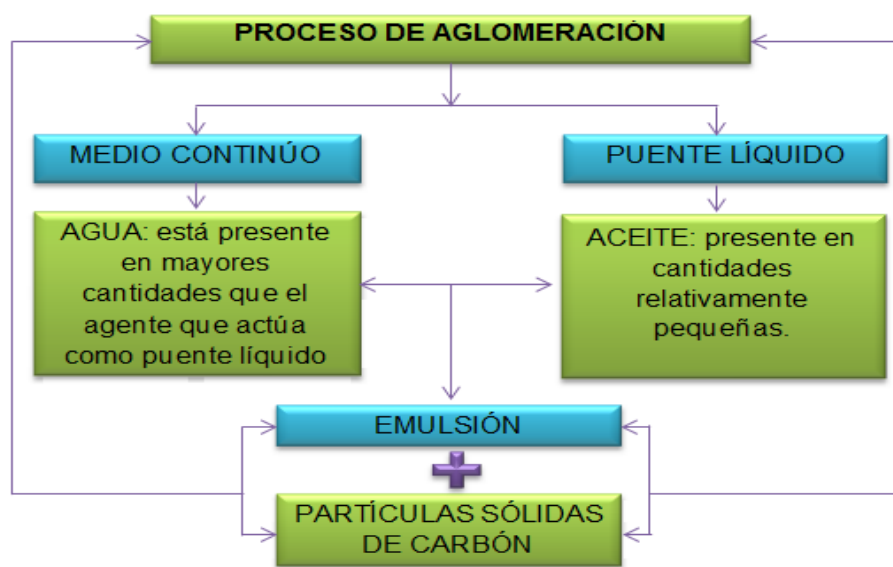


**Fuente.** CORDOBA TUTA. Elcy María. Recuperación de oro particulado con aglomerados carbón - aceite - una tecnología limpia en la extracción del oro. [2]

## 2.3 AGLOMERACIÓN DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EN UNA EMULSIÓN DE AGUA-ACEITE.

**2.3.1 Aglomeración esférica.** Este proceso está basado en la mojabilidad selectiva de las superficies de los sólidos finamente divididos en la presencia de dos líquidos inmiscibles, en este caso agua y aceite. Un líquido está presente en cantidad suficiente para formar un medio continuo (agua) dentro de la suspensión de los sólidos particulados. El segundo, llamado líquido de unión (aceite), está presente en cantidades relativamente pequeñas y debe preferiblemente mojar las superficies de las partículas sólidas suspendidas. Para iniciar el proceso de aglomeración, debe haber suficiente agitación para dispersar el líquido mojanete (aceite) a través del medio de suspensión y promover el contacto interparticular (Figura 2). [2][7].

**Figura 2.** Principales factores implicados para que exista el proceso de aglomeración de partículas sólidas de carbón en una emulsión de agua-aceite.

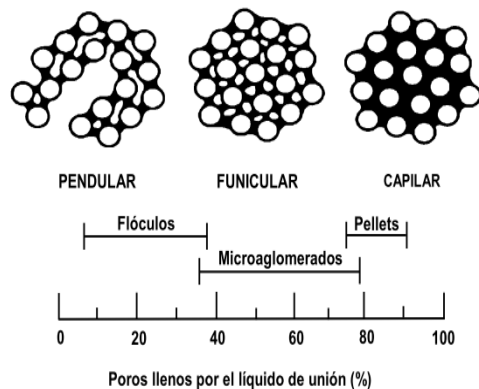


Una vez dispersas, las gotas de puente líquido son selectivamente adsorbidas por los sólidos, la aglomeración de estos sólidos entonces ocurre a través de la interacción entre la capa de puente líquido sobre diferentes partículas.

El enlazamiento entre partículas (aglomeración) está directamente afectado por factores como las fuerzas de capilaridad dentro del puente líquido en los puntos de unión de las partículas, al igual que el tamaño, es decir, que a medida que las partículas disminuyen de tamaño, los aglomerados formados se hacen más fuertes. Otro criterio importante es el grado de mojabilidad de sólidos por el puente líquido; mejores resultados se obtienen cuando las superficies del sólido están completamente mojadas. [7]

En la Figura 3 se resumen las características de un aglomerado asociado a los diferentes niveles de puente líquido y sus propiedades superficiales.

**Figura 3.** Formas de aglomerados.



**Fuente.** MAJID A. and Sparks B. Role of hydrophobic solids in the stability of oil sands fine tailings. [8]

Bajas cantidades de puente líquido, o la mojabilidad parcial, dan una cobertura incompleta de la superficie de los sólidos, limitando a su vez el número de puntos de enlace entre las partículas individuales. Esto resulta en la formación de flóculos de estructura abierta que atrapan grandes cantidades del medio de suspensión. Esta adsorción irregular del puente líquido se conoce como el estado pendular. [7][8].

A medida que la cantidad de puente líquido aumenta, el líquido adsorbido eventualmente forma una capa continua alrededor de cada partícula humectable. El sistema se dice que está ahora en el estado funicular. En estas circunstancias no hay límite para el número de interacciones de unión entre las partículas, y la estructura floculada se condensa para formar aglomerados más compactos. Sin embargo, el volumen de puente líquido puede ser todavía insuficiente para llenar completamente la porosidad interna de los aglomerados. [2][8]

Cuando los poros de aglomerado se saturan con el líquido que actúa como puente de unión, el sistema se dice que está en estado capilar. Bajo estas condiciones los aglomerados logran su máxima densidad y resistencia. [2][8]

El tamaño final del aglomerado resulta a partir de un equilibrio entre la cantidad de puente líquido y el grado y el tipo de agitación. La presencia de grandes cantidades de partículas sólidas no mojadas por el puente líquido afecta de manera adversa el proceso de aglomeración. Esto ocurre a través de la interferencia de los sólidos inertes con el contacto de partículas mojadas con el puente líquido y su atrapamiento en los aglomerados. El resultado global es una disminución en la tasa tanto de aglomeración como en la selectividad del proceso. [8].

**2.3.2 Aglomeración de carbón fino con aceite.** Este proceso se logra mediante la adición de cantidades considerables [10-30%] en peso sobre una base de alimentación seca de carbón, de un líquido inmiscible de unión, generalmente aceite, a la suspensión finamente dispersa. A través de la agitación, el aceite moja la superficie del carbón (hidrófoba) formando aglomerados, y finalmente sale la materia mineral (inorgánica) hidrofílica finamente dispersa. [9][10].

## **2.4 NATURALEZA DE LOS CARBONES.**

El carbón es un sólido oscuro, estratificado y combustible, resultado de la acumulación y enterramiento de materia vegetal desde las primitivas eras geológicas. Estos depósitos se convierten en carbón a través de unos cambios biológicos iniciales y posteriores efectos mecánicos de presión y temperatura en el seno de los sedimentos. Como roca sedimentaria, el carbón varía notablemente en sus propiedades fisicoquímicas en función de su madurez y el entorno geológico en donde se originó. Se encuentra compuesto principalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno y se formó a partir de una biomasa que se acumuló en depósitos de lodos y otros sedimentos. [11][12]

En relación a la química de superficies, el carbón es intrínsecamente hidrófobo debido a su composición química (presencia de grupos aromáticos y alifáticos) sin embargo, procesos de meteorización natural hacen que los carbones se oxiden formando en su superficie grupos carboxilos y carbonilos los cuales disminuyen las propiedades hidrofóbicas en la superficie, permitiendo que el carbón tienda a ser más hidrófilo. Este proceso de oxidación depende principalmente del tipo de carbón, ya que para carbones de alto rango como los antracíticos el proceso de oxidación se hace más lento respecto a los carbones de bajo rango. [13][14]

**2.4.1 Clasificación del carbón.** La gran diversidad de plantas y el grado de “metamorfismo o carbonificación” a la que fueron sometidas desde sus formas primigenias originaron una amplia variedad de carbones que difieren en sus propiedades físicas y químicas determinando lo que se conoce como rango del carbón. Precisamente, la norma ASTM D388-05 [15] propone una clasificación de acuerdo con el rango de los carbones, dividiéndolos en clases como las antracitas, bituminosos, sub-bituminosos y lignitos. Dicha norma presenta la clasificación de los carbones de acuerdo con su contenido de carbono fijo, materia volátil, poder calorífico, y poder aglomerante.

## **2.5 NATURALEZA Y PROPIEDADES DE LOS ACEITES.**

Los aceites son sustancias de origen vegetal o animal insolubles en agua, hidrofóbicas, las cuales consisten principalmente de esteres gliceriles de ácidos grasos, también llamados triglicéridos. [2]

Las propiedades de los aceites están influenciadas por el largo y la forma de la cadena de carbonos de los ácidos grasos, de la siguiente manera [2]:

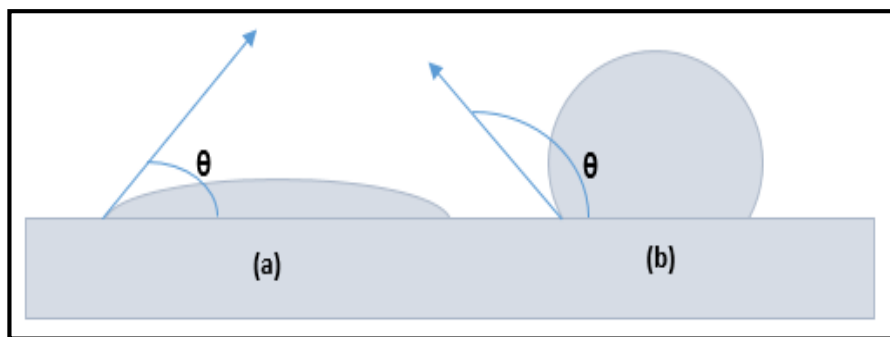
- La hidrofobicidad del aceite aumenta con el largo de las cadenas de carbonos. Los ácidos grasos con cadenas de menos de 4 átomos de carbono son sustancias hidrofílicas, completamente miscibles en agua.
- En general la viscosidad de los aceites disminuye con el incremento de en la insaturación; es decir la viscosidad es aumentada por la hidrogenación.
- La tensión superficial aumenta con el largo de la cadena.

## 2.6 FISICOQUÍMICA DE SUPERFICIES

Puesto que en su mayoría, el proceso de aglomeración de carbón con aceite, está influenciado por las propiedades superficiales de las sustancias involucradas, es importante tener noción de conceptos tales como: ángulo de contacto y mojabilidad.

**2.6.1 Ángulo de contacto.** Se refiere al ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con un sólido. El valor del ángulo de contacto depende principalmente de la relación que existe entre las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido, y las fuerzas cohesivas del líquido. Cuando las fuerzas adhesivas con la superficie del sólido son muy grandes en relación a las fuerzas cohesivas, el ángulo de contacto es menor de 90 grados, teniendo como resultado que el líquido moje la superficie; caso contrario sucede cuando el ángulo es superior a 90°. (Véase figura 4). [2][16]

**Figura 4.** Representación gráfica del ángulo de contacto. (a) el líquido moja el sólido ( $<90^\circ$ ). (b) el líquido no moja el sólido ( $>90^\circ$ ).

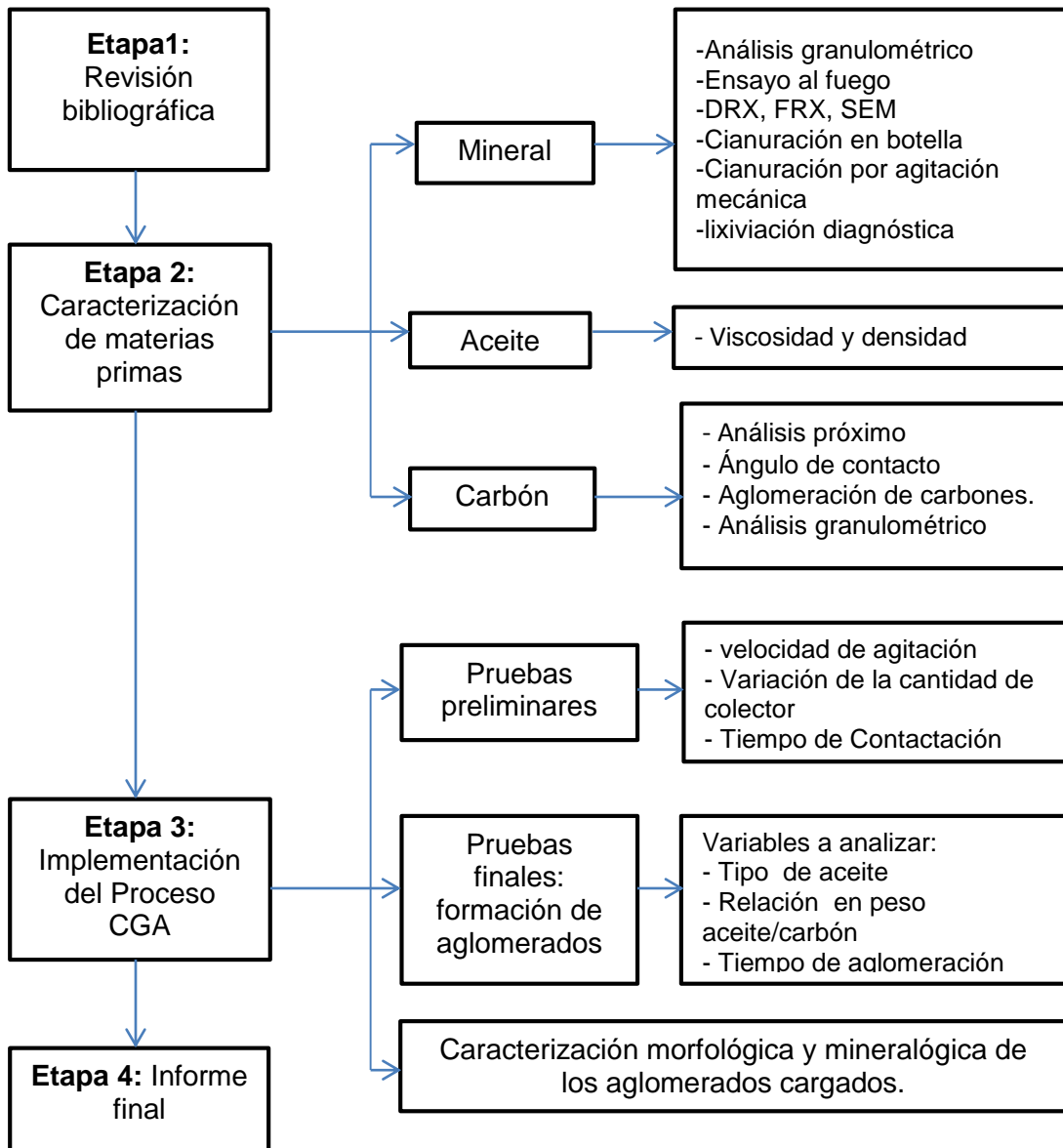


**2.6.2 Mojabilidad.** Se dice que un líquido moja un cuerpo sólido cuando es susceptible de extenderse sobre el mismo y dejar sobre él una traza. Una mojabilidad más o menos grande se traduce por valores medibles del ángulo que forman, en el contacto, el líquido y la superficie que lo contiene. El ángulo es tanto más pequeño cuanto la mojabilidad del líquido con respecto al cuerpo es mayor. Este fenómeno depende de los valores comparados de las atracciones que sufren las moléculas superficiales del líquido.

### 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental se desarrolló con base en el esquema que se muestra en la Figura 5.

**Figura 5.** Esquema de la metodología empleada en esta Investigación.



### **3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL**

**3.1.1 Muestra mineral.** Para el desarrollo del proyecto, se utilizó un mineral concentrado proveniente de la mina Reina de Oro ubicada en el municipio de Vetas (Santander). Dicho mineral fue usado como principal materia prima para la recuperación de oro mediante la implementación del proceso CGA.

**3.1.2 Análisis granulométrico.** Con base en la norma ASTM- C136 [17] se determinó el tamaño de partícula promedio del mineral. Para ello, inicialmente se tomaron 500 gramos de mineral por la técnica de cono y cuarteo. Posteriormente, para el tamizaje se utilizaron tamices Tyler correspondientes a las mallas 35, 50, 70, 100, 120, 140, 170 y 200, las cuales se dispusieron en el Rop-tap durante 16 minutos según lo estipula la norma (2 min por tamiz). Finalmente se pesó la muestra retenida en cada tamiz, con el fin de realizar los respectivos cálculos de distribución granulométrica.

**3.1.3 Caracterización química y mineralógica.** En esta actividad se determinó la presencia de especies cristalinas del mineral mediante Difracción de Rayos- X (DRX), a través del difractómetro de polvo marca BUKER modelo D8 ADVANCE con geometría Da Vinci. Igualmente se determinó la composición elemental del mineral con la implementación de la técnica de Fluorescencia de Rayos- X (FRX), utilizando un espectrómetro secuencial de fluorescencia de rayos-X de longitud de onda dispersiva de 4 KW marca BRUKER modelo S8 TIGER. Como una herramienta de soporte a la caracterización mineralógica del mineral se utilizó microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS), a través del microscopio marca QUANTA FEG 650 y JMS 7600f.

**3.1.4 Cianuración en botella.** Dicho ensayo se realizó con el propósito de evaluar el grado de lixiviabilidad del mineral. Para ello, se agitó la pulpa cianurada entre rodillos durante un periodo 96 horas. En el transcurso del tiempo de cianuración se tomaron una serie de alícuotas líquidas de 20 mL a diferentes horas (0, 2, 4, 6, 12, 24, 36, 44, 72 y 96) con el propósito de establecer el máximo porcentaje de disolución de oro del mineral, esto mediante la implementación de la técnica de espectroscopia absorción atómica.

**3.1.5 Cianuración por agitación mecánica.** Este ensayo se realizó con el fin estudiar la cinética de disolución de oro. Para ello, se establecieron las siguientes condiciones de operación:

- Cantidad de mineral= 500 gamos
- Granulometría= -75  $\mu\text{m}$
- Concentración de cianuro= 1 g/L
- Volumen de la solución= 1000 mL
- pH= 10-11
- Tiempo: 44 horas
- Velocidad de agitación 800 rpm

Posteriormente se tomaron una serie de alícuotas líquidas de 20 mL a diferentes horas (0, 2, 4, 6, 12, 24, 30, 36, y 44) con el propósito de determinar por medio de espectroscopia de absorción atómica la concentración de oro disuelto en la solución. Simultanéateme se determinó el consumo de cianuro mediante la titulación con nitrado de plata, usando rodamina como indicador.

**3.1.6 Lixiviación diagnóstica.** A partir de este ensayo se determinó el carácter refractario del mineral mediante el análisis de las asociaciones de oro en la variedad de especies mineralógicas contenidas en el mineral Reina de Oro.

La composición mineralógica del mineral estudiado (véase Tabla 4) permitió crear una metodología para destruir las especies encapsuladoras de oro [3]. Inicialmente se realizaron múltiples lixivitaciones con ácido sulfúrico y ácido nítrico, con cianuraciones intermedias entre cada una de las lixivitaciones realizadas, esto con el fin de determinar la cantidad de oro liberado de cada una de las especies a las que se encontraba asociado.

Finalmente se tostó el mineral resultante para realizar el posterior ensayo al fuego y de tal manera determinar la cantidad de oro presente en el material carbonáceo y silíceo que pudiera contener el mineral estudiado. Las concentraciones de oro se determinaron usando la técnica de espectroscopia absorción atómica mediante el espectrómetro Buck Scientific modelo 210 VPO del laboratorio de investigación del grupo GIMBA.

**3.1.7 Determinación del tenor de oro.** La ley de oro se determinó por el método de ensayo al fuego convencional, el cual consistió en la obtención de una muestra representativa del mineral mediante la técnica de cono y cuarteo. Seguidamente se tostó el mineral a 760°C y se prepararon las cargas para la fundición con el propósito de obtener el régulo para luego ser copelado y así obtener el correspondiente doré. Por último la ley de oro se calculó a partir del método de diferencias de peso de los dorés.

## **3.2 CARACTERIZACIÓN DE ACEITES**

El análisis de los aceites se llevó a cabo con el fin de establecer el comportamiento fisicoquímico que podría presentar cada uno de ellos al entrar en contacto directo con el carbón. Los ensayos realizados se describen a continuación:

**3.2.1 Medición de densidad.** Para este ensayo se utilizó el método del picnómetro el cual consistió en mantener un volumen constante (50 mL) pesando los líquidos y haciendo la comparación respecto a la densidad del agua.

**3.2.2 Viscosidad.** Este ensayo fue realizado mediante el viscosímetro rotacional Brookfield modelo DV-III+RHEOMETER, ubicado en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

## **3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES.**

Se obtuvieron diversos tipos de carbones que provenían de Cundinamarca (Ubaté y Zipaquirá) y Boyacá (mina La Grande). A continuación se describen los análisis realizados a los mismos.

**3.3.1 Análisis próximo de carbones.** Se utilizó el método de cono y cuarteo para obtener una muestra representativa a partir de la cual se realizaron pruebas como: %humedad (ASTM D 3173), %ceniza (ASTM D 3174), materia volátil (ASTM D 3175), poder calorífico (ASTM D 2015), % de azufre (ASTM D 3177) e índice de hinchamiento. Esto con el fin clasificarlos según la norma ASTM D388.

**3.3.2 Ángulo de contacto.** Este ensayo se realizó con la ayuda del sistema de medición de ángulo de contacto basado en video dataphysics OCA 15 EC del Laboratorio de Electroquímica, con el fin de analizar el nivel de mojabilidad que presentaba el aceite al entrar en contacto con los carbones seleccionados para el estudio del proceso CGA.

**3.3.3 Aglomeración de carbones.** Se ejecutó con el objeto de determinar si los carbones previamente caracterizados presentaban poder aglomerante frente a un agente ligante como lo es el aceite. Las condiciones trabajadas fueron 5 minutos de emulsificación, granulometría del carbón pasante malla 80, 10 minutos de aglomeración, y 1600 rpm de agitación. La prueba consistió principalmente en poner en agitación una emulsión de aceite y agua junto con 50 g de carbón durante un tiempo de 10 minutos para observar si efectivamente se formaban los aglomerados necesarios para la ejecución del proceso CGA.

**3.3.4 Análisis granulométrico.** Este ensayo se realizó siguiendo la norma ASTM C 136 [17], con el fin de conocer la distribución granulométrica del carbón sujeto al estudio. Inicialmente la muestra fue homogenizada y cuarteada mediante el método de cono y cuarteo hasta obtener una muestra representativa de 500 gramos de carbón. Seguidamente se tamizó la muestra en tamices Tyler correspondientes a las mallas 35, 50, 70, 100, 120, 140, 170 y 200 por un tiempo de 16 minutos en el Rop-tap, del cual se pesó la muestra retenida con el fin de realizar los respectivos cálculos de distribución granulométrica.

### **3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO CGA**

En esta parte de la investigación se profundizó en la primera etapa del proceso CGA (aglomeración carbón- aceite) con el fin de conseguir aglomerados capaces

de recuperar la mayor cantidad de oro asociado al mineral evaluado. Por ende, fue necesario realizar estudios preliminares en la segunda etapa del proceso CGA, con el propósito de obtener condiciones estándares en esta etapa y poder relacionarlas con las variables restantes a evaluar en este proyecto las cuales eran: Tiempo de aglomeración, relación en peso aceite/carbón, tipo de aceite y tipo de carbón. Cabe aclarar que la tercera etapa del proceso, consistió en la separación del mineral de los aglomerados mediante la calcinación de estos mismos. Las cenizas resultantes se fundieron para finalmente determinar la cantidad de Au por la técnica de espectroscopia de absorción atómica, y de tal manera realizar el cálculo del % de Au recuperado.

**3.4.1 Pruebas preliminares.** Las pruebas preliminares se realizaron con el fin de determinar las principales condiciones de trabajo para las etapas concernientes al proceso CGA.

**3.4.1.1 Preliminar 1: velocidad de agitación para la formación de aglomerados.** Se desarrolló con el fin de estudiar el comportamiento de la formación de aglomerados de carbón y aceite variando la velocidad de agitación (véase Tabla 1). Inicialmente se evaluó la velocidad de agitación manteniendo constante las demás variables involucradas en dicha etapa de formación de los aglomerados.

Las condiciones de trabajo descritas en la Tabla 1, se escogieron con base en la revisión bibliográfica realizada previamente.

**Tabla 1.** Condiciones implementadas para la evaluación de la variación de la velocidad de agitación.

<b>variables</b>	<b>Niveles de estudio</b>
<b>Velocidad de agitación [rpm]</b>	1400, 1600 y 1800
<b>Tiempo de aglomeración [min]</b>	10
<b>Tiempo de emulsión [min]</b>	5
<b>Relación en peso aceite/carbón</b>	0.3
<b>Peso del carbón [g]</b>	50

**3.4.1.2 Preliminar 2: etapa de contactación.** El desarrollo de esta preliminar permitió hallar las condiciones de operación más adecuadas para la etapa de contactación del proceso CGA. Para ello se evaluaron las principales variables (véase Tabla 2), como cantidad de acondicionante (colector Aerofloat 208) y tiempo de contactación entre la pulpa mineral y los aglomerados formados de carbón y aceite.

**Tabla 2.** Niveles de estudio de la etapa de contactación del proceso CGA.

<b>Variabes</b>	<b>Niveles de estudio</b>
<b>Cantidad de colector [<math>\mu</math>L]</b>	0, 25 , 50 , y 100
<b>Tiempo de contactación [min]</b>	20, 30, y 45

**3.4.2 Pruebas finales.** El fin de esta actividad fue la selección de las mejores condiciones de obtención de aglomerados de carbón-aceite que sirvieran para

recuperar la mayor cantidad de oro por la implementación del proceso CGA. Para ello se evaluaron las variables (véase Tabla 3) tipo de carbón, tipo de aceite, relación en peso aceite/carbón y tiempo de aglomeración.

**Tabla 3.** Niveles de estudio de la etapa de formación de aglomerados del proceso CGA.

Variable	Niveles de estudio
Tipo de aceite	Aceite crudo de soya y aceite quemado de motor
Tipo de carbón	Ubaté, Zipaquirá y La Grande
Relación en peso aceite/carbón	0.2, 0.25, 0.3 y 0.4
Tiempo de aglomeración	5, 10 y 15 minutos.

La formación de los aglomerados se evaluó mediante la medición de sus tamaños y resistencia. Los aglomerados que presentaron las mejores características se pusieron en contacto con la pulpa mineral, mediante agitación mecánica constante hasta obtener finalmente los aglomerados cargados. Cabe mencionar que la resistencia de los aglomerados se determinó mediante su caída libre sobre una placa metálica. Los valores reportados son correspondientes a un valor promedio de la cantidad de caídas que soportaron los aglomerados antes de comenzar a deformarse.

**3.4.3 Caracterización morfológica y mineralógica de los aglomerados cargados.** Para el análisis morfológico del proceso de adhesión del mineral a los

aglomerados de carbón-aceite formados, se procedió a observar su superficie y sección transversal mediante la técnica microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS), a través del microscopio marca QUANTA FEG 650 y JMS 7600f. Con el fin de complementar dicho estudio, también se procedió a observar la variación de la morfología de los aglomerados mediante el estereoscopio OLYMPUS ubicado en el Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. La preparación de las muestras para su análisis, consistió básicamente en un secado hasta lograr que se cortaran con una cuchilla de afeitar sin que se llegaran a desintegrar. Por otra parte, el análisis mineralógico de las colas y aglomerados se llevó a cabo mediante Difracción de Rayos- X (DRX), a través del difractómetro de polvo marca BUKER modelo D8 ADVANCE con geometría Da Vinci.

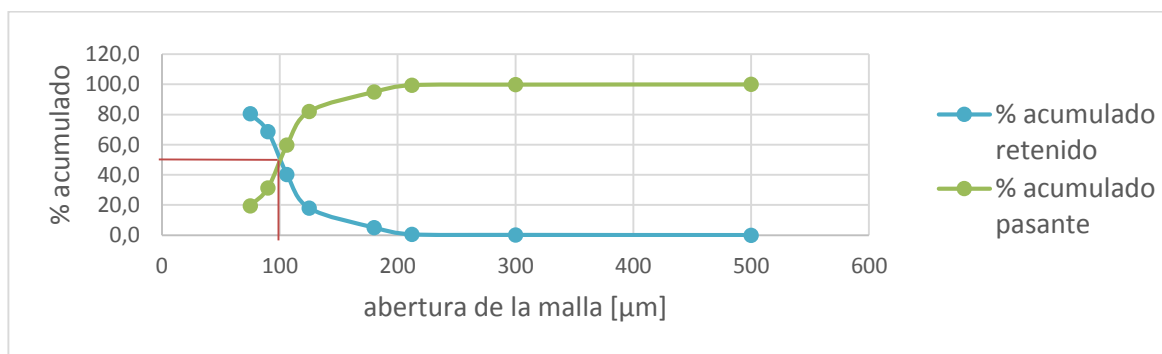
## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL.

**4.1.1 Análisis granulométrico y distribución granulométrica.** En el Anexo B, se presenta el análisis granulométrico del concentrado mineral, en condiciones de entrega. En él se observa que posee un tamaño medio de partícula (D50) igual a 180  $\mu\text{m}$ .

Según se conoce, para minerales auríferos, la mayoría del oro se encuentra asociado a granulometrías más finas (menor malla 140), por tal razón se concluyó que era necesario la molienda del mineral, para garantizar que se liberaran los metales preciosos asociados a las fracciones más gruesas. Por tal razón el mineral usado fue sometido a un proceso de conminución hasta obtener una granulometría más fina. Luego de la molienda de dicho mineral, se obtuvo la distribución granulométrica mostrada en la Figura 6, alcanzándose un D80 pasante de malla 120 (125  $\mu\text{m}$ ) y un tamaño medio de partícula igual a 100  $\mu\text{m}$ .

**Figura 6.** Distribución granulométrica del mineral Reina de Oro después de la molienda.



**4.1.2 Caracterización mineralógica.** La identificación de las fases mineralógicas presentes en el mineral Reina de Oro se hizo con la ayuda de la técnica de difracción de rayos X (véase tabla 4).

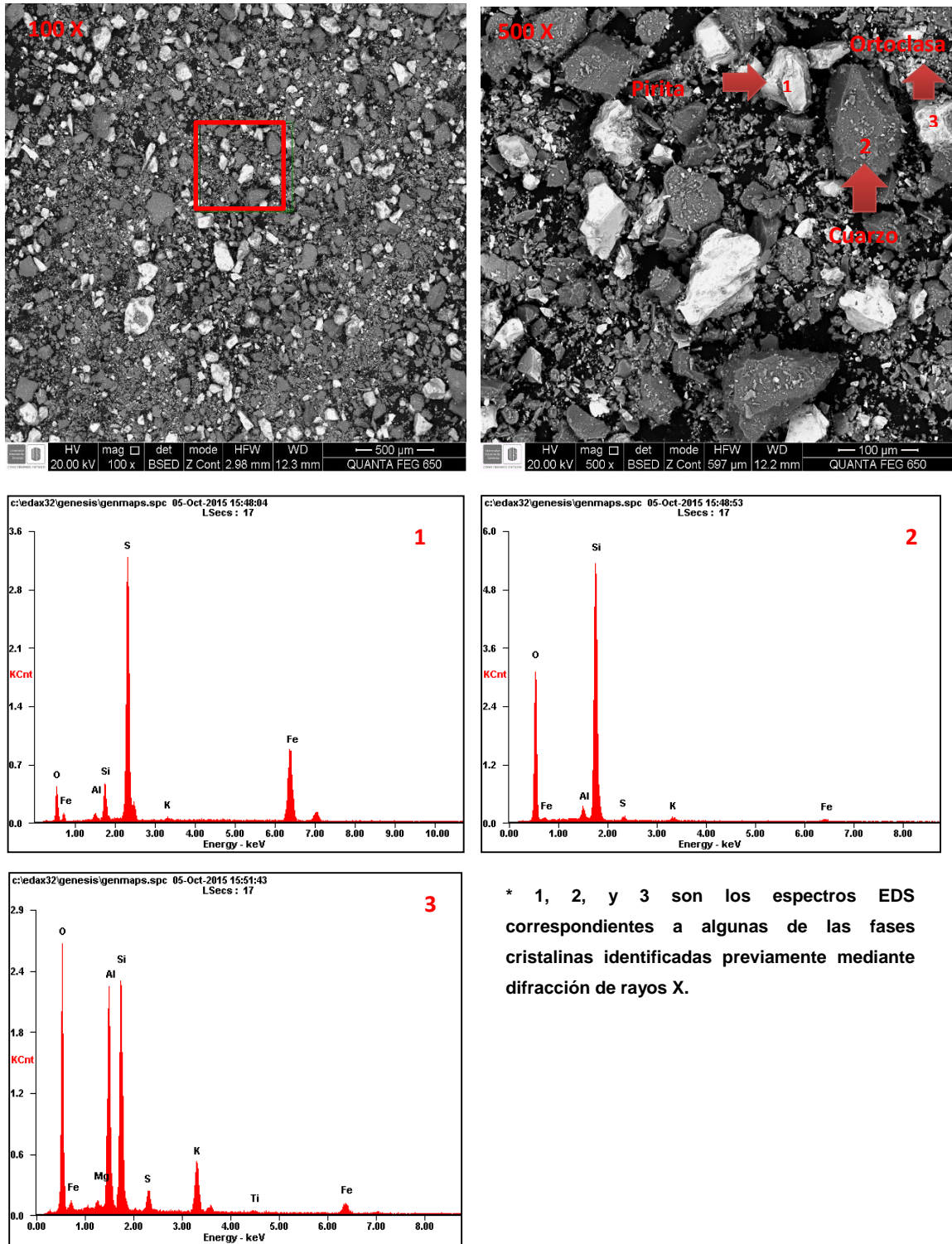
**Tabla 4.** Fases mineralógicas presentes en el mineral Reina de Oro.

		Especie	Fórmula química
cristalinos	Óxido	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
	Sulfuro	Pirita	FeS <sub>2</sub>
	silicatos	Ortoclasa	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
		Albita	Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )
		Flogopita	KMg <sub>3</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
moscovita		KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	

Dentro de las fases identificadas, se encontró la presencia de pirita ( $Fe_2S$ ), compuesto que permitió predecir un posible comportamiento refractario del mineral en procesos como la cianuración, debido a la posible asociación del oro a su matriz mineralógica y al elevado consumo de cianuro al reaccionar con dicho sulfuro. Además, con el uso de SEM-EDS se logró observar en las micrografías extraídas, la presencia de algunas de las fases detectadas con anterioridad en el mineral. En la Figura 7 se observa la micrografía del mineral Reina de Oro, para el cual se corroboró la presencia de especies como el cuarzo y la pirita.

Por ejemplo con los espectros EDS 1 y 2 presentes en la Figura 7, se confirmó la presencia de pirita y cuarzo respectivamente, ya que como se logra identificar, los principales picos corresponden a los elementos que conforman dichas especies. Mientras que el espectro EDS 3 de la Figura 7 se puede relacionar con la presencia de la ortoclasa.

**Figura 7.** Micrográficas SEM y espectros EDS del mineral reina de oro.



\* 1, 2, y 3 son los espectros EDS correspondientes a algunas de las fases cristalinas identificadas previamente mediante difracción de rayos X.

**Fuente:** microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650 y JSM 7600f.

**4.1.3 Caracterización química.** En la Tabla 5 se puede apreciar la composición química del mineral Reina de Oro, obtenida a través de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX). En ella se puede observar la presencia de elementos cianicidas (Cu, Zn, As, Fe, Mn), que son consumidores de cianuro y dificultan la disolución de oro en procesos convencionales de lixiviación. La notable presencia de dichos elementos podría indicar un posible comportamiento refractario del mineral al ser sometido a procesos de cianuración.

**Tabla 5.** Composición química del mineral reina de oro.

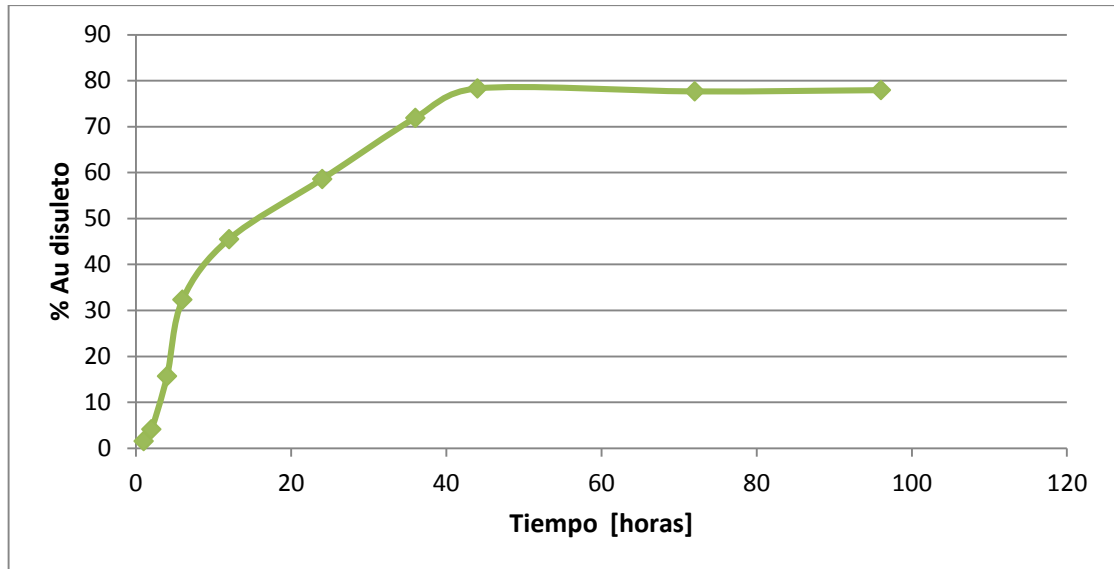
	<b>Au*</b> g/ton	<b>Ag*</b> g/ton	<b>Cu</b> %	<b>Zn</b> %	<b>As</b> %	<b>S</b> %	<b>Si</b> %	<b>Fe</b> %	<b>Mn</b> %	<b>Pb</b> %
<b>elementos**</b>	31,4	60,9	0.03	0.06	0.12	8.31	22.16	10.97	0.06	0.04
	Al %	K %	Mg %	Ti %i	Na %	Ca %	Zr %	Ba %	P %	Cl %
	5,20	3,33	0,37	0,34	0,17	0,13	0,07	0,07	0,02	0,01

\*Las leyes de Au y Ag en el mineral fueron determinadas por ensayo al fuego.

\*\*El ciento por ciento de la composición se alcanza con la suma del O, Cr, Ni, Rb, V, Y, y Mo.

**4.1.4. Cianuración en botella.** Los resultados de la cianuración en botella se muestran en la Figura 8, en esta se puede apreciar que la cinética de disolución de oro es mucho más rápida durante las primeras 6 horas, alcanzándose un 32% de disolución. Después de dicho tiempo, la cinética se vuelve más lenta (debido a la posible presencia de elementos cianicidas o especies sulfuradas que limiten la liberación del Au). El punto máximo de disolución (78.3%) se alcanza a las 44 horas, tiempo a partir del cual se observa una leve disminución en el % de disolución.

**Figura 8.** Cinética de lixiviación de oro con cianuro del mineral Reina de Oro durante 96 horas de lixiviación en botella, a una concentración de 1 g/L de NaCN y pH=10.



Tomando en cuenta la Tabla 6, donde se clasifica el grado de lixivabilidad de los minerales, y relacionándolo con la disolución máxima de Au (78,3%) obtenida por el proceso de cianuración en botella, se puede deducir que el mineral Reina de Oro es medianamente lixiviable. [18]

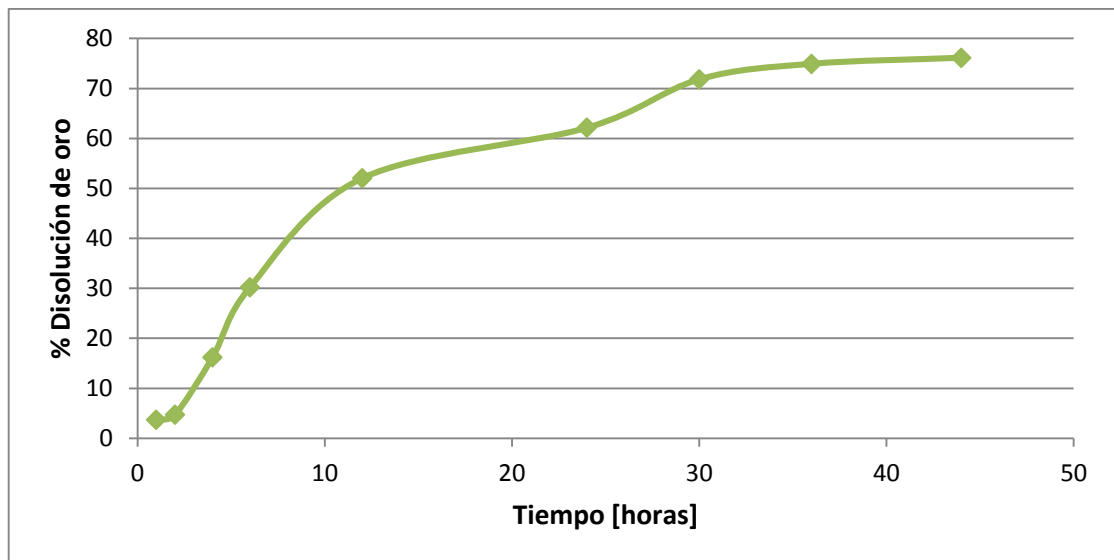
**Tabla 6.** Grado de lixivabilidad de minerales.

Oro disuelto (%)	Grado de lixivabilidad
<65 %	Difícilmente lixiviable
65-85 %	Medianamente lixiviable
>85%	Altamente lixiviable

**4.1.5 Cianuración por agitación mecánica.** A continuación se presentan los resultados cinéticos obtenidos para el proceso de cianuración por agitación mecánica del mineral tratado.

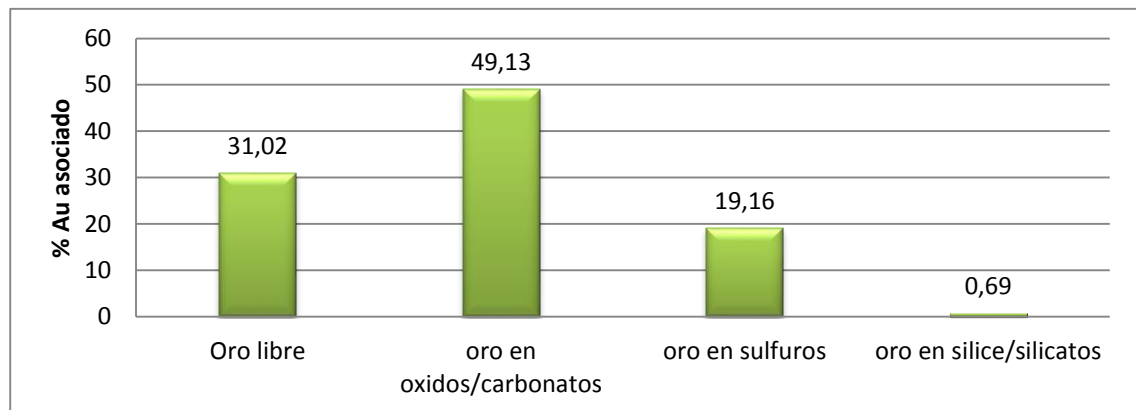
Como se observa en la Figura 9, la línea de tendencia describe una cinética de disolución de oro variable con el tiempo. Inicialmente se encontró un comportamiento de rápida disolución de oro hasta cumplirse las 12 horas de ensayo, obteniéndose un porcentaje de disolución del 52%. Luego se observó una reducción en la velocidad de disolución de las 12 a las 24 horas, para finalmente alcanzar un límite máximo de disolución de oro de aproximadamente un 76% a las 44 horas de ensayo.

**Figura 9.** Cinética de lixiviación de oro con cianuro del mineral Reina de Oro durante 44 horas de lixiviación por agitación mecánica a una concentración de 1 g/L de NaCN y pH=10.



**4.1.6 Lixiviación diagnóstica.** Los resultados obtenidos del ensayo de lixiviación diagnóstico se ven reflejados en la Figura 10. En relación a las asociaciones de oro, se encontró que este metal se encuentra agrupado tanto a óxidos (49,13 %) como a sulfuros (19,16%), además de presentarse en forma libre (31,02%). A partir de estos resultados, se pudo concluir que el mineral analizado presentaba un carácter refractario relativamente bajo, puesto que la asociación de oro a los sulfuros fue baja en comparación con su asociación a los demás compuestos (óxidos), este comportamiento además sustenta los altos valores de disolución obtenidos mediante la realización de los ensayos de cianuración en botella y por agitación.

**Figura 10.** Lixiviación diagnóstica. Asociación del oro con los diversos compuestos presentes en el mineral reina de oro.



## 4.2 CARACTERIZACIÓN DE ACEITES.

La caracterización de los aceites consistió principalmente en el cálculo de sus densidades y viscosidad con el fin de determinar su influencia en el proceso de aglomeración carbón-aceite. Con el propósito de obtener un valor confiable de los ensayos realizados se repitieron tres veces y se obtuvo un valor promedio (véase Tabla 7).

#### 4.2.1 Medición de densidad y viscosidad.

**Tabla 7.** Resultados de medición de densidad y viscosidad para cada uno de los aceite considerados en el estudio.

Descripción	Aceite crudo de soya	Aceite de motor
Densidad de la muestra g/mL	0,918 ± 0.1	0,875 ± 1,2
Viscosidad cps. a 23°C	55,450 ± 3,4	230,2 ± 8,5

#### 4.3 CARACTERIZACIÓN DE CARBONES.

**4.3.1 Análisis próximo de carbones.** Al igual que con el mineral, los carbones considerados para el estudio fueron caracterizados, dando como resultado los valores que se muestran a continuación:

**Tabla 8.** Análisis próximo de carbones.

propiedad	Carbón		
	La Grande	Carbón de Zipaquirá	Carbón de Ubaté
Humedad (%)	0.47	2,06	1,36
Cenizas (%)	4.64	13,88	11,67
Materia volátil (%)	37.15	7,68	37,22
Carbono fijo (%)	57.74	78,43	51,11
Índice de hinchamiento	4	No aglomeró	1 (1/2)
Poder calorífico	1145.78	1123,59	13778
Azufre total (%)	0.21	0,53	1,44
Clasificación del carbón por rango	Bituminoso tipo A	Bituminoso bajo volátil	Bituminoso tipo A

Una vez analizados los carbones, se procedió a clasificarlos según la norma ASTM D-388 [15] como se muestra en la Tabla 8.

**4.3.2 Ángulo de contacto.** En la Tabla 9 se muestran los resultados de la medición de ángulo de contacto a partir de los diferentes aceites considerados para esta investigación, además de las mediciones realizadas con agua.

**Tabla 9.** Medidas de ángulo de contacto.

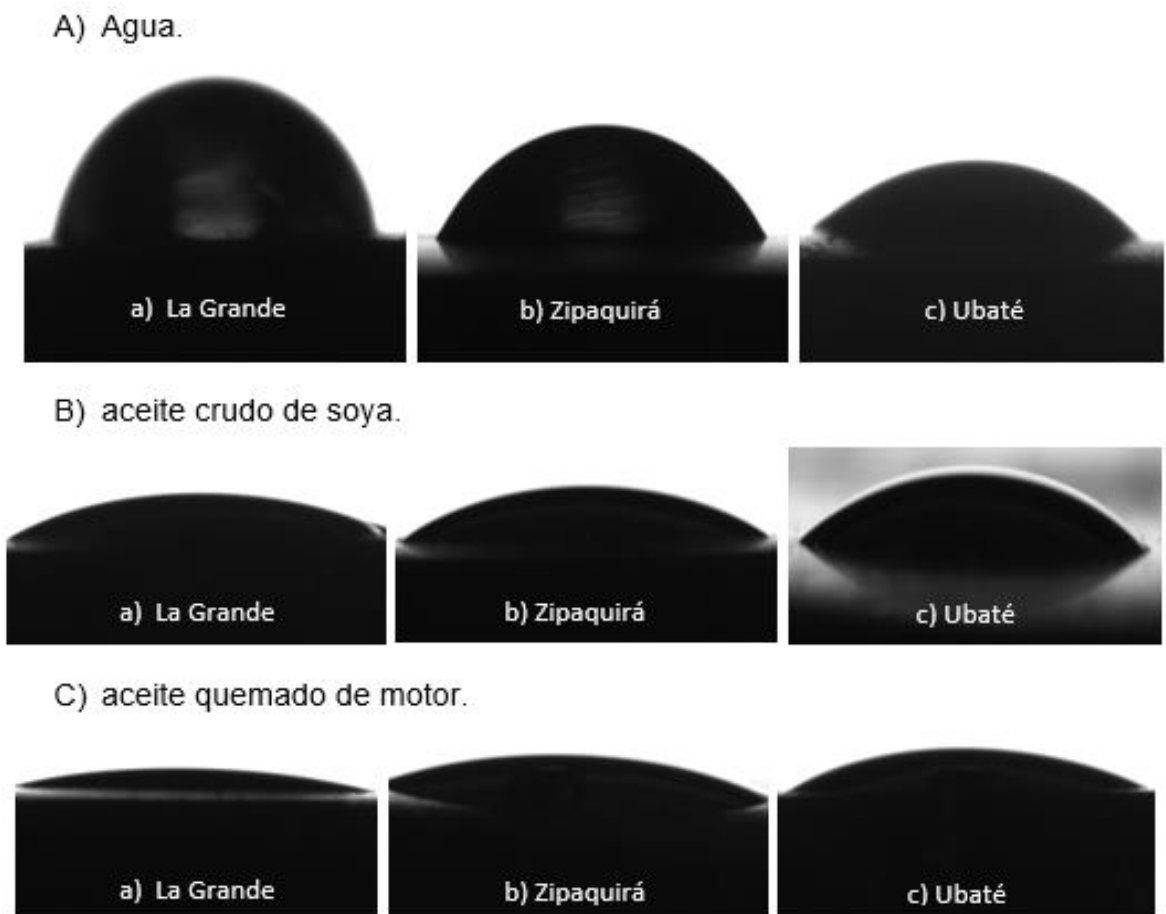
Carbón	Ángulo de contacto		
	agua	Aceite crudo de soya	Aceite quemado de motor
<b>La Grande</b>	84,58° ± 1,0	20,23° ± 1,3	13,82° ± 0,4
<b>Ubaté</b>	53,48° ± 4,5	33,91° ± 0,05	20,34° ± 2,2
<b>Zipaquirá</b>	66,91° ± 0,3	29,55° ± 0,4	17,08° ± 2,1

De estos resultados, se concluye que el carbón La Grande fue el que presentó un mayor carácter hidrofóbico (84,58°), es decir, presenta un menor nivel de mojabilidad al entrar en contacto con el agua, aspecto que es importante en el proceso de aglomeración de partículas sólidas con aceite, pues permite que exista una mayor humectación por parte del aceite que actúa como puente líquido. [19]. Por su parte, el carbón de Ubaté fue el más hidrofílico, formando un ángulo de contacto con el agua de 53,48°.

Con relación al ángulo de contacto respecto al aceite crudo de soya, se pudo observar que de los tres carbones, el de La Grande fue el que presentó un mayor

nivel de mojabilidad, seguido por el carbón Zipaquirá y Ubaté. Con el aceite quemado de motor se observó un comportamiento similar al encontrado en la medición de ángulo de contacto con aceite crudo de soya, donde el carbón proveniente de la mina La Grande reflejó mayores propiedades oleofílicas (véase Figura 11).

**Figura 11.** Imágenes de las medidas de ángulo de contacto entre los carbones La Grande, Zipaquirá, y Ubaté con los diferentes líquidos: A) agua, B) aceite crudo de soya, C) aceite quemado de motor.



Teniendo en cuenta las anteriores observaciones, se puede predecir que el carbón La Grande es el que mejor comportamiento tendrá en el proceso de aglomeración con los aceites (crudo de soya, quemado de motor).

**4.3.3 Aglomeración de carbones.** Una vez determinadas las principales propiedades de los carbones de interés (análisis próximo y ángulo de contacto), se procedió a evaluar las posibles combinaciones de aglomeración con las emulsiones de los aceites seleccionados para esta Investigación (crudo de soya y aceite quemado de motor). Las condiciones de trabajo utilizadas fueron las que se mencionaron previamente en la sección 3.3.3.

De los tres carbones considerados inicialmente para esta investigación, se encontró que solo uno presentaba características de aglomeración bajo la interacción con los aceites crudo de soya y quemado de motor (véase tabla 10). Como se observa en el Anexo C, los carbones de Zipaquirá y Ubaté no experimentaron aglomeración bajo ninguna de las condiciones consideradas, este comportamiento se pudo haber presentado por fenómenos generados en la interfase carbón/aceite y características inherentes a los carbones seleccionados.

**Tabla 10.** Poder aglomerante de los carbones.

Tipo de aceite	Carbón		
	La Grande	Zipaquirá	Ubaté
Crudo de soya	Si aglomeró	No aglomeró	No aglomeró
Aceite quemado motor	Si aglomeró	No aglomeró	No aglomeró

El método de aglomeración con aceite generalmente toma ventajas de la diferencia de las propiedades superficiales de los componentes del carbón, donde las partículas que son en gran parte de naturaleza orgánica se aglomeran con preferencia a aquellas que son de origen inorgánicas, que tienden a poseer un comportamiento poco hidrófobo y oleófilo [20, 21, 22, 23, 24, 25]. Por lo tanto es posible sustentar que los carbones de Ubaté y Zipaquirá no aglomeraron en parte debido a que como se registra en la Tabla 8, estos carbones en comparación con el carbón La Grande, poseen una mayor cantidad de cenizas, material que se caracteriza por ser de naturaleza inorgánica e hidrofílica. Esta característica, en conjunto con la baja mojabilidad que presentaron los carbones de Ubaté y Zipaquirá respecto a los aceites, pudieron haber provocado que dichos carbones no aglomeraran (véase tabla 10 y Anexo C).

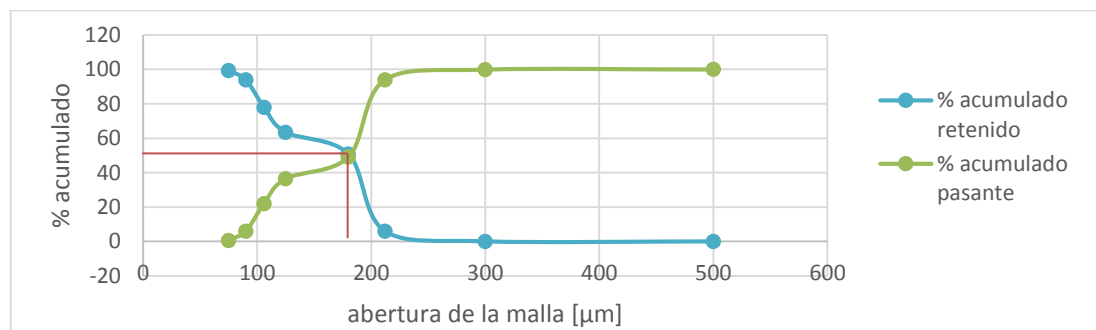
Otro factor importante en relación a la formación o no de aglomerados es el grado de meteorización (oxidación) que pudieron haber sufrido los carbones al ser expuestos a un medio diferente al de su proceso de formación. Ocasionando de esta manera la aparición de grupos carboxilos y carbonilos, responsables de la disminución de la hidrofobicidad del carbón [13].

**4.3.4 Análisis granulométrico.** En la Figura 12 se presenta el análisis granulométrico del carbón La Grande, el cual se escogió para el estudio, debido a que de los tres carbones considerados inicialmente fue el único que permitió la formación de los aglomerados de carbón-aceite necesarios para la implementación del proceso CGA en la recuperación de oro.

La granulometría del carbón La Grande, se ajustó de tal manera que la mayoría de las partículas pasaran la malla Tyler 80 (212  $\mu\text{m}$ ), ya que en ensayos previos se

pudo comprobar que el carbón con tamaño de partícula más grueso (entre 35 y 50 mallas Tyler) no lograba su aglomeración con el aceite, usado como principal agente aglomerante. El tamaño medio de partícula fue de 180  $\mu\text{m}$  como se logra observar en la figura 12.

**Figura 12.** Análisis granulométrico carbón La Grande.

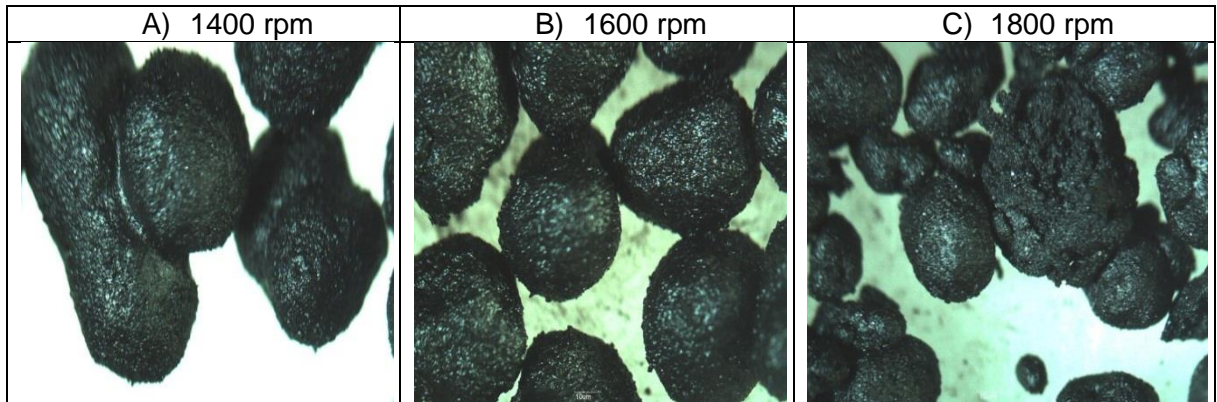


#### 4.4 PRUEBAS PRELIMINARES DEL PROCESO CGA.

**4.4.1 Preliminar 1: Variación de la velocidad de agitación para la formación de aglomerados.** Esta prueba permitió obtener información sobre la influencia que ejercía la velocidad de agitación, en la formación de aglomerados a partir del carbón La Grande. Para su realización se tuvieron en cuenta las condiciones de trabajo descritas previamente en la sección 3.4.1.1, en conjunto con la utilización de un % de sólidos igual al 10%.

A partir de los resultados conseguidos, se evidenció una notable diferencia respecto a los tamaños y morfología de los aglomerados obtenidos como se muestra en la Figura 13.

**Figura 13.** Aglomerados producto de variar la velocidad de agitación: A) 1400 rpm, B) 1600 rpm, C) 1800 rpm.



Con la variación de la velocidad de agitación se pudo encontrar que para el carbón tratado (carbón La Grande), una agitación de 1600 rpm es la adecuada para lograr la formación de aglomerados con una morfología casi esférica (Figura 13 B), puesto que dicha velocidad generó la suficiente agitación mecánica que permitiera que las partículas de carbón recubiertas con el agente ligante (aceite) chocaran entre sí y formaran los aglomerados, debido a la atracción capilar de los puentes de aceite entre las partículas sólidas (carbón). Caso contrario se observó con las demás velocidades ensayadas, para las cuales los aglomerados formados no presentaron una morfología bien definida y su tamaño variaba considerablemente.

A velocidades menores (1400 rpm), se encontró que los aglomerados obtenidos presentaban tamaños mayores, pero tendían a conglomerarse en una sola partícula (Figura 13A). Mientras que el rendimiento en la formación de aglomerados disminuyó con un aumento en la velocidad de agitación, puesto que, esto conllevó a que se crearan fuerzas de cizallamiento más grandes que tendieron a romper los aglomerados ya formados (Figura 13 C). [10]. Respecto a

estos resultados, se decidió implementar para ensayos posteriores una velocidad de 1600 rpm para la formación de aglomerados.

**4.4.2 Preliminar 2: Ensayos preliminares de la etapa de contactación del proceso CGA.** Las variables de estudio, cantidad de colector y tiempo de contactación se escogieron debido a su relevancia en la obtención de resultados satisfactorios sobre la recuperación de oro, ya que el acondicionante (Colector Aerofloat 208) influye directamente sobre las propiedades fisicoquímicas de las partículas del mineral asociadas al oro, mientras que el tiempo de contactación, define la cantidad de mineral adherido a la superficie de los aglomerados.

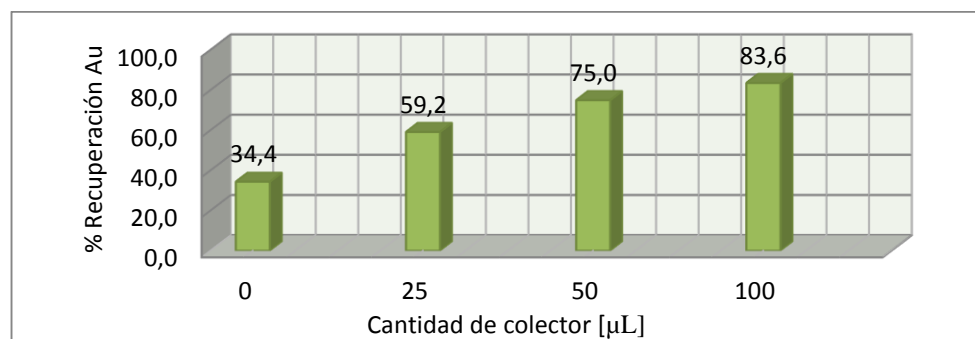
Para estos ensayos preliminares, las condiciones de trabajo fueron las siguientes:

- Tipo de mineral: Concentrado Reina de Oro.
- % sólidos en la pulpa (50 g de mineral + agua): 20%
- Tiempo de acondicionamiento de la pulpa mineral: 5 min
- Relación en peso aglomerados/mineral: 1,0
- Altura de la hélice: 10m
- Velocidad de agitación: 600 rpm
- Separación de aglomerados cargados: tamizaje.

**4.4.2.1 Influencia de la variación en la cantidad de colector sobre la recuperación de oro.** Con relación a la cantidad de colector adicionado a la pulpa mineral, se encontró que efectivamente un aumento en su cantidad favorece significativamente la recuperación de oro (véase Figura 14), puesto que permite que dichas partículas adquieran una mayor hidrofobicidad y así se adhieran más

fácil a la superficie de los aglomerados obtenidos. En este sentido, se pasó de un porcentaje de recuperación de oro del 34,4% al 83,6% con una adición de 100  $\mu\text{L}$  de colector. Esta situación refleja, que efectivamente la acción de dicho acondicionante es indispensable para mejorar la adhesión del mineral pirítico a la superficie de los aglomerados, por acción de la variación en sus propiedades superficiales.

**Figura 14.** Influencia de la variación de colector sobre la recuperación de oro en el proceso CGA.

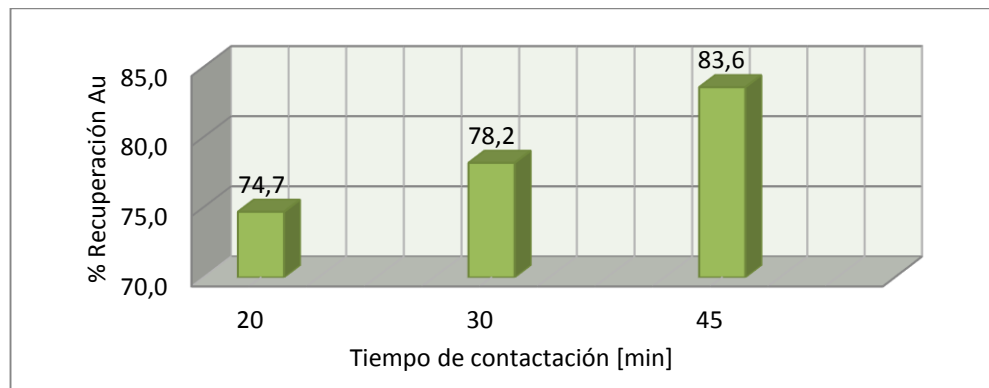


**4.4.2.2 Influencia de la variación en el tiempo de contactación sobre la recuperación de oro.** Para la evaluación de la influencia que ejerce la variación del tiempo de contactación en la recuperación de oro se siguieron las mismas condiciones mencionadas en el numeral 4.4.2, con la única diferencia de que se tomaron a consideración los resultados obtenidos de la variación de la cantidad de colector, donde se destaca que con la adición de 100 microlitros de colector a la pulpa mineral se obtuvieron mejores recuperaciones de oro.

Respecto al tiempo de contactación, se pudo determinar que existe una relación proporcional entre la recuperación de oro y el aumento del tiempo de contactación

de los aglomerados con la pulpa mineral (véase Figura 15). Es decir, se encontró mayor cantidad de oro asociado a los aglomerados a medida que se prolongaban los tiempos de contactación. Este comportamiento se presentó básicamente porque las partículas de mineral dentro de la suspensión, a mayores tiempos de contactación tuvieron más tiempo y oportunidad de adherirse sobre la superficie de los aglomerados, al igual que los aglomerados tuvieron mayor posibilidad de saturar su superficie con el aumento de la carga de material pirítico.

**Figura 15.** Influencia de la variación del tiempo de contactación sobre la recuperación de oro.



#### **4.5 PRUEBAS FINALES: ENSAYOS DE AGLOMERACIÓN DE CARBÓN CON ACEITE.**

El estudio de la etapa de aglomeración se hizo en series de ensayos. Las condiciones de trabajo fueron las siguientes:

- Recipiente para la aglomeración: vaso de 2,0 L
- Peso de carbón: 50 g
- Tipo de carbón: La Grande

- % solidos: 10%
- Altura de la hélice: 10 mm
- Velocidad de agitación: 1600 rpm

#### 4.5.1 Relación en peso aceite/carbón.

**4.5.1.1 Influencia de la variación en la relación aceite/carbón sobre la resistencia y tamaño de los aglomerados formados.** La variación de la relación en peso aceite/carbón es un factor importante en el proceso de aglomeración esférica, ya que en su estudio se encontró como comportamiento general, que la formación de aglomerados está fuertemente influenciado por la adición de la cantidad adecuada de aceite. En este estudio, tanto para el aceite crudo de soya como el aceite quemado de motor se evaluaron las mismas relaciones en peso de aceite/carbón según se observa en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Medición de tamaños y resistencia de los aglomerados formados a partir de la variación de la relación en peso aceite/carbón tanto para el aceite crudo de soya como el aceite de motor.









carbón	tipo de aceite	Relación aceite/carbón	Tamaño promedio de aglomerados [mm]	Resistencia promedio (N° caídas)
La Grande	Crudo de soya	0,40	Se formó una pasta	-----
		0,30	2-3	19
		0,25	1-2	6
		0,20	No se formaron aglomerados	-----
	Quemado de motor	0,40	Se formó una masa homogénea	-----
		0,30	Aglomerados muy aceitosos	-----
		0,25	2-3	24
		0,20	1-3	13

Inicialmente se pudo encontrar que no todas las relaciones evaluadas propiciaron la generación de aglomerados. Estos resultados variaron claramente de un aceite a otro como se logra apreciar en la figura 16.

Respecto a la eficiencia en la formación de aglomerados, se pudo encontrar que aumenta con el incremento de la cantidad de aceite hasta llegar a un punto crítico, por encima del cual no se forman aglomerados por la sobresaturación del puente líquido, lo que hace que se obtenga una sola pasta aceitosa de carbón depositada al fondo del recipiente de agitación (véase Figura 16A y 16E) o aglomerados muy aceitosos que no se separan entre sí (Figura 16 F). Caso contrario se presentó con los niveles bajos de aceite, que limitaron la formación esférica de aglomerados, puesto que la mojabilidad parcial del carbón conllevó a que este presentará un incompleto recubrimiento de las partículas, limitando a su vez el número de puntos de enlace entre partículas en la suspensión (Figura 16 D). Las bajas concentraciones de aceite, también afectaron directamente la resistencia de los aglomerados formados (véase Tabla 11), puesto que en este caso la mayor parte de los vacíos entre las partículas se pudieron haber llenado de agua. [26]

Bajo las condiciones evaluadas se puede concluir que las relaciones que favorecen la plena formación de aglomerados con suficiente resistencia para su manipulación son: A/C: 0,25 y 0,3 para aceite crudo de soya (Figuras 16 C y 16 B); y una relación A/C: 0,20 y 0,25 para el aceite quemado de motor (Figuras 16 H y 16 G).

**Figura 16.** Productos resultantes de la variación en la relación aceite/carbón.  
 Aceite crudo de soya (A-D). Aceite quemado de motor (F-H)

Aceite crudo de soya Relación A/C: 0.4	Aceite quemado de motor: A/C:0.4
 <p><b>A</b></p>	 <p><b>E</b></p>
Aceite crudo de soya Relación A/C: 0.3	Aceite quemado de motor: A/C:0.3
 <p><b>B</b></p>	 <p><b>F</b></p>
Aceite crudo de soya Relación A/C: 0.25	Aceite quemado de motor: A/C:0.25
 <p><b>C</b></p>	 <p><b>G</b></p>
Aceite crudo de soya Relación A/C: 0.20	Aceite quemado de motor: A/C:0.20
 <p><b>D</b></p>	 <p><b>H</b></p>

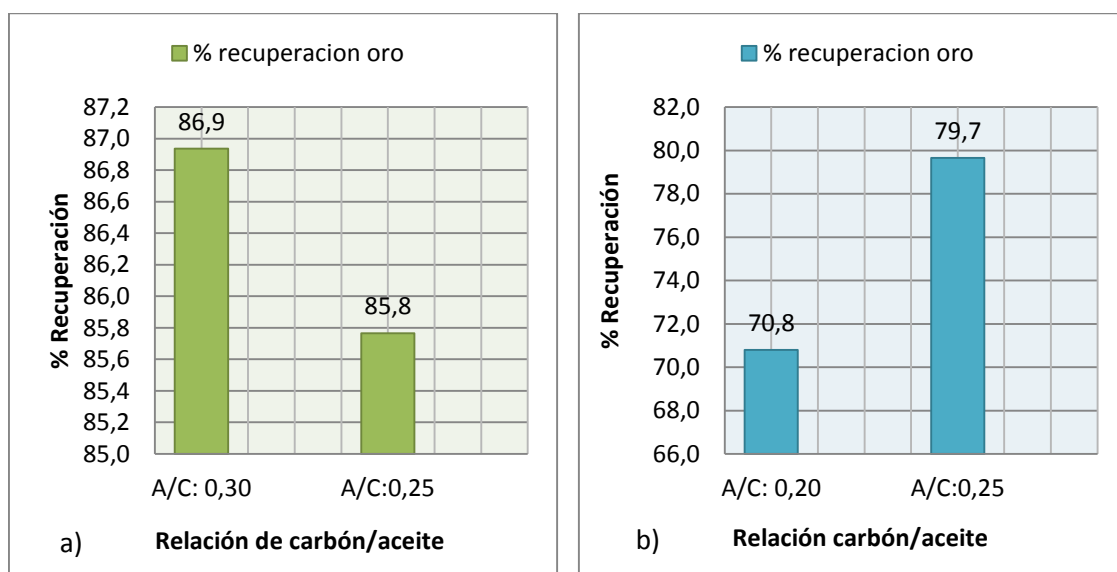
**4.5.1.2 Influencia del tipo de aceite.** Los buenos resultados obtenidos por parte del uso del aceite crudo de soya y aceite quemado de motor se deben en gran parte a su carácter oleofílico o buen nivel de mojabilidad, es decir existe una buena adsorción del aceite en el proceso de aglomeración, lo que a su vez permite que existan puentes líquidos que contribuyan en la unión de las partículas del carbón. Dichos puentes líquidos dependiendo de propiedades como la viscosidad del aceite, pueden ocasionar que se generen aglomerados con menor o mayor resistencia. Esta situación se vio reflejada en los estudios realizados, puesto que se obtuvieron mayores resistencias en los aglomerados fabricados a partir del aceite quemado de motor, cuya viscosidad es notablemente mayor que la del aceite crudo de soya (véase Tabla 11), propiedad que le confiere una mayor fuerza de enlace entre la interacción de puentes líquidos que hace más estable la estructura de los aglomerados.

No obstante, luego del secado de los aglomerados formados a partir de aceite quemado de motor, estos perdieron completamente su resistencia tomando un carácter friable que conllevó a que se desintegraran al ser tocados. Dicha situación se explica por el hecho de que el aceite quemado de motor posee una viscosidad muy alta, que genera una capa gruesa del mismo dentro alrededor de las partículas de carbón, la cual se elimina durante el secado, dejando vacíos que disminuyen la resistencia de los aglomerados.

**4.5.1.3 % Recuperación de oro a partir de los aglomerados seleccionados con la variación en la relación en peso aceite/carbón.** Las pruebas de recuperación de oro se llevaron a cabo con los aglomerados formados a partir de las relaciones A/C seleccionadas previamente para cada aceite.

Con respecto a la captación de oro se pudo destacar que las mayores recuperaciones se presentaron con los aglomerados formados a partir del aceite crudo de soja, los cuales permitieron alcanzar porcentajes considerables de hasta un 86.9% de recuperación a una relación A/C: 0.3 (ver Figura. 17 a). En el caso del aceite quemado de motor la eficiencia máxima obtenida fue del 79,7% con una relación A/C: 0.25 (Véase Figura 17 b).

**Figura 17.** % recuperación de oro con los aglomerados obtenidos con la variación de la relación A/C. a) aceite crudo de soja. b) aceite quemado de motor.



A partir de estos resultados también se pudo deducir que las mayores captaciones de Au estuvieron asociadas a aquellos aglomerados que presentaron tamaños entre 2-3 mm al igual que una muy buena resistencia. Por consiguiente, para los posteriores análisis de la variación en el tiempo de aglomeración, se decidieron escoger las relaciones en peso de aceite/carbón (A/C) que presentaron mayor recuperación de oro, para cada uno de los aceites.

## 4.5.2 Tiempo de aglomeración.

**4.5.2.1 Influencia de la variación en el tiempo de aglomeración sobre la resistencia y tamaño de los aglomerados formados.** Una vez seleccionados los valores más adecuados para la relación aceite/carbón, A/C: 0,3 para el aceite crudo de soya y A/C: 0,25 para el aceite quemado de motor, se procedió con el estudio de la variación del tiempo de aglomeración.

El estudio de la variación del tiempo de aglomeración demostró, que existe un aumento de tamaño de los aglomerados a medida que se emplean mayores tiempos de aglomeración (véase Tabla 12 y Anexo D).

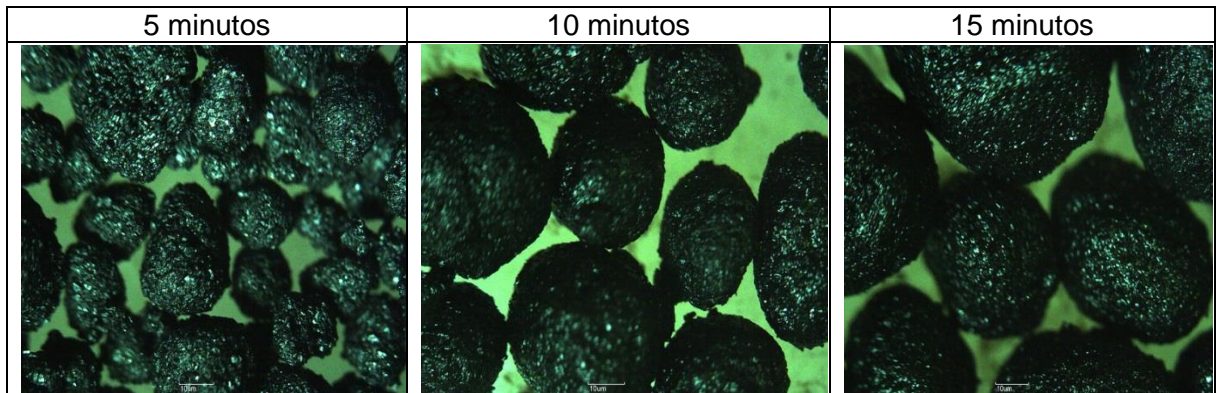
**Tabla 12.** Medición de tamaños y resistencia de los aglomerados formados a partir de la variación del tiempo de aglomeración para el aceite crudo de soya y quemado de motor.

carbón	Tipo de aceite	Tiempo de aglomeración [min]	Tamaño promedio de aglomerados [mm]	Resistencia promedio (N° caídas)
La Grande	Crudo de soya A/C:0,3	5	1-2	3
		10	2-3	22
		15	3-5	12
	Quemado de motor A/C:0.25	5	1-3	13
		10	3-4	25
		15	3-5	36

Aunque no es considerable la variación en cuanto al tamaño de los aglomerados, si fue evidente que existe un pequeño crecimiento de dichas superficies entre los

primeros 5 minutos hasta completar 15 minutos de aglomeración. (Véase Figura 18).

**Figura 18.** Morfología de los aglomerados formados a partir de la variación del tiempo de aglomeración, con aceite crudo de soya.



Otro resultado importante de considerar fue que para el aceite quemado de motor se encontró que el crecimiento en tamaño de los aglomerados significó a su vez una variación directa de su resistencia (véase Tabla 12), obteniéndose mejores resultados para aquellos aglomerados con tamaños mayores, formados a partir de un tiempo de aglomeración más prolongado (15 min).

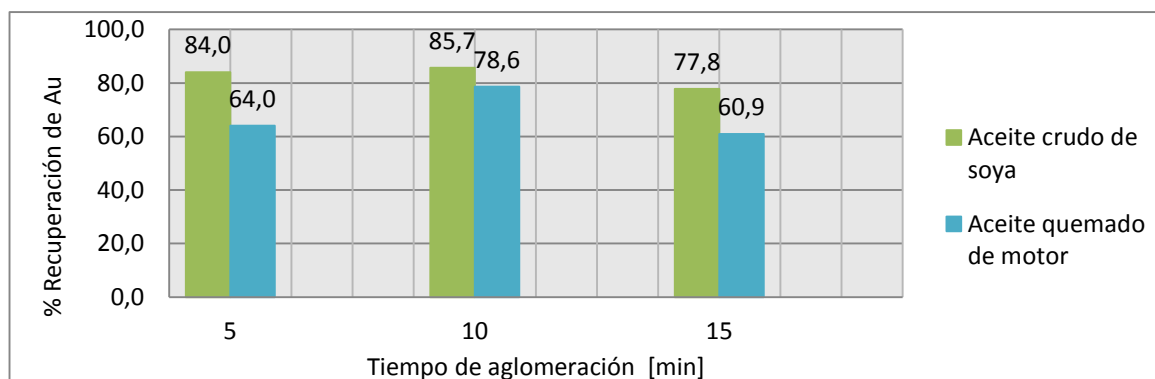
Caso contrario ocurrió con los aglomerados formados a partir del aceite crudo de soya, del cual se encontró que los aglomerados más resistentes fueron los formados luego de 10 minutos de aglomeración, mientras que los aglomerados más grandes, formados luego de 15 minutos fueron menos resistentes. Este comportamiento se puede sustentar en el hecho de que dichos aglomerados al verse expuestos a mayores tiempos de agitación tendieron a deformarse (por

acción de las fuerzas de cizallamiento), perdiendo su forma inicial, y a su vez generando una disminución directa en su resistencia.

**4.5.2.2 % recuperación de Au a partir de los aglomerados obtenidos con la variación del tiempo de aglomeración.** Una vez evaluada la influencia de la variación del tiempo de aglomeración sobre la formación de aglomerados, se procedió a realizar los correspondientes ensayos de contactación.

Realizando una comparación entre las recuperaciones de oro obtenidas bajo los distintos aglomerados puestos en contactación, se pudo determinar que los aglomerados formados luego de 10 minutos de aglomeración, recuperaron mayor cantidad de oro, comportamiento que se presentó de manera semejante tanto para los aglomerados fabricados con aceite crudo de soja (A/C: 0.3), como los obtenidos a partir de aceite quemado de motor (A/C: 0.25) (véase Figura 19).

**Figura 19.** Comparación de las recuperaciones de oro obtenidas con los aglomerados formados a diferentes tiempos de aglomeración con aceite crudo de soja y aceite quemado de motor.



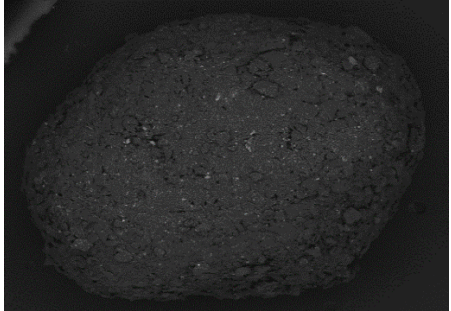
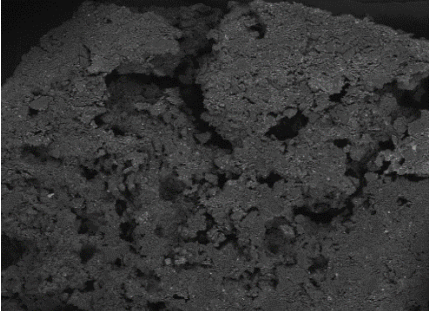
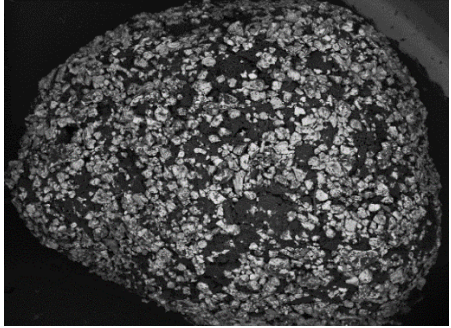
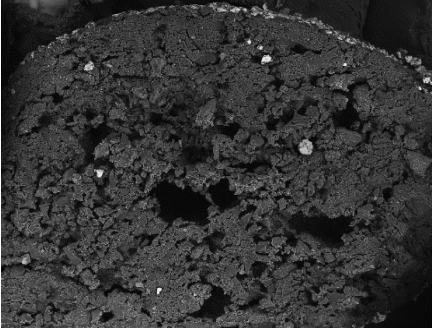
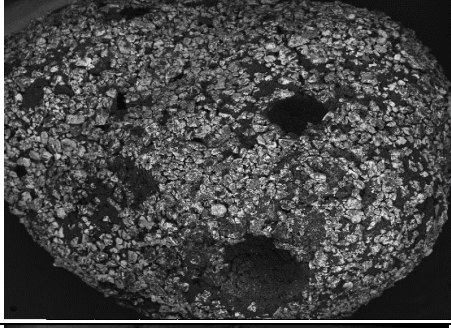
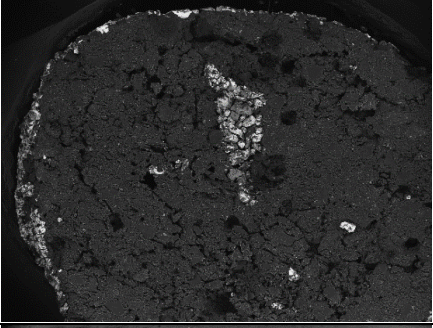

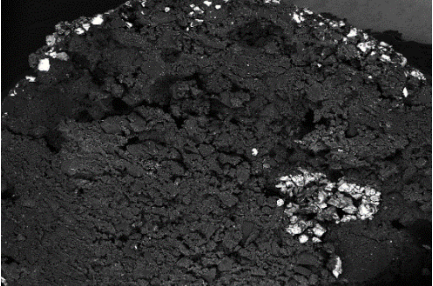
Las buenas recuperaciones de oro con los aglomerados formados a partir de 10 minutos de aglomeración, se puede asociar directamente a su tamaño, puesto que estos presentaron una mayor área superficial disponible para captar mayor cantidad de oro, y a su vez poseían una buena resistencia que les permitió soportar las fuerzas de cizallamiento producidas por la agitación al momento de la contactación. Para los aglomerados formados a partir de tiempos menores de aglomeración (5min), se observó una disminución en la recuperación de oro, debido a que estos poseían menores resistencias, que al momento de ser separados de las colas, tendían a desintegrarse, ocasionando que existieran pérdidas de mineral en los relaves del proceso. Por último, para los aglomerados obtenidos en tiempos mayores de aglomeración (15 min) la disminución en la recuperación, se hace evidente, dado a la disminución del área superficial para la adhesión del mineral, a causa del aumento de sus tamaños.

#### **4.6 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y MINERALÓGICA DE LOS AGLOMERADOS CARGADOS.**

**4.6.1 Evaluación de la adhesión de las partículas de mineral a los aglomerados.** Respecto a los resultados obtenidos en las pruebas finales, se evaluó la adhesión de las partículas de mineral para los aglomerados fabricados a partir del aceite crudo de soya, puesto que fueron los que permitieron obtener mayores recuperaciones de oro.

A continuación en la Figura 20, se muestran las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido de las superficies y del interior de los aglomerados, cargados después de varios tiempos de contactación con la pulpa mineral.

**Figura 20.** Adhesión de mineral a la superficie e interior de los aglomerados. Micrografías tomadas a 90X.

Tiempo de contactación	Exterior del aglomerado	Interior del aglomerado
0		
5		
15		
45		

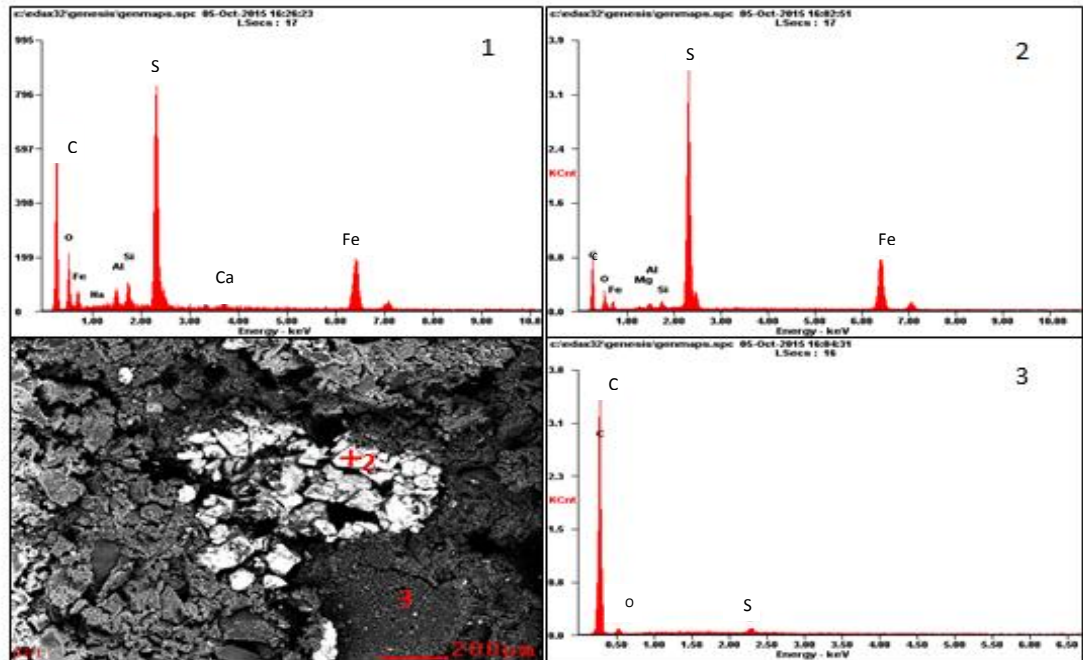
Al observar las imágenes correspondientes al tiempo cero (aglomerado sin cargar), se logró distinguir notablemente que tanto en la superficie como en el interior, los aglomerados poseen cierta cantidad de porosidades y grietas, producidas posiblemente por la falta de cohesión entre las partículas del carbón.

Las imágenes además revelaron, que a medida que se aumentaba el tiempo de contactación, se presenciaba una mayor adhesión de las partículas de mineral en la superficie del aglomerado. También se evidencio que algunos granos de mineral se encontraban dentro de los aglomerados, incrustados en las porosidades que estos presentaban. Esta migración pudo haberse generado por las colisiones interpartícula, es decir por las fuerzas de choque generadas por la interacción aglomerado-mineral de oro y aglomerado-aglomerado. [1][27].

Posteriormente, se realizó un EDS con el propósito de mostrar los elementos que se encontraban asociados tanto a la superficie como el interior del aglomerado cargado (véase figura 21).

De la figura 21, se puede concluir que tanto la superficie como el interior de los aglomerados después de 45 minutos de contactación, se encuentra principalmente compuesto por pirita, ya que como se observan en los EDS 1 y 2, los principales picos del espectro hacen referencia a elementos como el azufre y hierro que son los principales elementos que componen dicha especie. Además también se pudo evidenciar que a pesar de que existe migración al interior de los aglomerados, gran parte de la superficie se encuentra compuesta por carbón como se muestra en el EDS 3 de la figura 21.

**Figura 21.** EDS del aglomerado cargado con 45 minutos de contactación. 1) EDS superficie del aglomerado cargado, 2 y 3 EDS del interior del aglomerado.



Finalmente se realizó un análisis de la adhesión de mineral a los aglomerados, por medio del uso del estereoscopio (véase Anexo E), mediante el cual se pudo identificar un comportamiento similar al observado con las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido, donde a partir de 15 minutos de contactación ya se lograban distinguir dentro de los aglomerados pequeñas zonas depositadas de mineral.

**4.6.2 Caracterización mineralógica de aglomerados y colas.** Una vez determinadas las morfologías de los aglomerados cargados a diferentes tiempos de contactación por SEM; se quiso comparar cualitativamente las fases cristalinas

a diferentes tiempos de contactación (15 y 45 minutos) mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX).

Como se logra observar en los difractogramas del Anexo F, se identifica que no hubo diferencias significativas respecto a las fases presentes para los productos obtenidos (aglomerados y colas) con los diferentes tiempos de contactación. Es evidente para ambos casos (15 y 45 minutos) que en las colas prevalece la presencia de cuarzo, moscovita y ortoclasa.

Por otra parte, en los difractogramas de los aglomerados, se pudo identificar una notable disminución en la intensidad de los picos como consecuencia de la presencia de material amorfo (carbón). La altura relativa de los picos de pirita con respecto a los de cuarzo aumentó notablemente, lo que indica un mayor contenido de pirita que de cuarzo en los aglomerados cargados.

Por último, también se evidenció adhesión de partículas finas de arcilla (caolinita) en los aglomerados, ya que el pico representativo de dicha fase solo apareció en los espectros correspondientes a los aglomerados. (véase Anexo F).

## 5. CONCLUSIONES

- A partir de la caracterización del mineral se pudo determinar, que este presentaba cierta naturaleza sulfurada (pirita) con un grado de lixiviabilidad intermedio (78,3%), causado por la presencia de elementos cianicidas tales como Cu, As, Zn, Fe y Mn.
- Los resultados permitieron concluir que el contenido de cenizas en el carbón es un factor crítico para el proceso de aglomeración con aceite. Aquellos carbones con mayor contenido de ceniza tienden a disminuir su comportamiento hidrofóbico y oleofílico, esto debido a la presencia de mayor cantidad de partículas inorgánicas como principal constituyente de las cenizas.
- De acuerdo con las variables estudiadas para la etapa de formación de aglomerados, se concluye que las mejores condiciones se obtienen con la implementación de un carbón con bajo contenido de ceniza (La Grande), el uso de un aceite de intermedia viscosidad (aceite crudo de soya), una relación en peso de aceite/carbón igual a 0.3, tiempo de aglomeración de 10 minutos y una velocidad de agitación de 1600 rpm. Bajo estas condiciones se alcanzó una recuperación del 85% de oro, superando en un ocho por ciento la extracción de oro por el método de cianuración.
- De los estudios preliminares de la etapa de contactación del proceso CGA, se determinó que la recuperación de oro varía monótonamente con respecto a las variables concentración del colector y tiempo de contactación. Para los niveles de las anteriores variables estudiados, se

determinaron como condiciones adecuadas la adición del colector Aerofloat 208 a una concentración de 100  $\mu\text{L}$ / 50g de mineral y 45 minutos de contacto de los aglomerados con la pulpa mineral.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda, implementar carbones con bajo contenido de material inorgánico, para que se garantice su buen comportamiento en el proceso de aglomeración.
  
- Se recomienda realizar un análisis composicional completo de los aceites, puesto que sus propiedades químicas y físicas, definen su poder aglomerante.
  
- Se recomienda investigar un método alternativo que posibilite la recuperación de oro sin la necesidad de calcinar el carbón.
  
- Se recomienda usar aceites con baja e intermedia viscosidad, para evaluar su influencia en la formación de aglomerados.
  
- Se recomienda realizar un estudio de las variables influyentes en la etapa de contactación como relación en peso de aglomerados/mineral y naturaleza del mineral.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J.P.S. CALVEZ, M.J. KIM, P.L.M. WONG and T. TRAN. Use of coal-oil agglomerates for particulate gold recovery. School of Chemical Engineering and Industrial Chemistry, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia. Minerals Engineering. Journal ELSEVIER [online] 1998, vol 1, [citado: 13 de junio], Pages 803–812, disponible en Baes de datos ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

[2] CORDOBA TUTA. Elcy María. Recuperación de oro particulado con aglomerados carbón - aceite - una tecnología limpia en la extracción del oro. Trabajo de grado (Magister en ingeniería de materiales). Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicoquímicas. Programa ingeniería de materiales. 1998 50-120 p.

[3] VARGAS AVILA, Mayra y TRASLAVIÑA, jose, mejoramiento de los procesos de beneficio de minerales auroargentíferos de “mina vieja” en el asentamiento minero de san pedro frio (municipio de santarosa del sur de bolívar). Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicoquímicas. Programa ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales. Bucaramanga, 2008, pag 35-39.

[4] DOMIC, M.E. Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones, 1 edición, Agosto 2001.

[5] GAVIRIA CECILIA, ATEHORTUA Alba, y PEREZ Juan. Recuperación de oro libre mediante su aglomeración con un agregado de carbón-aceite. Boletín de Ciencias de la tierra, [en línea] 2006, No 18 [citado: 15 de julio] pág: 39-44.

[6] SAIMN, THE SOUTHERN AFRICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY. Free gold recovery by coal-oil agglomeration. Journal paper. 2000 [en línea] <http://www.saimm.co.za/Journal/v100n01p057.pdf> [citado: 13 de abril 2015]

[7] COLEMAN R., Sparks B., Majid A.. and Toll F. Agglomeration-flotation: recovery of hydrophobic components from oil sands fine tailings. Fuel processing technology [online] 1995, vol. 74 No. 8, pág. 1156-1161, [citado: 27 de julio], disponible en Base de datos ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander

[8] MAJID A. y Sparks B. Role of hydrophobic solids in the stability of oil sands fine tailings. Fuel processing technology [online] 1996, vol.75, No. 7, [citado: 14 de marzo] pág. 879-884, disponible en Base de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

[9] VAN NETTEN LIM, Moreno Roberto, y Galvin Kevin. A kinetic study of a modified fine coal agglomeration process. Procedia Engineering, [online] 2015 vol 102, [citado: 9 de mayo] pág. 508-516. 2015, disponible en Base de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander

[10] G.H.V.C CHARY, M.G Dastidar. Optimization of experimental conditions for recovery of coking coal fines by oil agglomeration technique. Fuel processing technology, [online] 2010 vol 89, [citado: 27 de junio] pag. 2317-2322. Disponible en Base de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander

[11] GARCÍA CONTRERAS, German Antonio. Estudio del comportamiento térmico del coque de petróleo y de sus mezclas con carbones bituminosos colombianos. Trabajo de grado magister ciencias química. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Química, 2011. 5-7p. [en línea] <<http://www.bdigital.unal.edu.co/3987/1/01197464.2011.pdf>>

[12] Lowry, H.H., Chemistry of coal utilization: supplementary volume. 1963. Medium: X; Size: Pages: 1142.

[13] WENCHENG Xia, JIANGUO Yang, CHUAN Liang. Investigation of change in surface properties of bituminous coal during natural wethering processes by XPS and SEM. School of Chemical Engineering and Technology, [ online] 2014 Volume 293, [citado: 1 de octubre], pag 293–298, disponible en Bases de datos ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

[14] Ding, L. Investigation of bituminous coal hydrophobicity and its influence on flotation. Energy and Fuels And Fuels, [online] 2009 23(11), [citado: 4 de octubre] p.p.5536-5543, disponible en Bases de datos AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

[15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard classification of coal by Rank ASTM D388-05. Philadelphia, PA, United States 1939.pp 1-6

[16] ADAMSON A.W. Physical Chemistry of Surfaces, Third edition. John Wiley, New York, 1976.

[17] 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.

[18] La Brooy S.R, Lirge H.G y Walker G.S. review of gold extraction from ores. Minerals engineering,[online], [citado: 15 septiembre] 1994, pp. 1213-1241, disponible en Bases de datos ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

[19] DUZYOL SELMA. Investigation of oil agglomeration behaviour of Tuncbilek clean coal and separation of artificial mixture of coal-clay by oil agglomeration. Powder Technology,[online] 2015. vol 274,[citado: 22 de Agosto] pág. 1-4, disponible en Bases de datos ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander

[20] AHMET GURSES, Doymus Kemal, Bayrakceken Samih. Evaluation of response of brown coal to selective oil agglomeration by zeta potencial measurements of the agglomerates. Fuel processing technology [online] 1997,

vol.76 No 14/15, [citado: 7 de octubre] pag 1439-1444, disponible en Bases de datos ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander

[21] G.H.V.C CHARY, M.G Dastidar. Investigation of optimum conditions in coal-oil agglomeration using Taguchi experimental desing. Fuel processing technology [online] 2012, vol 98, [citado: 13 de septiembre] pag. 259-264, disponible en Bases de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander

[22] E, SAHINOGLU, T. Uslu. Amenability of muzret bituminous coal to oil agglomerarion. Energy conversion and management [online] 2008 vol 49, [citado: 5 de junio] pág 3684-3690, disponible en Bases de datos ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

[23] HAMILE ABAKAY, Fatma Deniz Ayhan and Fikri Kahraman. Selective oil agglomeration in Sirnak asphaltite benefication. Fuel [online] 2004, vol 83, [citado: 10 de Agosto] pag 2081-2086. Disponible en bases de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

[24] SAHINOGLU ERCAN, Tuncay Uslu. Role of recovery sieve size in upgrading of fine coal via oil agglomeration technique. Fuel processing technology [online] 2015 [citado: 15 de septiembre], vol 138, pág. 21-29.Disponible en bases de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

[25] UNAL ILKAY, Aktas Zeki. Effect of various bridging liquids on coal fines agglomeration performance. Fuel Processing Technology [online] 2001 [citado: 13

de julio], vol 69, pag 141-155. Disponible en bases de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

[26] CEBECI YAKUP, Ulusoy Ugur, y Simsek Selma. Investigation of the effect of agglomeration time, Ph and various salts on the cleaning of Zonguldak bituminous coal by oil agglomeration. Fuel Processing Technology [online] 2002 [citado: 23 junio], vol 81, pág. 1131-1137. Disponible en bases de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

[27] X.Q WU, R.J Gochin, y A.J Monhemius. The adhesion of gold to oil-carbon agglomerates. Mineral Engineering [online] 2004 vol 17, pág 33-38. Disponible en bases de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

## BIBLIOGRAFÍA

CEBECI YAKUP, Ulusoy Ugur, y Simsek Selma. Investigation of the effect of agglomeration time, Ph and various salts on the cleaning of Zonguldak bituminous coal by oil agglomeration. Fuel Processing Technology [online] 2002 [citado: 23 junio], vol 81, pág. 1131-1137. Disponible en bases de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

CORDOBA TUTA. Elcy María. Recuperación de oro particulado con aglomerados carbón - aceite - una tecnología limpia en la extracción del oro. Trabajo de grado (Magister en ingeniería de materiales). Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicoquímicas. Programa ingeniería de materiales. 1998 50-120 p.

G.H.V.C CHARY, M.G Dastidar. Investigation of optimum conditions in coal-oil agglomeration using Taguchi experimental desing. Fuel processing technology [online] 2012, vol 98, [citado: 13 de septiembre] pag. 259-264, disponible en Bases de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander

J.P.S. CALVEZ, M.J. KIM, P.L.M. WONG and T. TRAN. Use of coal-oil agglomerates for particulate gold recovery. School of Chemical Engineering and Industrial Chemistry, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia. Minerals Engineering. Journal ELSEVIER [online] 1998, vol 1, [citado: 13 de junio], Pages 803–812, disponible en Baes de datos ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

SAHINOGLU ERCAN, Tuncay Uslu. Role of recovery sieve size in upgrading of fine coal via oil agglomeration technique. Fuel processing technology [online] 2015 [citado: 15 de septiembre], vol 138, pág. 21-29. Disponible en bases de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander.

X.Q WU, R.J Gochin, y A.J Monhemius. The adhesion of gold to oil-carbon agglomerates. Mineral Engineering [online] 2004 vol 17, pág 33-38. Disponible en bases de datos. ELSILVER. Biblioteca Universidad Industrial de Santander

## ANEXOS

### **Anexo A.** Procedimiento de laboratorio para la recuperación de oro mediante el proceso CGA

#### ***Formación de aglomerados***

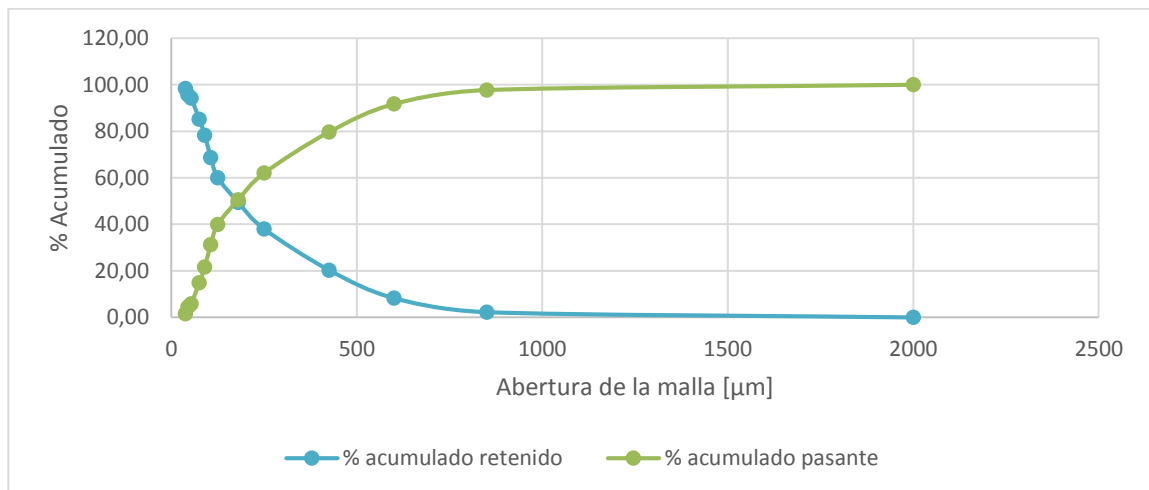
1. **Emulsificación:** formación de una emulsión de agua con aceite, con agitación mecánica constante
2. **Aglomeración:** mezcla por agitación mecánica del carbón con la emulsión previamente formada
3. **Separación de los aglomerados formados:** se realizó mediante tamizado manual para separar los aglomerados obtenidos de las colas de aglomeración

#### ***Recuperación de oro***







1. **Preparación de la pulpa mineral:** adición de mineral a un volumen de agua determinado, para agitarlo y formar una mezcla homogénea.
2. **Acondicionamiento:** mezcla de la pulpa mineral con el colector (Aerofloat 208) mediante agitación mecánica para modificar las propiedades superficiales del mineral, es decir aumentar la hidrofobicidad del oro.
3. **Contactación o contacto por agitación de los aglomerados con la pulpa mineral:** mediante agitación mecánica se mezcla la pulpa previamente acondicionada con los aglomerados de carbón-aceite, con el propósito de las partículas de oro de adhieran a los aglomerados.

4. **Separación de los aglomerados cargados:** los aglomerados cargados, se separan de las colas (del proceso de contactación) mediante tamizado.
5. **Secado de los aglomerados cargados:** calentamiento de los aglomerados cargados en estufa a 120 °C durante dos horas, con el fin de evaporar el agua contenida en dichos aglomerados.
6. **Calcinación en horno de los aglomerados cargados:** calentamiento progresivo en una mufla hasta los 800 °C, durante 4 horas hasta obtener cenizas.
7. **Ensayo al fuego:** análisis dek contenido de oro en las cenizas de los aglomerados, y colas minerales con el fin de determinar la recuperación de oro

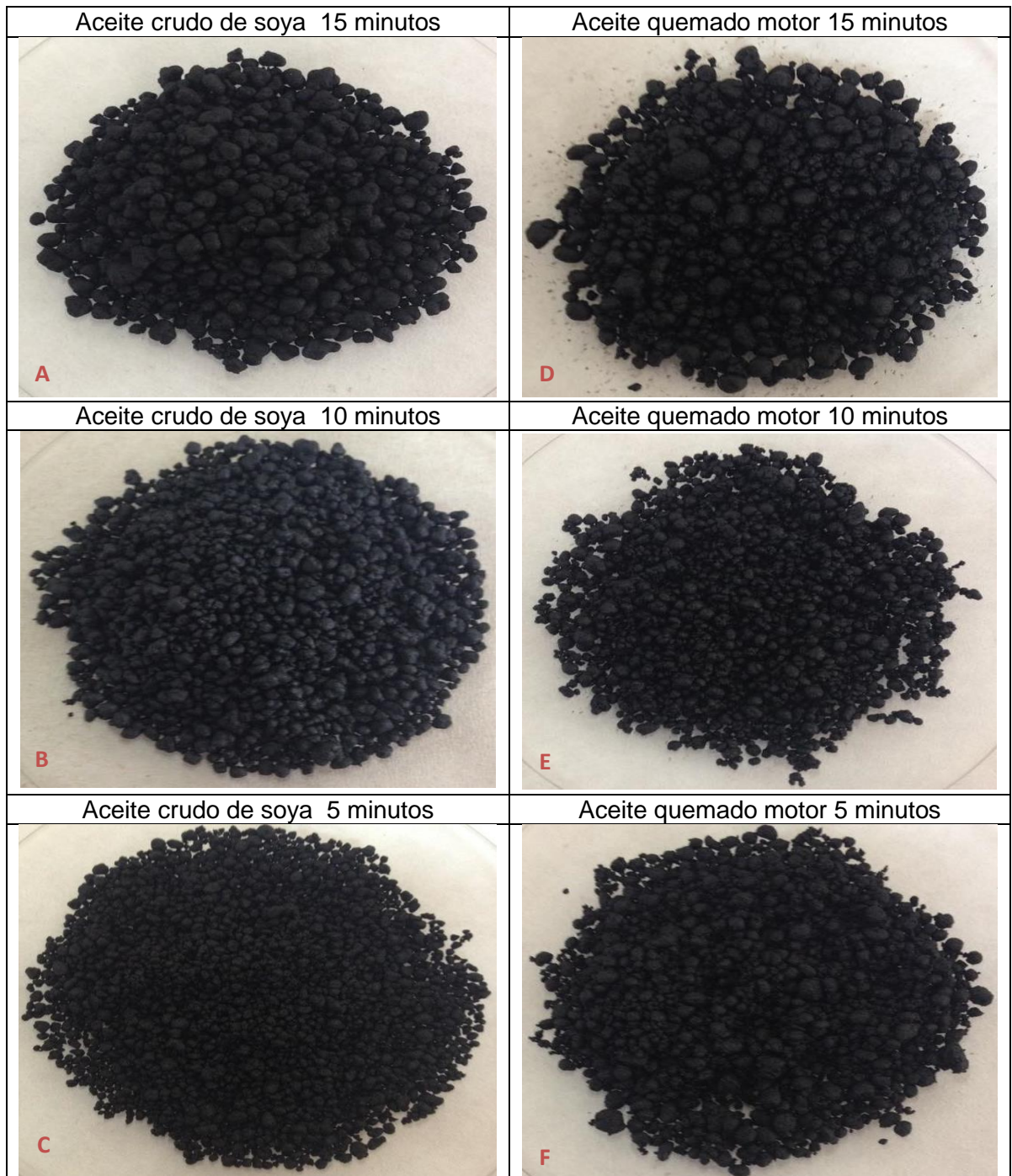
#### Anexo B. Análisis granulométrico inicial del mineral Reina de Oro



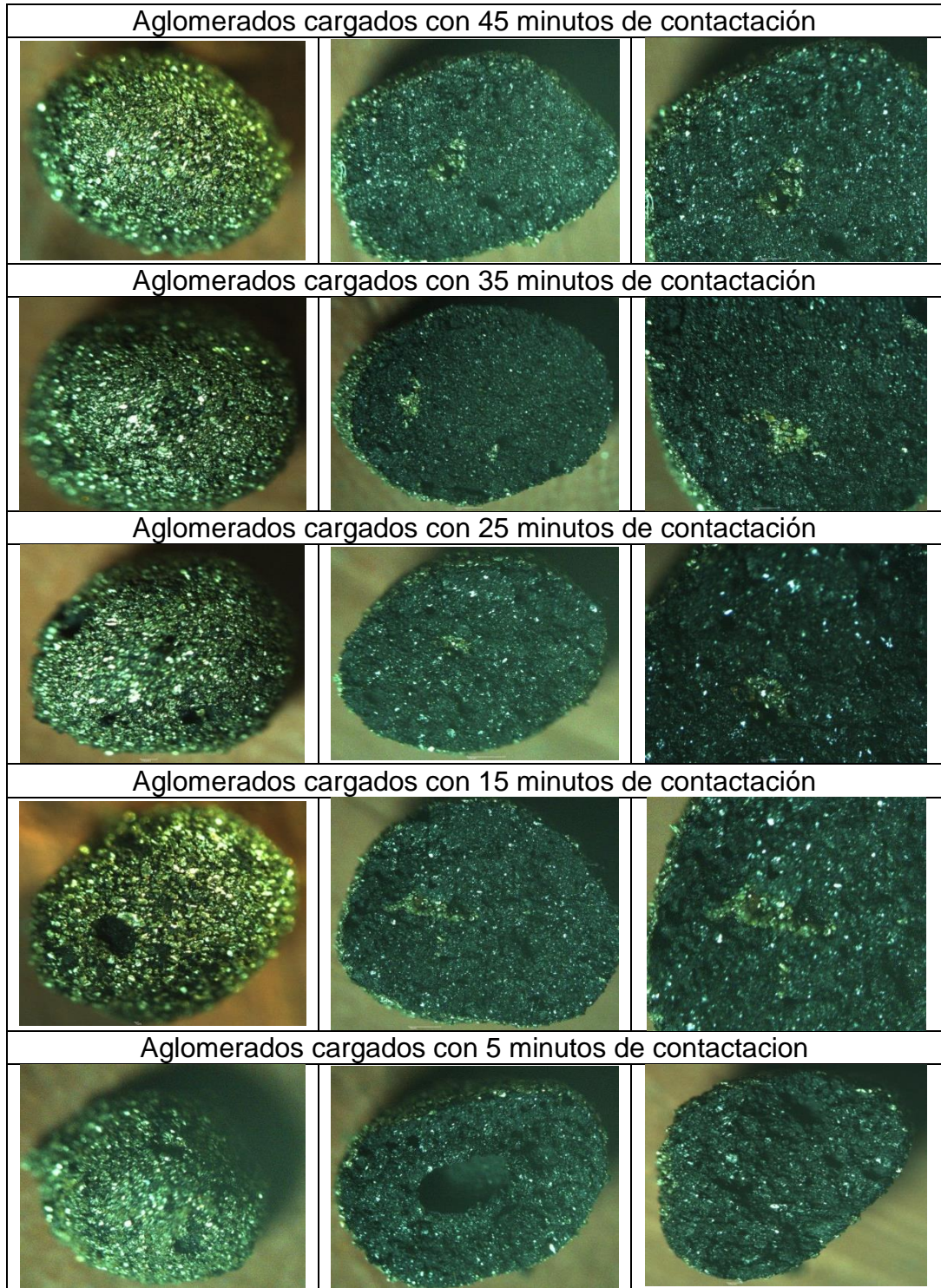
**Anexo C. Productos resultantes de las pruebas de aglomeración de carbones**

CARBON ZIPAQUIRA	
Aceite crudo de soya	Aceite quemado de motor
	
CARBON UBATE	
Aceite crudo de soya	Aceite quemado motor
	
CARBON LA GRANDE	
Aceite crudo de soya	Aceite quemado de motor
	

**Anexo D.** Productos resultantes de la variación del tiempo de aglomeración.  
Aceite crudo de soya (A-C). Aceite quemado de motor (D-F)



**Anexo E. Fotos de adhesión del oro a aglomerados**



**Anexo F.** Difractogramas para colas y aglomerados puestos en contactación durante 15 y 45 minutos.

