

**Estudio del efecto de la variación del pH y la presencia de sales solubles sobre la
recuperación de oro en el proceso CGA**

Jose Gustavo Cantillo Corredor

Trabajo de grado proyecto de investigación para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director:

Eley María Córdoba Tuta

Doctora En Ciencia y Tecnología de Materiales

Codirector:

Pedro Luis Delvasto Angarita

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A **DIOS**, quien me acompaña y hace posibles todos los proyectos de mi vida; quien a lo largo de esta maravillosa carrera me guió por el buen camino y puso a las personas indicadas, profesores y amigos, quienes me ayudaron y orientaron para alcanzar esta meta. A mi **mamá**, persona incondicional que siempre está dispuesta a brindarme su apoyo a toda costa y quien es el motor que me impulsa a salir adelante. A mi **familia** y **amigos**, que estuvieron presentes en los altibajos y me empujaron para continuar con esta etapa y finalmente, a mi **Angie**, quien siempre me ha apoyado desde el primer momento y me ha motivado a siempre dar lo mejor de mí.

JOSE GUSTAVO CANTILLO CORREDOR

Agradecimientos

Son muchas las personas que han contribuido al desarrollo de este proyecto y, además, en mi proceso de formación a lo largo de esta carrera, no solo a nivel profesional sino también a nivel personal y son ellos con quienes estoy inmensamente agradecido:

Inicialmente, a la prestigiosa Universidad Industrial de Santander y su escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por orientarme en los campos de la metalurgia y brindarme el conocimiento para culminar satisfactoriamente este proyecto. A la doctora Elcy María Córdoba Tuta por brindarme su apoyo y orientación durante el desarrollo de esta investigación.

A los técnicos de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales: Javier Gaitán, Mario Navarrete, Juan Domingo, Sergio, Óscar y de manera muy especial al “padrecito” Ambrosio Carrillo, por su buena orientación, acompañamiento y apoyo incondicional a lo largo de este proyecto.

Al grupo de investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA), a su técnico Yury López y Sneidy Espinoza por su apoyo durante la realización de las pruebas necesarias para la culminación de este proyecto.

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

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Antecedentes	16
2. Objetivos	20
2.1 Objetivo general	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
3. Metodología experimental.....	21
3.1 Obtención y caracterización de materias primas.....	21
3.1.1 Caracterización química y mineralógica de los minerales auríferos	22
3.1.2 Caracterización fisicoquímica de los minerales auríferos.....	23
3.2 Aplicación del proceso cga bajo diferentes condiciones de pH y presencia de sales solubles en la pulpa mineral	23
3.2.1 Preparación de soluciones	23
3.2.2 Formación de aglomerados carbón – aceite	24
3.2.3 Recuperación del oro con los aglomerados carbón-aceite	24
4. Resultados y discusión	26
4.1 Caracterización de los minerales.....	26
4.1.1 Composición elemental y mineralógica	26

4.1.2 Caracterización fisicoquímica de los minerales auríferos	30
4.2 Evaluación del efecto del pH y de las sales disueltas en la eficiencia del proceso CGA	35
4.2.1 Variación del pH	35
4.2.2 Variación de la concentración de las sales	40
5. Conclusiones	41
6. Recomendaciones	42
Referencias bibliográficas	44
Apéndices	47

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Esquema general del proceso CGA.....	17
<i>Figura 2.</i> Fotografías de las sales obtenidas de los minerales.	33
<i>Figura 3.</i> Recuperación de oro a distintos valores de pH.	36
<i>Figura 4.</i> Recuperación de oro en presencia de sulfato férrico a diferentes valores de pH.....	37
<i>Figura 5.</i> Diagramas de distribución de especies para los sulfatos férrico (a), cálcico (b) y de zinc (c).	39
<i>Figura 6.</i> Recuperación de oro bajo diferentes concentraciones de las sales.	41

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Procedencia y estado de los minerales.</i>	21
Tabla 2. <i>Composición elemental de los minerales obtenida por FRX.</i>	27
Tabla 3. <i>Fases cristalinas identificadas en los minerales por DRX.</i>	28
Tabla 4. <i>Valores de pH y conductividad del lixiviado de los minerales.</i>	30
Tabla 5. <i>Composición elemental (% en peso) obtenida por EDS de las sales contenidas en los minerales.</i>	31
Tabla 6. <i>Concentración de metales en los lixiviados de los minerales</i>	34
Tabla 7. <i>Concentración de aniones en los lixiviados de los minerales</i>	35

Lista de apéndices

Pág.

Apéndice A. Análisis granulométrico sintético del material carbonoso 47

Apéndice B. Resultados SEM – EDS realizado a las sales de los minerales..... 48

Resumen

Título: Estudio del efecto de la variación del pH y la presencia de sales solubles sobre la recuperación de oro en el proceso CGA*

Autor: Jose Gustavo Cantillo Corredor**

Palabras clave: Proceso CGA, aglomerados de carbón – aceite, recuperación de oro, sales solubles, pH.

Descripción: Durante el desarrollo de procesos extractivos alternativos a la amalgamación y a la cianuración para la extracción de oro surgió el proceso CGA, por sus siglas en inglés (Coal Gold Agglomeration), el cual emplea aglomerados de carbón-aceite para recuperar el oro de los minerales, gracias a las propiedades hidrofóbicas/oleofílicas del metal precioso. En busca de aportar al conocimiento del proceso CGA en lo relacionado con el efecto de la mineralogía sobre la recuperación de oro, el presente trabajo de grado tuvo como fin evaluar la influencia del pH y de las sales solubles, comúnmente encontradas en minerales auríferos colombianos, sobre la recuperación de oro con aglomerados de carbón – aceite. La metodología experimental consistió de dos etapas, obtención y caracterización mineralógica y fisicoquímica de seis minerales auríferos colombianos, incluyendo análisis por EDS, FRX, DRX, medida de pH de pulpa y determinación de sales solubles por las técnicas AA, colorimetría, turbidez y titulación gravimétrica. Mientras que la segunda etapa correspondió a la aplicación del proceso CGA a un mineral sintético compuesto de arena y partículas de oro, bajo diferentes condiciones de pH y contenido de sales disueltas, según los resultados obtenidos en la etapa de caracterización de los minerales naturales. Los resultados evidenciaron que las sales solubles que prevalecen en los minerales auríferos colombianos son sulfatos de calcio, hierro y zinc. Independientemente del tipo y concentración de los iones presentes en la pulpa mineral, la recuperación de las partículas de oro sobre aglomerados carbón-aceite es favorecida a pH 5 en la solución. El aumento en la concentración de las sales en la pulpa mineral favorece la recuperación de oro sobre los aglomerados carbón-aceite, por efecto del aumento de la adsorción de iones sobre la superficie de las partículas de oro, lo que conlleva a un aumento en la hidrofobicidad del metal precioso.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Elcy María Córdoba Tuta, Doctora En Ciencia y Tecnología de Materiales. Codirector: Pedro Luis Delvasto Angarita, Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Abstract

Title: Study of the effect of pH variation and the presence of soluble salts on gold recovery in the CGA process *

Author: Jose Gustavo Cantillo Corredor**

Keywords: CGA Process, coal – oil agglomerates, gold recovery, soluble salts, pH.

Descripción: During the development of alternative extractive processes to amalgamation and cyanidation for gold extraction, the CGA (Coal Gold Agglomeration) process emerged, which uses coal-oil agglomerates to recover gold from minerals, thanks to the hydrophobic / oleophilic properties of the precious metal. In order to contribute to the knowledge of the CGA process in relation to the effect of mineralogy on the recovery of gold, the present degree work was aimed at evaluating the influence of pH and soluble salts, commonly found in Colombian gold ores, on the recovery of gold with coal-oil agglomerates. The experimental methodology consisted of two stages, obtaining and mineralogical and physicochemical characterization of six Colombian gold minerals, including analysis by EDS, FRX, DRX, measurement of pH pulp and determination of soluble salts by AA, colorimetry, turbidity and gravimetric titration techniques. While the second stage corresponded to the application of CGA process to a synthetic mineral composed of sand and gold particles, under different pH conditions and content of dissolved salts, according to the results obtained in the characterization stage of the natural minerals. The results showed that the soluble salts that prevail in Colombian gold minerals are calcium, iron and zinc sulfates. Regardless of the type and concentration of the ions present in the mineral pulp, the recovery of the gold particles on carbon-oil agglomerates is favored at pH=5 in the solution. The increase in the concentration of the salts in the mineral pulp favors the recovery of gold on the carbon-oil agglomerates, due to the increase of the adsorption of ions on the surface of gold particles, which leads to an increase in the hydrophobicity of the precious metal.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Elcy María Córdoba Tuta, PhD in Materials Science and Technology. Co-director: Pedro Luis Delvasto Angarita, Doctor in Materials Science and Technology

Introducción

A pesar de que el uso de mercurio en minería del oro está prohibido en la mayoría de los países desarrollados, en Colombia y en otros países en proceso de desarrollo, es ampliamente utilizado (oro de placeres, filones o diseminado) para recuperar o “captar” el oro de las menas auríferas en forma de amalgama, pero durante todo el proceso, el mercurio que no se amalgama con el oro, es perdido en forma de pequeñas partículas (“flor de mercurio”), que se dispersan junto con el material en suspensión, o se acumulan por gravedad en sedimentos y suelos cerca de su fuente (Rojas, 2001, pág. 239). De la misma manera, el uso del cianuro para extraer oro (filoniano y diseminado) propicia el vertimiento de residuos o efluentes de cianuración cargados de cianuro residual, zinc residual del proceso “Merril Crowe” y complejos cianurados de metales pesados, entre otros, que se dispersan a grandes distancias de su fuente inicial y afectan a la biota y a los ecosistemas de las zonas mineras (Rojas, 2001). Por esta razón se hace indispensable buscar y desarrollar procesos extractivos alternativos que favorezcan el medio ambiente y sean eficientes en la extracción y recuperación de oro desde los minerales.

En este sentido, el proceso conocido como CGA, por sus siglas en inglés (Coal Gold Agglomeration), es una alternativa a los métodos de procesamiento de oro como lo son la cianuración y la amalgamación. El proceso CGA fue desarrollado y patentado por los investigadores de la BP (British Petroleum) en la década de los 80 (Kotze & Petersen, Enero/febrero de 2000). El uso de aglomerados de Aceite-Carbón en el proceso de recuperación del oro está basado en la hidrofobicidad/oleofilicidad “natural” de este metal, una propiedad que de acuerdo con los expertos en química de superficies se evidencia en la facilidad con la cual la

superficie del oro se contamina. Aunque, es posible recuperar el oro aglomerándolo con aceite, por lo general las cantidades de oro en el mineral son tan pequeñas que las partículas se hacen insuficientes para formar los aglomerados, por esta razón se deben utilizar otros materiales hidrofóbicos como el carbón para lograr formar los aglomerados que actúen como portadores de las partículas de oro (Calvez, Wong, & Tran, 1998, págs. 803-812).

A partir de lo anterior, muchos estudios han sido desarrollados para evaluar las variables más importantes que afectan el proceso, alcanzándose en algunas ocasiones eficiencias cercanas al 100% en pruebas a nivel de laboratorio y bajo un buen control de las condiciones operativas del proceso, tales como densidades de pulpa, intensidades de agitación, concentraciones de aglomerados, tiempos de residencia y grados de oro de cabeza (Cilingir & Sen, 2000, págs. C8a-6 – C8a-7), (WU & COL., 2004), (Mlaki., Katima., & Kimweri, 2011, págs. 555-560), (MOSES & PETERSEN, 2000, págs. 255-264). No obstante, en los estudios realizados a escala piloto o mayor, la eficiencia del proceso cae a valores entre 62 y 75% (Calvez, Wong, & Tran, 1998), (SYED, 2011, pág. 38), resultados que han permitido concluir que el proceso CGA depende de tres factores principalmente, el grado de colisiones entre partículas, la fuerza y estabilidad de los aglomerados y la mineralogía del oro y otros minerales asociados (Calvez, Wong, & Tran, 1998). Con respecto al último factor, se ha encontrado que algunas asociaciones con otros metales/minerales como la pirita, arsenopirita, etc., reducen la oleofilicidad del oro y por lo tanto los límites de recuperación se ven afectados (Kotze & Petersen, Enero/febrero de 2000, págs. 57-58). Para sobrepasar este problema algunos estudios sugieren que una alta selectividad puede ser lograda en gangas de minerales sulfurados mediante depresores y la modificación de pH, como se hace en la flotación por espuma (Bing, Lizhu, & Huiqing, 1997, págs. 152-155). Partiendo de tales investigaciones, el Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) está

desarrollando un proyecto de investigación con el que se pretende aportar al estado del conocimiento del proceso CGA, especialmente en lo relacionado con el efecto de la mineralogía sobre la recuperación de oro. Dentro de este contexto de ideas, el presente trabajo de grado tuvo como fin evaluar la influencia del pH y de las sales solubles, comúnmente encontradas en minerales auríferos colombianos, sobre la recuperación de oro con aglomerados de carbón – aceite.

1. Antecedentes

El uso del método de aglomeración de carbón - aceite para la recuperación de oro ha sido objeto de estudio para muchos investigadores desde que fue desarrollado por la BP's Mining and Mineral Company en 1983. La primera prueba piloto exitosa del proceso CGA fue informada por House y col. en 1988 y se llevó a cabo en Australia con relaves de los métodos utilizados para recuperar oro en la primera parte del siglo pasado. Aunque actualmente existen variaciones para el proceso de CGA, el mecanismo de contacto y adhesión de partículas de oro con los aglomerados de carbón - aceite es el elemento clave que se encuentra en el corazón del proceso. El método permite recuperar partículas de oro tanto finas como relativamente gruesas, entre 1 y 500 μm , lo que constituye una ventaja con respecto a las técnicas convencionales de recuperación de oro, ya que las partículas finas no pueden ser recuperadas eficientemente por los métodos gravimétricos, ni por amalgamación, proceso que requiere tamaños de oro superiores a 50 μm , mientras que las partículas gruesas no pueden ser recuperadas por flotación (Cilingir & Sen, 2000).

El uso del proceso CGA para la recuperación de partículas de oro está basado en la hidrofobicidad u oleofilicidad natural del oro, una propiedad que, según el consenso de la mayoría de los expertos en química de superficie, se relaciona con la facilidad con que se contamina la superficie de oro (adsorción de iones) (Calvez, Wong, & Tran, 1998). Aunque es posible recuperar el oro aglomerado con aceite, la cantidad de oro en el mineral suele ser tan pequeña que no hay suficientes partículas de oro para formar aglomerados, por lo tanto, es necesario utilizar otros materiales hidrófobos como el carbón para formar aglomerados junto con el oro o actuar como portador de estas partículas. Por otro lado, el aceite sirve como puente entre el carbón y las

partículas de oro, usando como líquidos aglomerantes diésel, keroseno y aceites vegetales, mientras que el carbón actúa como el cargador y facilita la separación efectiva de los aglomerados auríferos (Cilingir & Sen, 2000). Se ha comprobado que el proceso CGA es efectivo si es usado en placeres, relaves, minerales con oro libre y ciertos tipos de minerales refractarios donde el oro debe ser liberado o la liberación puede proporcionarse mediante molienda; sin embargo, este método no se debe utilizar en algunas situaciones donde el oro está asociado con cantidades significativas de pirita, arsenopirita u otros minerales de sulfuro debido a su oleofilicidad ^[4,5].

La Figura 1 esquematiza la metodología general del proceso CGA (Mlaki., Katima., & Kimweri, 2011), que inicia con la formación de los aglomerados de carbón – aceite, que posteriormente son puestos en contacto con el mineral aurífero dentro de un recipiente con agitación para la respectiva recuperación del oro. Finalmente, los aglomerados cargados con el oro son separados de las colas minerales por tamizaje o flotación; luego de esto los aglomerados se llevan a una etapa de tostación, obteniéndose las cenizas desde donde se recupera el oro por fusión de estas.

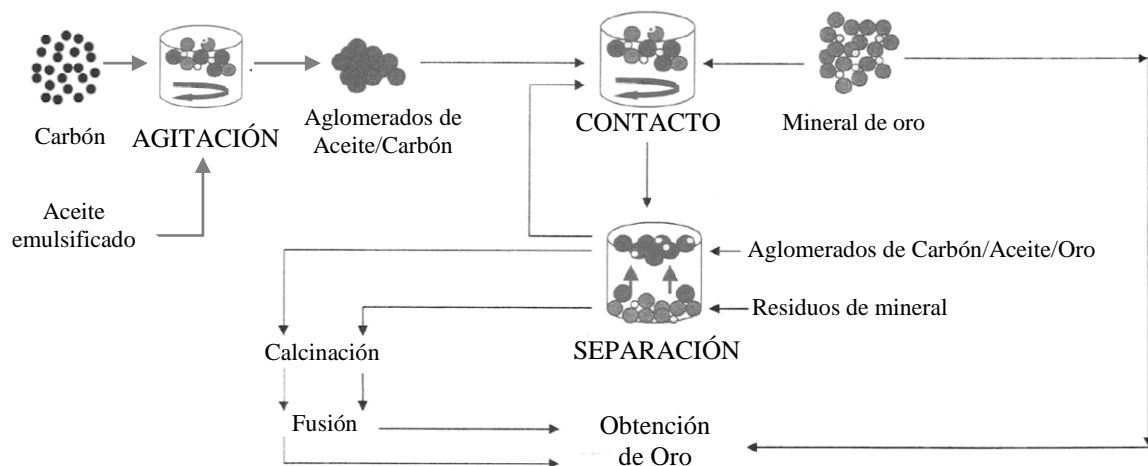


Figura 1. Esquema general del proceso CGA.

En diversos estudios se han evaluado los distintos parámetros operacionales del proceso CGA, por ejemplo, en el año 2000 Cilingir y Sen (Cilingir & Sen, 2000) reportaron que el tenor de oro y el tamaño de partícula tienen una influencia significativa en la eficiencia de recuperación del proceso, pues al aumentar la ley de 0,5 g/ton a 30g/ton la eficiencia incrementaba de un 60 a un 98,8%. Ese mismo año, W. Kotze y col. (Kotze & Petersen, Enero/febrero de 2000) concluyeron que la reutilización de los aglomerados de carbón – aceite incrementa la recuperación de oro en un 33.4% y minimiza los costos de operación del proceso CGA.

Recientemente, las investigaciones se han orientado hacia propiedades fisicoquímicas de los aglomerados y del mineral, dando paso a estudios como el de X.Q. Wu (WU & COL., 2004, págs. 33–38) y col., con relación a la adhesión del oro a los aglomerados de carbón aceite, concluyendo que los colectores de xantato y un tiempo de contactación cercano a los 50 minutos aproximan la recuperación de oro al 100%, además de reafirmar que los ciclos de reutilización de los aglomerados tienen una tendencia ascendente lineal. En 2011, A. Mlaki (Mlaki., Katima., & Kimweri, 2011) y col., realizaron pruebas con diferentes tipos de aceite, y sus resultados sugieren que el aceite de castor o aceites vegetales con tiempos de contactación de 60 minutos optimizan la eficiencia del proceso CGA, obteniendo resultados del 98% de recuperación de oro.

Los efectos de las variaciones del pH en el proceso CGA fueron puestos en estudio en la investigación realizada en 1998 por J.P.S. CALVEZ y col. usando una mezcla sintética de polvo de oro puro y colas de cianuración (80% -150 μm), con tenor de oro de 92 g/ton, cuyos resultados evidenciaron una importante caída en la recuperación de oro (de 98% a 80%) al disminuir el pH desde 4 hasta 2. Los autores concluyen que la menor recuperación de oro obtenida a pH 2, con 30 minutos de mezcla, pudo deberse a la remoción de contaminantes orgánicos y/u óxidos de la superficie del oro por exceso de iones H^+ (Calvez, Wong, & Tran, 1998). Es decir que el medio

fuertemente ácido limpia la superficie del oro, cambiando su carácter hidrofóbico por hidrofílico. Sin embargo, a exposiciones más prolongadas (60 minutos) la pulpa inicialmente “limpiada” se contaminó nuevamente, dando lugar a un incremento en la recuperación de oro (95%). Los óxidos y los contaminantes orgánicos son los factores que hacen al oro hidrofóbico, concordando con las recuperaciones relativamente altas de oro a altos pH donde los óxidos y contaminación orgánica es posible (Calvez, Wong, & Tran, 1998).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Estudiar el efecto que tienen el pH y la presencia de diferentes sales solubles en la eficiencia del proceso CGA para la extracción de oro de minerales colombianos.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las principales sales solubles presentes en las menas auríferas colombianas con el fin de establecer las composiciones de los minerales sintéticos con los cuales se desarrollará la investigación.
- Evaluar el efecto del pH de la pulpa de un mineral aurífero sintético compuesto de arena sílice y partículas de oro en la eficiencia del proceso GCA.
- Determinar el efecto de la adición de sales solubles al mineral sintético en la recuperación de oro mediante el proceso CGA.

3. Metodología experimental

A continuación, se detallan las actividades desarrolladas en el presente trabajo de grado, las cuales se pueden dividir en dos etapas principales, la obtención y caracterización de los minerales auríferos colombianos y la evaluación del efecto del pH y de la presencia de sales solubles en la recuperación de oro por el proceso CGA utilizando un mineral sintético compuesto de arena y partículas de oro.

3.1 Obtención y caracterización de materias primas

En la Tabla 1 se describen los minerales obtenidos de diferentes regiones del país, específicamente de Santander, Sur de Bolívar y Antioquia, cuya caracterización mineralógica y fisicoquímica sirvió de base para establecer las condiciones de pH y concentración de sales solubles objeto de estudio en la investigación.

Tabla 1.

Procedencia y estado de los minerales.

<i>Mina</i>	<i>Departamento</i>	<i>Región</i>	<i>Estado</i>
Sabana (Aluvión)	Santander	Sabana de Torres	Concentrado
El Bagre (Aluvión)	Antioquia	El Bagre	Concentrado
El Bagre (Filón)	Antioquia	El Bagre	Cabeza
La Elsy (Filón)	Santander	Vetas	Cabeza

Tabla 2. *Continuación*

<i>Mina</i>	<i>Departamento</i>	<i>Región</i>	<i>Estado</i>
Walter (Filón)	Sur de Bolívar	Santa Rosa	Cabeza
Reina de Oro (Filón)	Santander	Vetas	Concentrado

Fuente: HINOJOSA, Carlos Andrés, PINZÓN, David. Leandro & MONTOYA, Daniel Felipe. Aplicación del proceso CGA a minerales auríferos oxidados: establecimiento de los parámetros metalúrgicos de interés. Tesis de pregrado: Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2017, 56p

Los minerales fueron sometidos a conminución utilizando un triturador de mandíbulas y un molino de bolas para obtener una granulometría correspondiente a 100% pasante malla 200 Tyler, según como se especifica en el anexo II del trabajo de Hinojosa, Pinzón y Montoya (Hinojosa, Pinzón, & Montoya, 2017, pág. 56).

Para la fabricación de los aglomerados se utilizó coque con la granulometría sugerida por la investigación de Sierra y Ruiz (Sierra & Ruíz, 2017, pág. 56) y aceite refinado de soya. Por su parte, para las pruebas del proceso CGA se utilizó un mineral sintético compuesto de arena sílice y partículas de oro de aluvión, procedente de Rio de Oro, Santander, el cuál fue cortado con cuchillas con el fin de reducir su tamaño.

3.1.1 Caracterización química y mineralógica de los minerales auríferos. Los seis minerales auríferos antes mencionados fueron caracterizados químicamente con ayuda de la técnica de fluorescencia de rayos x (FRX), para lo cual se utilizó un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de rayos-X de longitud de onda dispersiva de 4KW marca BRUKER modelo S8 TIGER. Por su parte, la identificación de las principales fases mineralógicas presentes en los minerales se realizó con ayuda de la técnica de Difracción de rayos x (DRX), análisis llevados a

cabo en un difractómetro de rayos-X marca BRUKER modelo D8 DISCOVER con Geometría DaVinci.

3.1.2 Caracterización fisicoquímica de los minerales auríferos. En esta parte de la experimentación, se determinó y cuantificó la presencia de sales solubles en los minerales, para lo cual se llevaron pruebas de lixiviación de los minerales con un litro de agua destilada y una concentración de sólidos en la pulpa del 20% a condiciones de agitación de 300 rpm durante 30 minutos y reposo de 15 minutos para su posterior filtrado. Este procedimiento se repitió por triplicado con volúmenes de 100 mL para cada una de las muestras, con el fin de analizar mediante espectrofotometría de absorción atómica la concentración de cationes metálicos Ag, Al, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Na y Zn presentes en solución. Además, se aplicaron pruebas de turbiedad, colorimetría y titulación a las muestras para determinar la presencia de aniones de carbonato, cloruro, fosfato y sulfato. Finalmente, el lixiviado con volumen de un litro se secó a 110°C durante 12 horas para obtener las sales disueltas presentes, a las cuales se les realizó análisis por espectroscopia de energía dispersiva (EDS) para conocer su composición elemental.

3.2 Aplicación del proceso cga bajo diferentes condiciones de pH y presencia de sales solubles en la pulpa mineral

3.2.1 Preparación de soluciones. Luego de identificar las sales presentes en cada uno de los minerales y su concentración correspondiente, se procedió a preparar soluciones madre de un litro con la mayor concentración de los cationes seleccionados, a partir de las cuales se obtuvieron las soluciones con concentración variable de las sales solubles. Tales soluciones se pusieron en

contacto con el mineral sintético y los aglomerados carbón – aceite, para evaluar su efecto en el proceso CGA. El pH de estas soluciones fue variado teniendo en cuenta los resultados de la caracterización fisicoquímica de los minerales colombianos, mediante la adición de ácido sulfúrico o hidróxido de sodio.

3.2.2 Formación de aglomerados carbón – aceite. Para la elaboración de los aglomerados carbón – aceite se siguieron las recomendaciones hechas en una investigación previa (Córdoba, 1998) sobre los niveles de los parámetros operacionales. El procedimiento experimental de esta etapa inició con la preparación granulométrica del coque utilizando un molino de anillos y posterior tamizado del material molido, con lo cual se estableció una distribución uniforme para todas las pruebas a realizar como se indica en el Anexo A (Sierra & Ruíz, 2017). A continuación, se vertieron 500 mL de agua destilada en el recipiente plástico, 16 mL de aceite refinado de soya y se agitó durante 5 minutos a 2000 r.p.m. para formar una emulsión. Finalmente, se añadieron 50 g del coque molido a la emulsión y se agitó a 1600 r.p.m. durante 10 minutos para formar los aglomerados. Después de este tiempo se realizó la separación de los aglomerados formados del coque residual con ayuda de un tamiz.

3.2.3 Recuperación del oro con los aglomerados carbón-aceite. Los ensayos de esta etapa del proceso CGA se llevaron a cabo siguiendo las condiciones operativas recomendadas en el trabajo de E. M. Córdoba (Córdoba, 1998). La práctica de esta etapa consistió en preparar la arena sílice de tal manera que su ley fuese de 100 g/ton de oro, con 50 g de este mineral sintético se preparó una pulpa con 250 mL de solución con pH ajustado y la concentración requerida de las sales de estudio. Para el acondicionamiento del oro se adicionaron 100 μ L del colector

AEROFLOAT 208 (CYTEC. , 2002, pág. 111), manteniendo la pulpa bajo agitación a 600 r.p.m. durante 5 minutos. Transcurrido dicho tiempo se agregaron 50 g de aglomerados carbón–aceite húmedos, y se continuó con la agitación durante 45 minutos más. Pasado dicho tiempo, los aglomerados se separaron con ayuda de un tamiz, se enjuagaron suavemente con agua y se secaron, al igual que las colas, en un horno a 110°C durante 12 horas. Los aglomerados cargados con el oro fueron quemados en una mufla, obteniéndose las cenizas, las cuales se analizaron por ensayo al fuego para determinar la recuperación de oro.

La aplicación del proceso CGA se llevó a cabo en dos etapas, tal como se describe a continuación:

- **Pruebas con variación del pH.** Se aplicó el proceso CGA al mineral sintético con variación del pH en los valores de 2, 5 y 8 y manteniendo la mayor concentración de cada sal con el fin de identificar el pH y el catión más favorable para la recuperación del oro. Para una de las sales (sulfato férrico) la variación del pH también incluyó los valores de 3.5 y 6.5, con el fin de determinar con mayor exactitud el valor de pH que ofrece la mayor recuperación de oro.

- **Pruebas con variación de la concentración de cationes.** En esta segunda etapa se evaluó la influencia de la concentración de distintos cationes metálicos, manteniendo constante el pH de las soluciones (valor determinado en la etapa anterior). Los valores de concentración de las sales en la solución se escogieron teniendo en cuenta el rango de concentraciones de cationes encontrado en los minerales naturales, tomando como objeto de estudio los valores mínimos, medios y máximos de las sales.

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización de los minerales

4.1.1 Composición elemental y mineralógica. En la Tabla 2 se presentan los análisis elementales de los seis minerales, obtenidos por FRX. Destacándose la presencia de elementos como Fe, S, As, Cu y Zn que por las asociaciones que pueden formar interfieren con la extracción del Au, por el método tradicional de cianuración. Además, se resalta la presencia de Au y Ag en los minerales de Reina de oro y Bagre, ya que estos elementos por lo general se encuentran en tan poca proporción que se dificulta detectarlo en los análisis por FRX. Por otro lado, es evidente que en los minerales Walter, Elsy y Bagre prevalece la sílice como constituyente principal dados los altos contenidos de Si, mientras que en el mineral Reina de oro el sulfuro de hierro sería el constituyente mayoritario dado su alto contenido de Fe y S (Hinojosa, Pinzón, & Montoya, 2017). Entre los elementos metálicos presentes en los minerales, y que pueden formar sales solubles, se destacan además del hierro, calcio, potasio, magnesio y sodio; mientras que los principales elementos no metálicos son azufre y fósforo.

Tabla 3.

Composición elemental de los minerales obtenida por FRX.

Elemento	Mineral					
	Bagre (Aluvión)	Sabana (Aluvión)	Reina de Oro (Filón)	Walter (Filón)	Elsy (Filón)	Bagre (Filón)
Fe	3,55%	2,6%	20,63%	4,82%	3,55%	5,67%
S	0,12%	0,06%	18,99%	0,07%	0,12%	4,14%
Ag	0,06%		76 mg/Kg	-	-	0,06%
Al	2,33%	6,63%	2,33%	4,99%	7,84%	1,68%
As	33 mg/Kg		0,25%	-	0,01%	52 mg/Kg
Au			81 mg/Kg	-	-	70 mg/Kg
Ba		0,07%				
Ca	0,05%	0,44%	0,11%	0,11%	0,72%	0,05%
Ce			0,04%	-	-	-
Co			59 mg/Kg	-	-	-
Cr	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%
Cu	0,02%	56 mg/Kg	0,04%	0,12%	85 mg/Kg	0,02%
K	1,40%	2,93%	0,86%	2,06%	4,26%	0,52%
La			0,02%	-	-	-
Mg	0,05%	0,43%	0,20%	0,20%	0,74%	0,05%
Mn		0,03%	0,04%	0,02%	-	0,01%
Mo			0,01%	33 mg/Kg	-	13 mg/Kg
Na	0,05%	1,11%				
Nb		10 mg/Kg				
Ni	37 mg/Kg	32 mg/Kg	0,02%	41 mg/Kg	45 mg/Kg	37 mg/Kg
P	0,19%	0,28%	0,19%	0,28%	0,26%	99 mg/Kg

Tabla 4. *Continuación*

Elemento	Mineral					
	Bagre (Aluvión)	Sabana (Aluvión)	Reina de Oro (Filón)	Walter (Filón)	Elsy (Filón)	Bagre (Filón)
Pb			0,08%	0,99%	47 mg/Kg	0,05%
Rb		0,01%				
Sb			0,02%	-	-	-
Si	36,09%	34,77%	7,24%	34,77%	31,68%	36,09%
Sr	8 mg/Kg	93 mg/Kg	40 mg/Kg	87 mg/Kg	0,01%	8 mg/Kg
Ti	0,43%	0,24%	0,20%	0,21%	0,43%	0,03%
V		95 mg/Kg				
Y			78 mg/Kg	-	-	-
Zn	59 mg/Kg	58 mg/Kg	0,11%	0,18%	0,02%	59 mg/Kg
Zr	6 mg/Kg	0,02%	0,03%	0,01%	0,03%	6 mg/Kg

Por otro lado, en la Tabla 3 se pueden apreciar los resultados de los análisis mineralógicos cualitativos de los minerales, obtenidos por DRX.

Tabla 5.

Fases cristalinas identificadas en los minerales por DRX.

Fase Cristalina	Mineral					
	Reina de Oro (Filón)	Walter (Filón)	Elsy (Filón)	Bagre (Filón)	Bagre (Aluvión)	Sabana (Aluvión)
Actinolita	-	X	-	-	-	-
Albita tratada	-	-	-	-	-	X
Anortita	-	-	X	-	-	-

Tabla 6. *Continuación*

Fase Cristalina	Mineral					
	Reina de Oro (Filón)	Walter (Filón)	Elsy (Filón)	Bagre (Filón)	Bagre (Aluvión)	Sabana (Aluvión)
Argentita Alfa	-	-	-	X	-	-
Biotita	-	X	-	-	-	-
Birnessita	-	X	-	-	-	-
Calcita	-	-	-	X	-	-
Caolinita	X	-	-	-	-	-
Clinocloro					-	X
Cuarzo	X	X	X	X	-	X
Dickita	-	-	X	-	-	-
Flogopita	X	-	-	-	-	-
Fosfato de Aluminio	-	-	X	-	-	-
Hematita alfa	-	-	-	-	X	-
Ilmetita	-	-	-	-	X	-
Jarosita	-	X	-	-	-	-
Lazulita	X	-	-	-	-	-
MagnesiohornBlenda	-	-	X	-	X	X
Magnetita	-	-	-	-	X	-
Marcasita	X	-	-	-	-	-
Microlina intermedia	-	-	X	-	X	X
Moscovita-2M	X	X	X	X	-	X
Ortoclasa	-	-	-	-	-	X
Pirita	X	X	X	X	-	-
Silicato de Fe y Mg	-	X	-	-	-	-
Zircón	-		-	-	X	-

En concordancia con los análisis elementales, en los minerales se encuentran fases minerales tales como sílice, sulfuros y óxidos de hierro (pirita y marcasita, hematita y magnetita) y diversos aluminosilicatos, tales como caolinita y moscovita. Por su parte, en el mineral filoniano Bagre se evidencia la argentita alfa, la cual se asocia a la alta presencia de Ag en el mineral. No obstante, lo anterior es posible que las sales solubles que aportarán aniones y cationes a las pulpas minerales, provengan de compuestos no cristalinos, los cuales no son identificables por DRX.

4.1.2 Caracterización fisicoquímica de los minerales auríferos. En la Tabla 4 se listan las lecturas promedio de pH y conductividad de los lixiviados. El pH promedio del agua destilada que se utilizó para el proceso fue 6.25 y su conductividad fue de 1.10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Como era de esperarse, se observa una tendencia general de aumento de la conductividad con el aumento de la cantidad de sales disueltas.

Tabla 7.

Valores de pH y conductividad del lixiviado de los minerales.

Mineral	g sal / L sol	Lixiviado	
		pH	Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
El Bagre (Aluvión)	0.025	6.09	63.73
Sabana (Aluvión)	0.070	7.41	128.90
El Bagre (Filón)	0.280	3.42	583.00
La Elsy (Filón)	0.167	6.67	221.70
Walter (Filón)	2.740	6.47	1256.30
Reina de Oro (Filón)	3.920	5.57	2762.00

Teniendo en cuenta estos resultados, los minerales de estudio se pueden dividir en dos grupos, los de alto contenido de sales disueltas (Walter y Reina de Oro) y los de bajo contenido (aluvión y filón del Bagre, aluvión de Sabana y La Elsy). En cuanto al pH de los lixiviados, es evidente la presencia tanto de sales ácidas como básicas en los minerales, destacándose el mineral filoniano El Bagre por generar el lixiviado con mayor carácter ácido (pH = 3.42). Por su parte, el mineral de aluvión Sabana generó el lixiviado con mayor pH (7.41).

Las sales obtenidas luego del secado de los lixiviados fueron analizadas por espectroscopia de energía dispersiva (EDS) para conocer su composición elemental, tales resultados se muestran en la Tabla 5 y en el Anexo 2, observándose, en al menos una de las sales, altos contenidos de calcio (27.91%), azufre (21.98%), hierro (16.54%) y potasio (13.54%) y de manera secundaria silicio (7.08%), zinc (6.74%), cloro (4.22%) y sodio (3.53%). Cabe resaltar que el análisis no reportó presencia de fósforo, por lo cual se descarta la variable fosfatos para la presente investigación. Por otro lado, los altos valores de carbono no se tendrán en cuenta debido a que las plantillas donde se depositan las muestras para este análisis interfieren en estos resultados.

Tabla 8.

Composición elemental (% en peso) obtenida por EDS de las sales contenidas en los minerales.

Elemento	Mineral					
	Reina de Oro (Filón)	Walter (Filón)	La Elsy (Filón)	Sabana (Aluvión)	El Bagre (Filón)	El Bagre (Aluvión)
C	23.09	10.9	27.89	23.05	11.91	18.55
O	36.15	37.74	28.88	35.33	47.06	36.25
F	-	-	1.13	1.47	-	-
Na	0.26	-	3.53	3.22	0.31	-

Tabla 9. *Continuación*

Elemento	Mineral					
	Reina de Oro (Filón)	Walter (Filón)	La Elsy (Filón)	Sabana (Aluvión)	El Bagre (Filón)	El Bagre (Aluvión)
Mg	0.35	0.11	1.31	1.11	0.36	1.13
Al	0.16	0.21	0.57	0.66	2.69	2.64
Si	0.07	-	1.83	1.48	0.86	7.08
S	17.27	21.98	8.88	12.82	15.48	7.32
Cl	-	-	4.22	1.32	-	2.22
K	0.29	-	13.54	3.89	0.19	4.44
Ca	21.03	27.91	6.70	11.66	4.00	11.81
Ti	-	-	-	0.15	-	0.14
Mn	0.84	-	0.22	0.57	0.61	-
Fe	0.14	0.16	0.53	1.92	16.54	1.65
Cu	0.35	0.32	0.33	0.43	-	-
Zn	-	0.66	0.46	0.92	-	6.74

En la Figura 2 se presenta el registro fotográfico de las sales obtenidas. La coloración de las sales es producto de la presencia de diferentes elementos (ver Tabla 5), por ejemplo, en el caso de la sal del mineral Walter, el color blanco concuerda con su alto contenido de calcio, el color café que presentan las sales de los minerales Sabana, El Bagre (aluvión y filón) y la Elsy se puede atribuir a la presencia de hierro, por otro lado, la sal de Reina de Oro presenta un color blanco almendra debido a su alto contenido de calcio y pequeñas cantidades de hierro y manganeso.



Figura 2. Fotografías de las sales obtenidas de los minerales.

Tal como se indicó en el apartado metodológico, los resultados anteriores fueron complementados con los análisis de los lixiviados con el fin de identificar los principales cationes y aniones en tales soluciones. La Tabla 6 recoge las concentraciones de los elementos metálicos presentes en los lixiviados de cada mineral estudiado, resaltándose las altas concentraciones de cationes tales como calcio (655.71 ppm) para el mineral Reina de Oro, hierro (114.8 ppm) para el mineral filoniano El Bagre y zinc (94.815 ppm) para el mineral Walter. Los demás cationes no se tuvieron en cuenta para el presente estudio debido a los bajos valores de concentración que presentaban en el lixiviado.

Tabla 10.

Concentración de metales en los lixiviados de los minerales

Cación [ppm]	Mineral					
	El Bagre (Aluvión)	Sabana (Aluvión)	El Bagre (Filón)	La Elsy (Filón)	Walter (Filón)	Reina de Oro (Filón)
Ag	-	-	-	-	-	-
Al	-	28.357	21.483	14.827	8.47	-
Ca	149.53	61.715	1.021	0.471	176.23	655.71
Cu	-	0.119	0.206	-	0.229	-
Fe	3.479	15.58	114.8	5.96	-	77.7
K	0.724	7.195	0.493	28.905	1.806	0.012
Mg	1.005	1.409	7.305	0.086	6.635	26.965
Na	2.869	0.342	0.088	10.245	2.267	0.088
Zn	-	0.124	0.173	0.126	94.815	62.25

Para la determinación de los aniones se siguieron los procedimientos especificados en el Standard Methods (ANDREW, 2013), obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 7. Tales resultados indican claramente que el ion sulfato es el principal anión presente en todas las sales, obteniéndose la mayor concentración (2196.329 ppm) en la del mineral Reina de Oro, seguida de la del mineral Walter (796.747 ppm); así mismo la menor concentración de este anión (23.211 ppm) se encontró en el lixiviado del mineral de aluvión El Bagre. Por su parte, las concentraciones de los otros aniones fueron bastante bajas, alcanzándose valores máximos de concentración para los iones cloruro y fosfato de 2 ppm y 0.57 ppm, respectivamente. Las concentraciones del ion fosfato en los lixiviados fueron tan bajas que no pudieron ser medidas por la técnica utilizada para

tal fin, lo cual concuerda con la ausencia de fósforo en los análisis EDS de las sales secas (Tabla 5).

Tabla 11.

Concentración de aniones en los lixiviados de los minerales

Anión [ppm]	Mineral					
	El Bagre (Aluvión)	Sabana (Aluvión)	El Bagre (Filón)	La Elsy (Filón)	Walter (Filón)	Reina de Oro (Filón)
SO ₄ ²⁻	23.211	108.475	230.946	123.336	796.747	2196.329
Cl ⁻	-	1.999	-	0.500	-	-
PO ₄ ³⁻	-	-	0.570	0.197	-	0.014
CO ₃ ²⁻	-	-	-	-	-	-

Con base en los resultados anteriores, se puede inferir que las sales solubles presentes en los minerales corresponden en su mayoría a sulfatos de calcio, zinc y férrico, por lo que estas fueron las sales tenidas en cuenta para la siguiente etapa experimental de implementación del proceso CGA.

4.2 Evaluación del efecto del pH y de las sales disueltas en la eficiencia del proceso CGA

4.2.1 Variación del pH. Para la evaluación de esta variable se tomaron los valores máximos de concentración de los cationes metálicos según los resultados mostrados en la Tabla 6, siendo para el calcio, hierro y zinc 655.71 ppm, 114.8 ppm y 94.815 ppm, respectivamente, sin embargo, estos valores se aproximaron a 120 ppm en el caso del hierro, 100 ppm en el caso del zinc y 556

ppm para el calcio, éste último disminuido por efectos de solubilidad de la sal disponible en el laboratorio y con el fin de no adicionar más iones al agregar un ácido que favoreciera la disolución y la concentración necesaria de 655.71 ppm. Los resultados presentados en la Figura 3 indican que, para los tres casos estudiados, el mayor porcentaje de recuperación de oro se obtiene a pH 5, alcanzándose valores de recuperación de oro de 97.53%, 94.78% y 79.39% en presencia de sulfatos de Fe^{3+} , Ca^{2+} y Zn^{2+} , respectivamente.

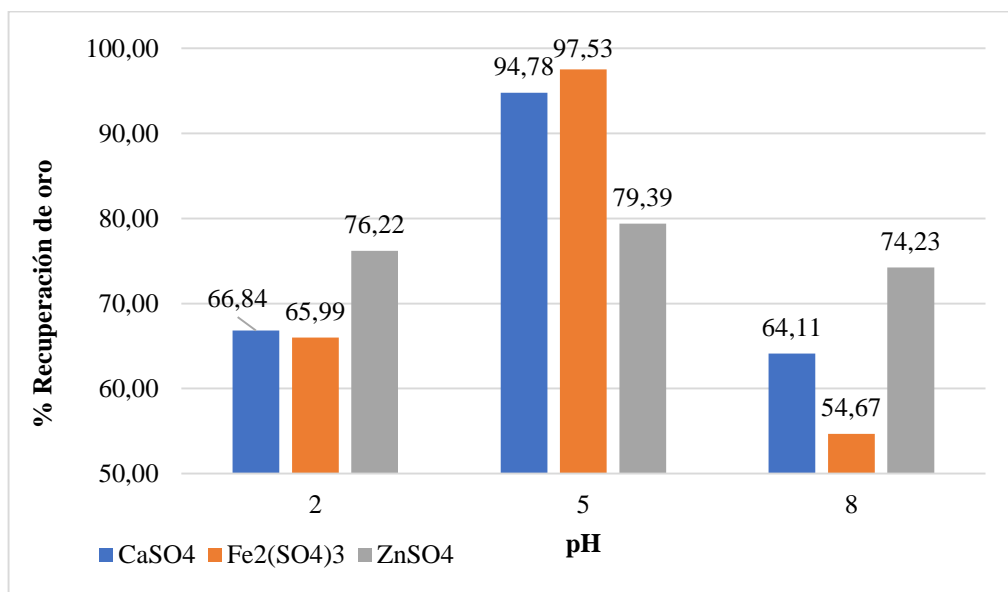


Figura 3. Recuperación de oro al aplicar el proceso CGA con distintos valores de pH en presencia de sulfatos de Fe^{3+} , Ca^{2+} y Zn^{2+} , respectivamente.

Adicionalmente, el estudio del efecto del pH se completó para la sal de sulfato férrico con la inclusión de dos niveles adicionales de esta variable (valores de pH de 3.5 y 6.5), tal como se aprecia en la Figura 4. Se observa que se mantiene la tendencia presentada anteriormente en la Figura 3, concluyéndose que un valor de pH de 5 es el más favorable para la recuperación del oro a través del proceso CGA.

Estos resultados, según los cuales independientemente de la sal presente en la pulpa, la recuperación de oro es favorecida a un pH de 5 y se reduce al disminuir o aumentar el pH, se pueden explicar de la siguiente forma. En primer lugar, hay que partir del hecho de que el oro limpio es hidrofílico y su llamada “hidrofobicidad natural” se asocia con la facilidad con la que su superficie adsorbe iones o se ensucia, generándose en la superficie del oro monocapas de sustancias orgánicas u óxidos, cuya presencia es la causa de la hidrofobicidad del oro (Calvez, Wong, & Tran, 1998). Teniendo en cuenta esto, al disminuir el pH, el exceso de iones H^+ en la solución remueve los óxidos y/o sustancias orgánicas absorbidas sobre el oro, bajando así su carácter hidrofóbico y, por tanto, se disminuye la recuperación del metal precioso.

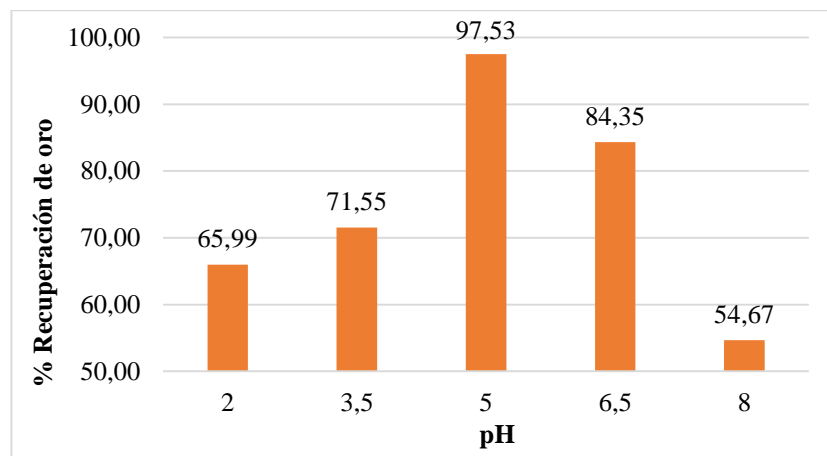
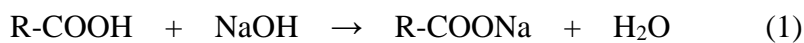


Figura 4. Recuperación de oro al aplicar el proceso CGA en presencia de sulfato férrico a diferentes valores de pH.

Ahora bien, el efecto desfavorable del aumento del pH se puede explicar con los cambios químicos que ocurren en la superficie de los aglomerados, específicamente en el puente líquido, dado que los ácidos grasos del aceite se hidrolizan en presencia de una base (saponificación), ver reacción (1) (Showler & Brown, 1965, pág. 53). De esta forma disminuyen las características

hidrofóbicas de los aglomerados carbón-aceite y, por tanto, su capacidad para atraer y retener las partículas de oro.



(Ácido graso)

Por otro lado, teniendo en cuenta que para las tres sales evaluadas (sulfatos de calcio, hierro y zinc) el comportamiento de la recuperación de oro con la variación de pH fue similar, se puede inferir que, entre las variables pH y tipo de sal, la primera juega un papel más importante en la eficiencia del proceso. Esta aseveración es sustentada por el hecho de que las curvas de especiación para los sistemas estudiados indican diferencias importantes en cuanto a la solubilidad de los tres sulfatos (ver Figura 5).

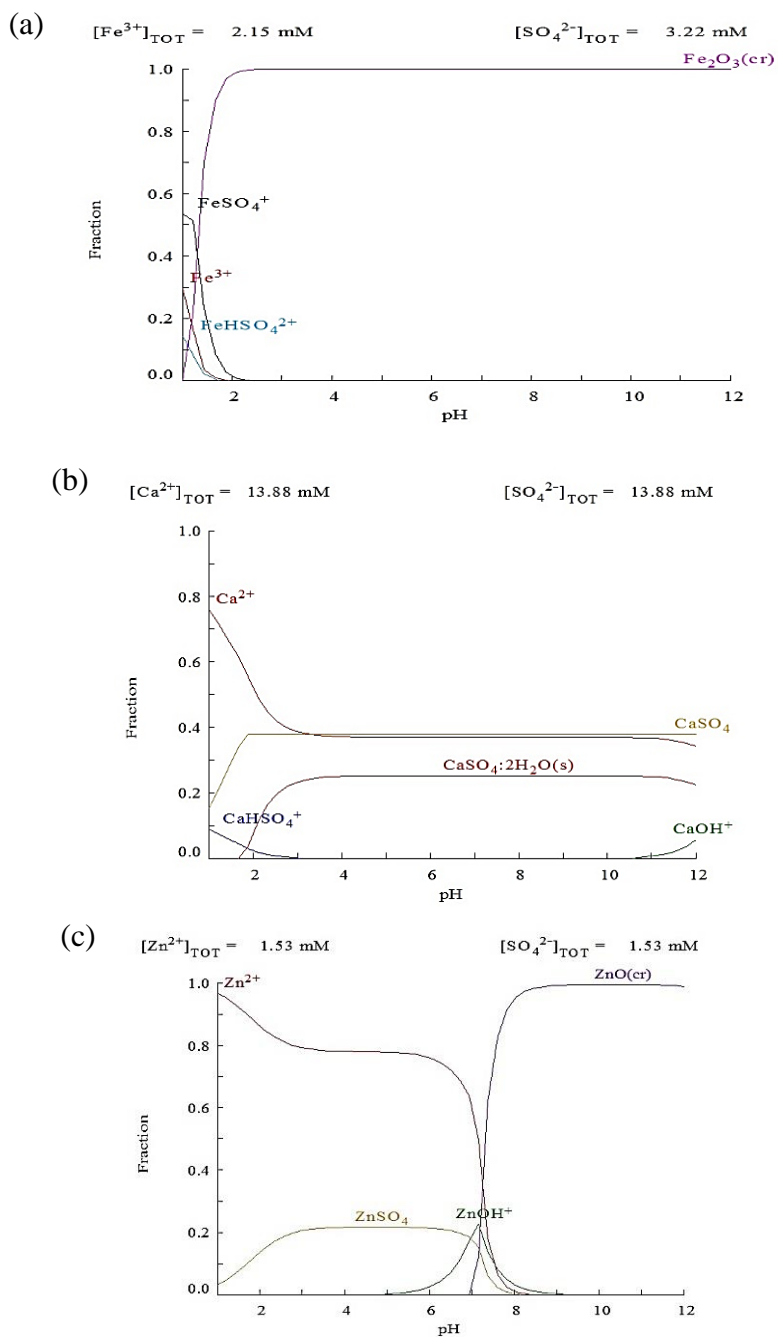


Figura 5. Diagramas de distribución de especies para los sulfatos férrico (a), cálcico (b) y de zinc (c).

Como se observa en estos diagramas, la solubilidad del sulfato férrico es prácticamente nula a valores de pH iguales o superiores a 2, mientras que, para el sulfato de calcio a pH 2, aproximadamente, el 50% del calcio se encuentra como Ca^{2+} y un 3% como CaHSO_4^+ ; al aumentar el pH de dicha solución la solubilidad del calcio baja a un 36%. Por su parte, el sulfato de zinc presenta un alto grado de solubilidad hasta pH 5, encontrándose valores de Zn^{2+} del 85% y 77% para pH 2 y 5, respectivamente. A pH 7, se tiene sólo un 2% de Zn^{2+} y 5% de ZnOH^+ .

A pesar de las grandes diferencias en cuanto a la presencia de iones en las soluciones a los diferentes valores de pH, hasta este punto no es tan evidente su relación con la recuperación de oro, como sí ocurre con respecto a la variable pH.

4.2.2 Variación de la concentración de las sales. La segunda etapa experimental consistió en aplicar el proceso CGA con los tres cationes seleccionados a distintas concentraciones, correspondiendo al mínimo 60 ppm para el calcio, 5 ppm para el hierro y 1 ppm para el zinc; la concentración media a 200 ppm para el calcio, 60 ppm para el hierro y 50 ppm para el zinc y la concentración máxima a 556.5 ppm para el calcio, 120 ppm para el hierro y 100 ppm para el zinc; valores seleccionados con base en las concentraciones de los lixiviados de los minerales auríferos (ver Tabla 6)

Los resultados de este estudio son mostrados en la Figura 6, de acuerdo con los cuales es evidente que, para todas las sales, la mayor recuperación de oro se alcanza con el mayor valor de concentración de las mismas. Tales resultados indican un efecto favorable de los iones disueltos en la pulpa sobre la recuperación de oro a través del proceso CGA. La tendencia observada se relacionaría con la mayor adsorción de iones sobre la superficie del oro al aumentar la

concentración de la sal (Wuz, Wang, Liu, Zhang, & Miller, 2016, págs. 190-200), lo que conlleva a una disminución de su carga neta superficial y, por ende, se aumenta su carácter hidrofóbico.

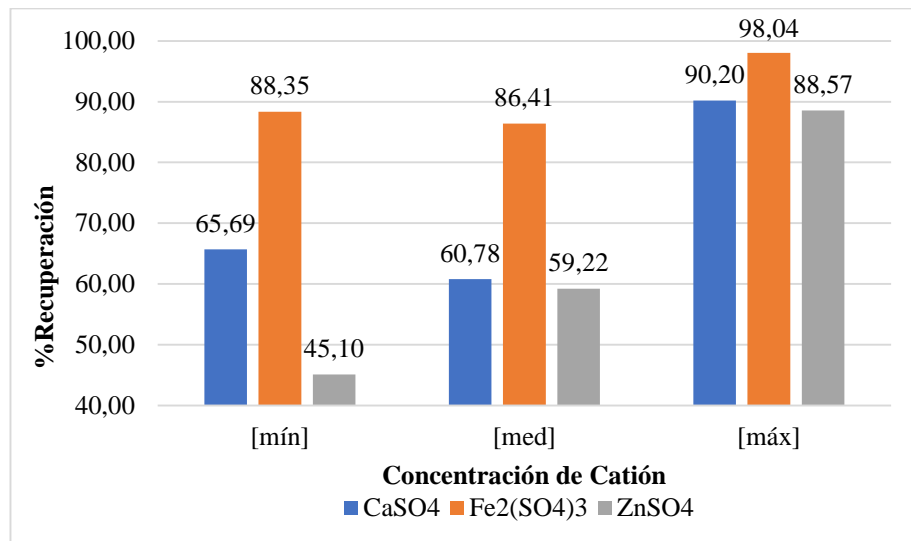


Figura 6. Recuperación de oro al aplicar el proceso CGA bajo diferentes concentraciones de las sales.

5. Conclusiones

- La caracterización fisicoquímica de diversos minerales auríferos colombianos, de aluvión y filonianos, permite concluir que las sales solubles que prevalece en ellos son sulfatos de calcio, hierro y zinc, y de manera secundaria se generan otros cationes como aluminio, cobre, potasio, magnesio y sodio. En comparación con los sulfatos, el contenido de otros aniones, tal como cloruros, fosfatos y carbonatos, es bajo.

- Independientemente del tipo y concentración de los iones presentes en la pulpa mineral, la recuperación de las partículas de oro sobre aglomerados carbón-aceite es favorecida a pH 5 en la solución. A menores y mayores valores de pH, la recuperación de oro disminuye, respectivamente, por efecto de la disminución de su hidrofobicidad y por la hidrólisis de los ácidos grasos del aceite presente en los aglomerados.

- El aumento en la concentración de las sales en la pulpa mineral favorece la recuperación de oro sobre los aglomerados carbón-aceite, por efecto del aumento de la adsorción de iones sobre la superficie de las partículas de oro, lo que conlleva a un aumento en la hidrofobicidad del metal precioso.

6. Recomendaciones

Teniendo en cuenta el impacto ambiental, económico y social que puede representar el desarrollo de este proyecto y la aplicación del proceso CGA a gran escala se plantean las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas directa o indirectamente con este tema:

- Realizar pruebas experimentales donde haya presencia de dos o más sales para evaluar la interacción entre éstas y sus efectos en la recuperación de oro aplicando el proceso CGA.

- Regular el pH alrededor de 5 para minerales naturales al momento de aplicar el proceso CGA con el fin de evaluar los efectos reales de este parámetro en la recuperación de oro.
- Evaluar el efecto del lavado en minerales naturales o en su defecto, la precipitación de las sales solubles antes de aplicar el proceso CGA que permitan confrontar los resultados obtenidos en la presente investigación.

Referencias bibliográficas

- ANDREW d. (edt) Eaton. Standard methods for examination of water & wastewater. 22 Ed. 2013. 4500-P C. Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method, 4500-Cl G. Colorimetric Method, 4500-SO₄²⁻ E. Turbidimetric Method.
- BING, Z. LIZHU, L. HUIQING, X.. Application of coal gold agglomeration process to gold recovering from amalgamation tailings. [Base de datos en línea]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. Vol 7, N° 4. 1997. p. 152-155.
- CALVEZ; J.P.S. KIM, M.J. WONG P.L.M. Y TRAN, T.. Use of coal-oil agglomerates for particulate gold recovery. [Base de datos en línea]. Minerals Engineering, Vol. 11, No. 9, 1998. p. 803-812.
- CILINGIR, Y. SEN, S.. An investigation on the effects of ore grade and particle-liberation size in gold recovery by coal-oil-gold agglomerate flotation. [Base de datos en línea]. Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress. 2000. p. C8a-6 – C8a-7.
- CÓRDOBA, E. M. Recuperación de oro particulado con aglomerados carbón-aceite: una tecnología limpia en la extracción de oro. Tesis doctoral: Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 1998
- CYTEC. Mining Chemical Handbook. Edición revisada. 2002. p. 111.
- HINOJOSA, C.A., PINZÓN, D. L & MONTOYA, D. F. Aplicación del proceso CGA a minerales auríferos oxidados: establecimiento de los parámetros metalúrgicos de interés. Tesis de pregrado: Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2017, 56p.

INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. Minería química. 1 ed. 1991. Pág. 80 - 81

KOTZE, W. Y PETERSEN, F.W.. Free gold recovery by coal-oil agglomeration. [Base de datos en línea]. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Enero/febrero de 2000. 57-58. (Recuperado en 30 octubre 2016).

LENNTECH. Propiedades químicas del Hierro - Efectos del Hierro sobre la salud - Efectos ambientales del Hierro [en línea]. (Recuperado en 22 enero 2018). Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/fe.htm#ixzz551jpgRmx>

MLAKI., A. KATIMA., J. KIMWERI, H. Gold Recovery from Gold Bearing Materials Using Bio-Diesel, Vegetable Oils and Coal. [Base de datos en línea]. Engineering, Vol 3. 2011. p. 555-560

MOSES, L.B. Y PETERSEN, F.W. Flotation as a separation technique in the coal gold agglomeration process. [Base de datos en línea]. Minerals Engineering, Vol. 13, No. 3, 2000. p. 255-264.

ORTIZ, L. M. Estudio de algunos parámetros geometalúrgicos de minerales auríferos de aluvión y su efecto sobre el proceso de aglomeración de oro con carbón y aceite (CGA). Tesis de pregrado: Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 2018.

ROJAS, J. A. El libro de la minería del oro en Iberoamérica. Madrid – España: RED XIII-B, CYTED ediciones, 2001. p. 239. ISBN: 84-931538-8-5

SHOWLER, A. J. BROWN, T. A. Model Answers in Organic Chemistry: For 'A' Level and Ordinary National Certificate Students. 1 ed. C. W. Schofield. 1965. Pág. 53.

SIERRA, J. D.; RUÍZ, V. A. Evaluación del efecto de las características de varios materiales carbonosos y del aceite de soya crudo, refinado y de sus ácidos grasos en la formación de

aglomerados carbón-aceite para la recuperación de oro. Tesis de pregrado: Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. 2017, 45p.

Software HYDRA: Hydrochemical Equilibrium-Constant Database. Versión 18. agosto de 2009.

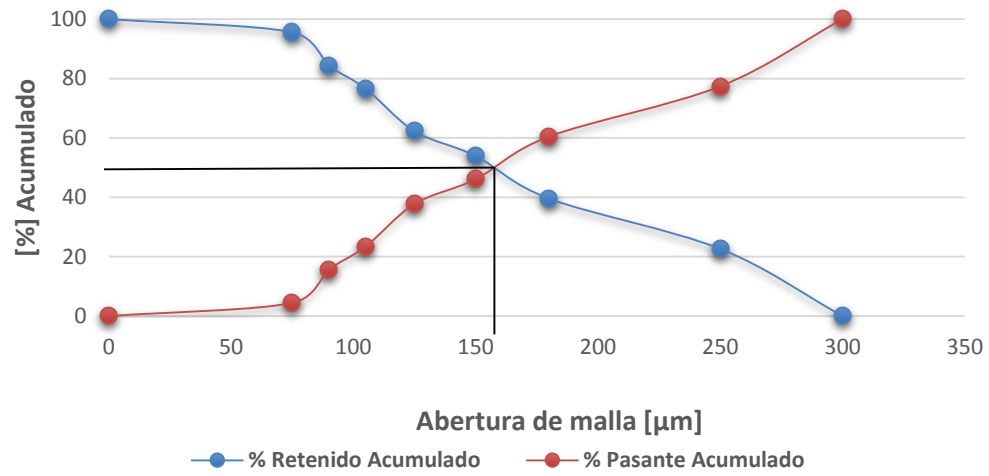
SYED, S.. Recovery of gold from secondary sources—a review. [Base de datos en línea]. Revista de Hidrometalurgia. 2011. p. 38.

WU, X.Q. Y COL. The adhesion of gold to oil-carbon agglomerates. [Base de datos en línea]. Minerals Engineering, Vol 17, 2004. p. 33–38.

WUZ; WANG X; LIU H; ZHANG H; MILLER J.D. Some physico chemical aspects of water-soluble mineral flotation. Advances in colloid and interface. Science 235 (2016) 190-200.

Apéndices

Apéndice A. Análisis granulométrico sintético del material carbonoso



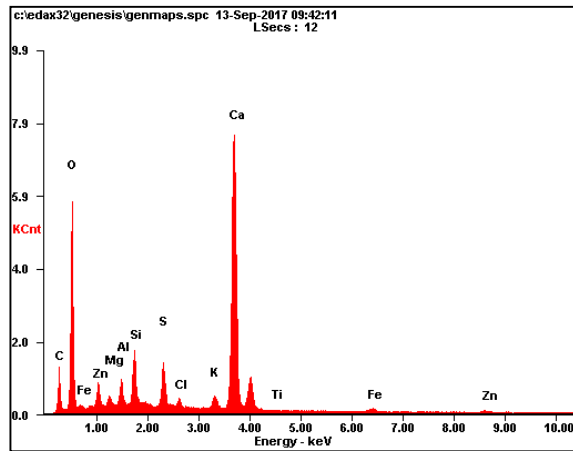
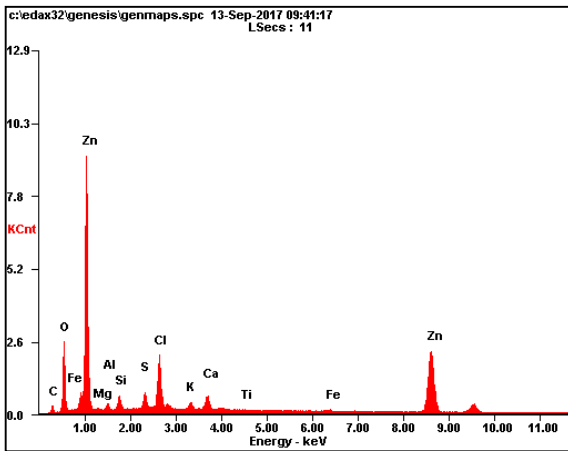
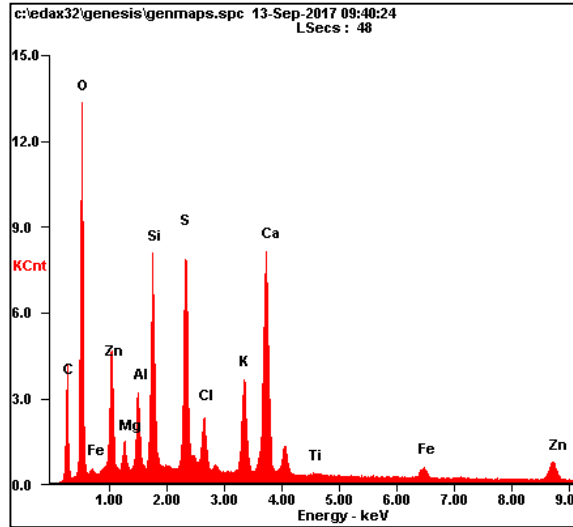
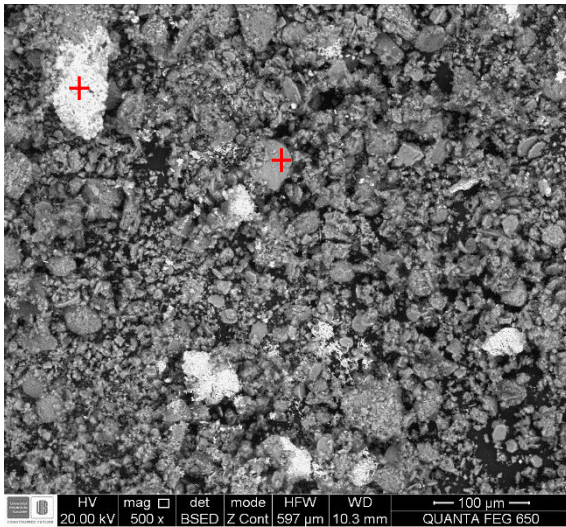
Apéndice B. Resultados SEM – EDS realizado a las sales de los minerales.

Imágenes. La adquisición de las imágenes se realizó con un Microscopio Electrónico Quanta FEG 650 ambiental (ESEM), trabajando en el modo de alto vacío utilizando el detector de electrones retrodispersados “Backscater Electron Detector” (BSED)

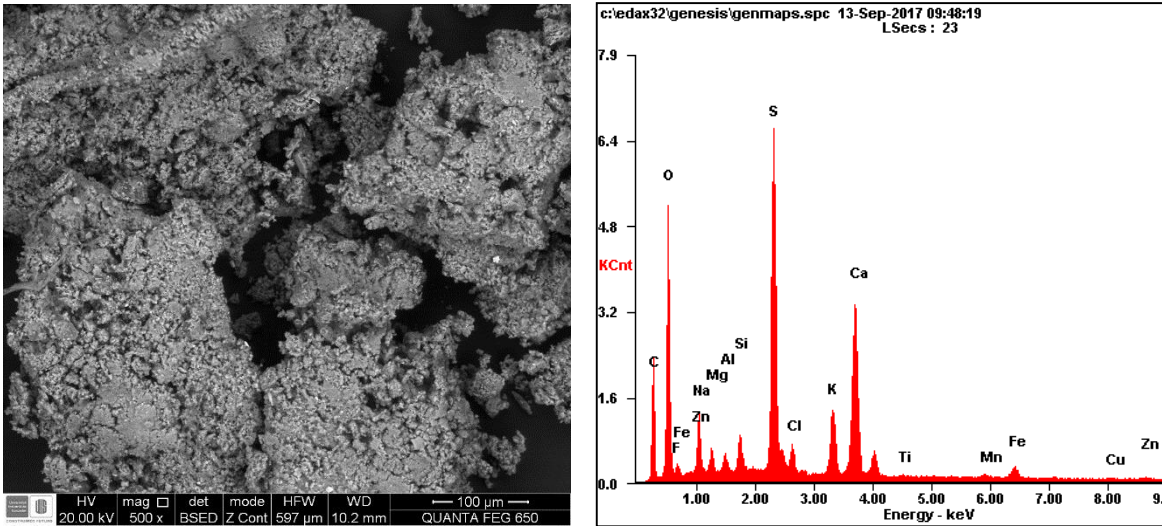
Análisis de químico. Los análisis puntuales, fueron realizados con el detector EDAX APOLLO X que tiene una resolución de 126.1 eV (en. Mn $K\alpha$) para realizar análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy), proporcionando información cualitativa y semi-cuantitativa de los elementos químicos presentes en los materiales. Los elementos químicos detectados mediante el EDS se rastrearon en los puntos de interés, revelando las posibles concentraciones elementales.

Experimental: La muestra suministrada fue montada en el porta-muestras y recubierta de grafito con un recurridor-evaporador Quórum Q150R luego fueron colocadas en el Quanta 650 FEG SEM ambiental (ESEM) (Microscopio Electrónico de Barrido). El análisis de las muestras se realizó bajo las condiciones mostradas en la parte inferior de cada imagen.

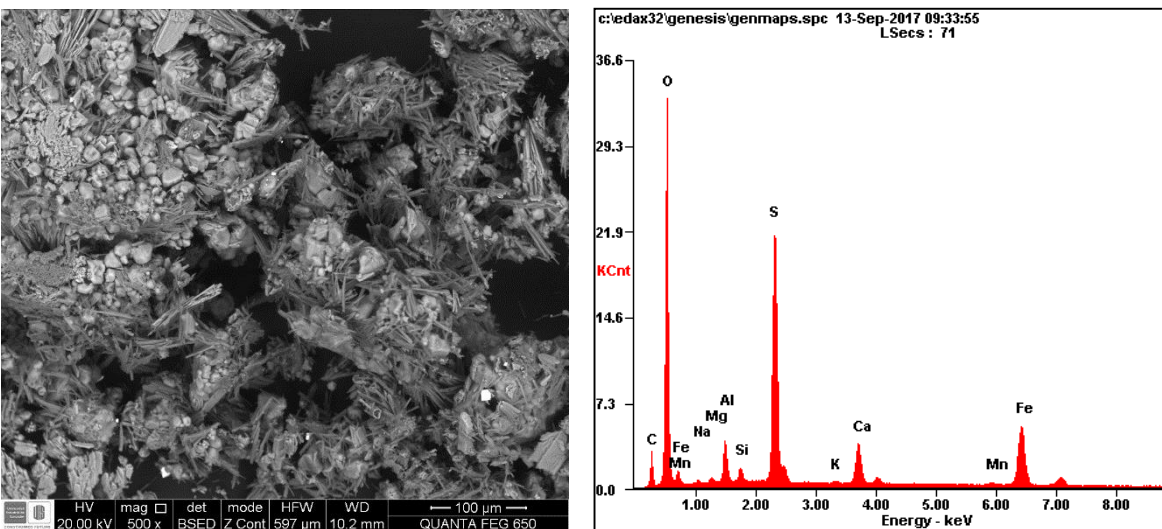
Resultados SEM – EDS sal del mineral El Bagre (Aluvión)



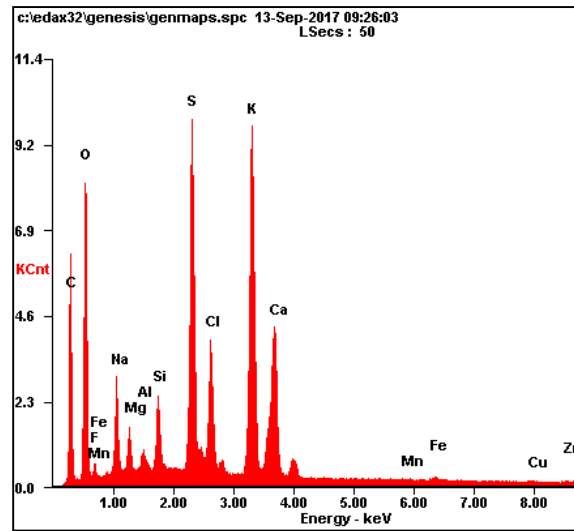
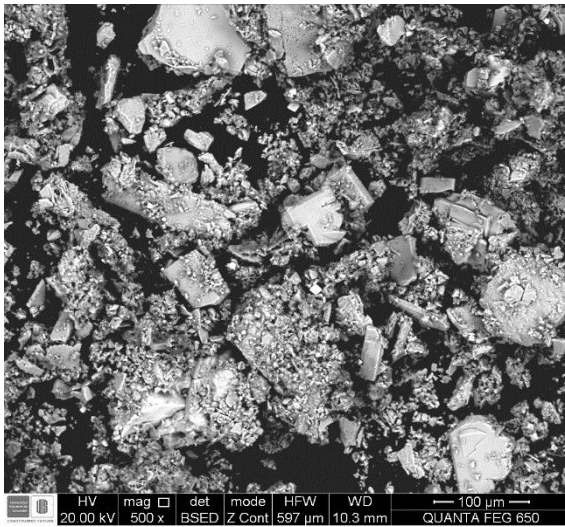
Resultados SEM – EDS sal del mineral de Sabana (Aluvión)



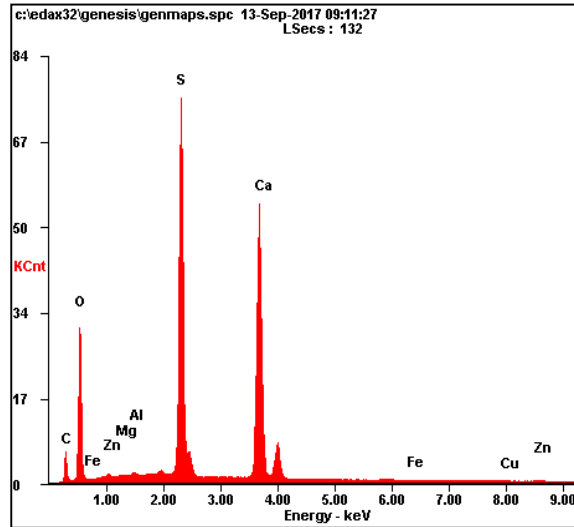
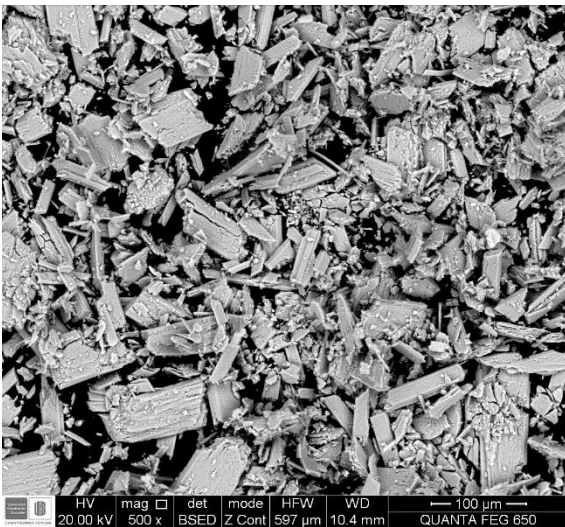
Resultados SEM – EDS sal del mineral El Bagre (Filón)



Resultados SEM – EDS sal del mineral La Elsy (Filón)



Resultados SEM – EDS sal del mineral Walter (Filón)



Resultados SEM – EDS sal del mineral Reina de Oro (Filón)

