

Evaluación de la remoción de cianuro y metales pesados en efluentes líquidos provenientes del beneficio de oro de la pequeña minería, mediante adsorción con carbón activado y peróxido de hidrógeno

CLAUDIA CATALINA ESTRADA MONTOYA

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS CONTABLES, ECONÓMICAS Y
ADMINISTRATIVAS
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO
AMBIENTE
MANIZALES
2019**

Evaluación de la remoción de cianuro y metales pesados en efluentes líquidos provenientes del beneficio de oro de la pequeña minería, mediante adsorción con carbón activado y peróxido de hidrógeno

Proyecto para optar al título de Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, del estudiante:

CLAUDIA CATALINA ESTRADA MONTOYA

Directora:

GLORIA MARÍA RESTREPO FRANCO Ph.D.

Línea de investigación:

Biosistemas Integrados

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS CONTABLES, ECONÓMICAS Y
ADMINISTRATIVAS
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO
AMBIENTE
MANIZALES**

Agradecimientos

A la Dra. Gloria Maria Restrepo Franco, Directora del trabajo de grado, por sus enseñanzas y apoyo durante la realización de la investigación, siempre guiándome hacia la excelencia y dándome ejemplo de perseverancia y positivismo.

Al Ingeniero Gabriel Jaime Álvarez y a la Sociedad Minera el Manzanillo por permitir el acceso, toma de muestras y equipos para las pruebas experimentales.

A mi esposo, hijo y hermanos por siempre estar presentes y apoyarme en todas las decisiones que he tomado tanto en lo laboral como en lo personal y ser mi fuerza para salir adelante y luchar contra las adversidades.

Especial dedicatoria a la memoria de mi madre Aura Montoya de Estrada y a la memoria de mi padre Manual Antonio Estrada, quienes me enseñaron que con esfuerzo y dedicación todo se puede lograr y siempre me inculcaron la importancia de estudiar y el amor por la familia.

Tabla de contenido

Lista de tablas	1
Lista de figuras	2
Lista de anexos	3
Resumen.....	4
Abstract.....	4
1. Introducción	6
2. Objetivos.....	8
2.1. Objetivo general.....	8
2.2. Objetivos específicos	8
3. Referente teórico	9
3.1. Antecedentes.....	9
3.2. Marco Teórico.....	11
3.2.1. Descripción del proceso de tratamiento y recuperación de oro en la pequeña minería.....	11
3.2.2. Cianuro y metales pesados en efluentes de minería de oro	13
3.2.3. Toxicología del cianuro y metales pesados	14
3.2.4. Valores permisibles para cianuro y metales pesados en efluentes de minería	16
3.2.5. Remoción de cianuros y metales pesados en efluentes líquidos, provenientes del proceso de cianuración.....	17
4. Materiales y métodos.....	19
4.1. Ubicación del experimento y toma de muestras	19
4.2. Eficiencia del proceso de adsorción con carbón activado en la remoción de cianuro y de los metales pesados Pb, Zn y Fe	19
4.3. Valoración de la eficiencia del proceso de degradación de cianuro y precipitación de metales pesados (Pb, Zn y Fe) utilizando peróxido de hidrógeno, sobre el afluente previamente tratado con carbón activado.....	21
4.4. Análisis estadístico de la información.....	22
4.5. Diseño de una propuesta metodológica para la remoción de cianuro y metales pesados en afluentes líquidos.....	23

5. Resultados y discusión	24
5.1. Eficiencia del proceso de adsorción con carbón activado en la remoción de cianuro y de los metales pesados Pb, Zn y Fe.	24
5.2. Valoración de la eficiencia del proceso de degradación de cianuro y precipitación de metales pesados (Pb, Zn y Fe) utilizando peróxido de hidrógeno, sobre el afluente previamente tratado con carbón activado.....	28
5.3. Diseño de una propuesta metodológica para la remoción de cianuro y metales pesados en afluentes líquidos.....	32
6. Conclusiones	41
7. Recomendaciones	43
8. Referencias bibliográficas	44
9. Anexos.....	47

Lista de tablas

Tabla 1. Compuestos que forman el cianuro y metales pesados presentes en soluciones cianuradas.....	14
Tabla 2. Valores permisibles para descargas mineras.....	17
Tabla 3. Tratamientos a evaluar en la determinación de la eficiencia de la adsorción con carbón activado en la remoción de cianuro y metales pesados.	21
Tabla 4. Tratamientos a evaluar en la determinación de la eficiencia de la adsorción con peróxido de hidrógeno en la remoción de cianuro y metales pesados.	22
Tabla 5. Código asignado a los tratamientos para el análisis estadístico.	24
Tabla 6. Concentraciones de las variables de respuesta, posterior al tratamiento de adsorción con carbón activado.....	25
Tabla 7. Concentraciones de las variables de respuesta, posterior al tratamiento con adición de peróxido de hidrógeno.	29
Tabla 8. Porcentajes de remoción de cianuro, plomo, zinc y hierro.	33
Tabla 9. Parámetros operacionales para remoción de cianuro y metales pesados mediante adsorción con carbón activado, con el costo de tratamiento.	35
Tabla 10. Parámetros operacionales para remoción de cianuro y metales pesados mediante adición de peróxido de hidrógeno al 50%.....	37
Tabla 11. Parámetros operacionales para remoción de cianuro y metales pesados mediante la adición de peróxido de hidrógeno al 35%.	37
Tabla 12. Costos totales de tratamiento por m ³ de solución a tratar.	39

Lista de figuras

Figura 1. Proceso de recuperación de oro.	13
Figura 2. Tanques con agitación, en los cuales se realizaron las pruebas experimentales de adsorción con carbón activado.....	20
Figura 3. Pruebas experimentales con adición de peróxido de hidrógeno.	22
Figura 4. Eficiencia de adsorción mediante tratamiento con carbón activado. a) Eficiencia de adsorción para cianuro. b) Eficiencia de adsorción para Zinc. c) Eficiencia de adsorción de plomo. c) Eficiencia de adsorción de hierro.	27
Figura 5. Eficiencia de degradación de cianuro y precipitación de plomo y hierro, mediante adición de peróxido de hidrógeno. a) Eficiencia degradación de cianuro. b) Eficiencia de precipitación de Zinc. c) Eficiencia de precipitación de hierro.....	30
Figura 6. Comparación de concentraciones en la etapa final del tratamiento, con respecto al límite permisible. a) Concentración de cianuro b) Concentración de zinc c) Concentración de plomo d) Concentración de hierro.	32
Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de remoción de cianuro y metales pesados en efluentes líquidos de la pequeña minería.	34

Lista de anexos

Anexo 1. Certificado de calidad y ficha técnica del carbón activado.	47
Anexo 2. Ficha técnica peróxido de hidrógeno al 35% y 50%.....	49
Anexo 3. Registros y cálculos para determinación de concentración de cianuro (Standard Methods 4500-CN-D).....	52
Anexo 4. Curvas de calibración y datos de concentración para metales (método de adsorción atómica llama aire acetileno Ref SM 3111 B).	54

Resumen

Teniendo en cuenta la problemática ambiental que se está presentando en el país con la pequeña minería, por el uso de sustancias tóxicas en sus procesos productivos, es necesario implementar metodologías para el tratamiento de cianuro y metales pesados (Pb, Zn y Fe) en los efluentes, antes de ser descargados en fuentes hídricas, con el fin de mitigar el deterioro del medio ambiente y asegurar que los procesos productivos respeten las normas ambientales y los límites permisibles de sustancias en descargas. De acuerdo con lo anterior, se deben buscar metodologías que sean de fácil aplicación, eficientes y de fácil manejo para los pequeños mineros. En esta investigación se evaluó el método de adsorción con carbón activado conocido por sus cualidades para adsorber metales, y el método de tratamiento químico con peróxido de hidrógeno que degrada el cianuro y precipita los metales pesados; además el exceso de peróxido de hidrógeno residual en la solución tratante se descompone en agua (H_2O) y oxígeno (O_2). La determinación de la eficiencia del proceso de adsorción con carbón activado en la remoción de cianuro (CN) y de los metales pesados Pb, Zn y Fe, se realizó a través de pruebas experimentales, en las cuales se evaluó el efecto de la cantidad de carbón (20, 40 y 60 g de carbón/Litro de solución) y el tiempo de adsorción (4, 8, 12 horas) y se analizaron como variables de respuesta la concentración de cianuro, plomo, zinc y hierro. Para evaluar la eficiencia de la degradación de cianuro y precipitación de Pb, Zn y Fe utilizando peróxido de hidrógeno, se realizaron pruebas con diferentes cantidades de peróxido de hidrogeno (1, 1,5 y 2,0 litros de peróxido/Kg CN en solución) durante un tiempo de reacción de 4 horas, determinando cada hora el pH para evaluar su variación y al final de la prueba se tomaron las muestras para análisis de la concentración de CN, Pb, Zn y Fe. Con el análisis estadístico de los resultados se seleccionó el mejor tratamiento para el proceso de adsorción con carbón activado (60 g de carbón/litro de solución y 12 horas de contacto) y el mejor tratamiento para el proceso de degradación de cianuro y precipitación de metales con peróxido de hidrógeno (2 litros de H_2O_2 /Kg de CN en solución, durante 4 horas), con estas condiciones se diseñó un diagrama de flujo y tablas con datos técnicos, para la implementación de las metodologías estudiadas en este trabajo.

Palabras clave: minería de oro; remoción metales pesados; degradación de cianuro; precipitación de metales pesados; contaminación ambiental con cianuro y metales pesados.

Abstract

Considering the environmental problems that actually is occurring in our country with small-scale mining due to the use of toxic substances in their production process, it should implement methodologies to treatment of cyanide and heavy metals (Pb, Zn and Fe) in the effluents, before being discharged in water sources, in order to mitigate environmental pollution and process production accomplish with environmental regulation and the permissible limits of substances in discharges. Due to afore mentioned, we need to found methodologies that are easy to apply, efficient and easy to use for small-scale miners. This research evaluated the methods of adsorption with activated coal known for its qualities to adsorb metals and the method of chemical treatment with hydrogen peroxide that degrades cyanide and precipitate heavy metals; in addition, the excess of residual hydrogen peroxide is decomposed in water (H_2O) and oxygen (O_2). The determination of efficiency of adsorption process with activated coal in removal of cyanide (CN) and heavy metals Pb, Zn and Fe, experimental tests were carried out to evaluate the effect of the amount of coal (20, 40 and 60 g of coal/liter of solution) and the adsorption time (4, 8, 12 hour) and they were analyzed

as response variables concentration of CN, Pb, Zn and Fe. To evaluate efficiency in cyanide degradation and Pb, Zn and Fe precipitation, using hydrogen peroxide (1, 1,5 and 2 L of peroxide /Kg.CN on solution) for a time of 4 hours reaction, determining every hour pH to evaluate its variation and the end of the test were analyzed samples to concentration of CN, Pb, Zn and Fe. With statistic analysis of the results, the best treatment for the cyanide degradation and heavy metals precipitation was selected (2 liters of H₂O₂/Kg of CN in solution, during 4 horas), with these conditions, a flow diagram and tables with technical data were designed for the implementation of the methodologies studied in this investigation.

Keywords: gold mining; heavy metal removal; cyanide degradation; heavy metal precipitation ; environmental pollution with cyanide and heavy metal

1. Introducción

En Colombia la minería ha venido incrementando sus operaciones durante los últimos años, especialmente la minería de oro, la cual utiliza como principales insumos para la recuperación del metal, compuestos altamente tóxicos como el cianuro de sodio y el mercurio.

Los pequeños mineros para recuperar el oro utilizan pequeñas plantas o lugares artesanales (conocidos como entables) en los cuales se usa el cianuro de sodio (proceso conocido como cianuración) y en algunos casos el mercurio (proceso conocido como amalgamación) para procesar el mineral que contiene oro y así obtenerlo en forma pura o acompañado de plata. Durante este proceso se generan soluciones con altos contenidos de cianuro y metales pesados; la mayoría de estos entables descargan sus residuos en fuentes hídricas sin previo tratamiento o con un tratamiento deficiente, sin cumplir los límites permisibles para descargas de estos compuestos en las fuentes hídricas.

Debido a la problemática ambiental que se presenta por la contaminación de las fuentes de agua, producto de la descarga de residuos provenientes de las plantas de procesamiento de oro, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible ha tomado cartas en el asunto y creó la ley 1658 del 15 de julio de 2013 donde se prohíbe el uso del mercurio en la extracción del oro, dando plazo máximo hasta el 2018 para eliminar completamente el uso de este metal como agente recuperador de oro, alternativa que usa principalmente la pequeña minería para recuperación de oro libre y que por tradiciones ancestrales ha sido difícil su eliminación. En cuanto al uso del cianuro de sodio, no existe aún ninguna restricción para su utilización como insumo en minería de oro, sin embargo, este compuesto se debe degradar antes de ser descargado, debido a que durante el proceso de cianuración, las soluciones residuales se cargan de los metales (plomo, hierro, cobre, zinc entre otros) que están presentes en el mineral ya que son disueltos por el cianuro durante el proceso. Es así como los desechos de estos procesos tienen altos contenidos de cianuro y metales pesados que como se mencionó anteriormente, deben ser tratados antes de ser descargados en las fuentes hídricas, para evitar daños en el medio ambiente y en la salud de comunidades vecinas.

Un efluente típico del proceso de cianuración en una planta de beneficio puede contener concentraciones de cianuro entre 500 y 5500 mgCN/L (Estrada, 2001), comparado con el límite permisible para descargas mineras el cual es de 1 mgCN/L (Resolución No. 0631 de 17 de marzo de 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), mientras

que para metales pesados, varían de acuerdo con el tipo de mineral que se procese y su composición mineralógica.

Es difícil dar cifras exactas de la magnitud de este problema, debido a que muchos de los procesos de beneficio de oro realizados por los pequeños mineros se realizan sin ningún registro o permiso y se encuentran dentro de la minería conocida como minería ilegal y no se logra determinar el impacto real de la cantidad de contaminación generada por este tipo de residuos en fuentes hídricas. De acuerdo con lo anterior, es clara la necesidad de tratar los desechos industriales con altos contenidos de cianuro y de metales pesados antes de ser descargados, para evitar intoxicaciones, problemas de salud y daños irreparables en el medio ambiente como la pérdida de la biodiversidad.

El uso de buenas prácticas de tratamiento e implementación de metodologías limpias en el proceso de recuperación del oro, permitirá no solo impactar positivamente el medio ambiente, sino dar opciones a los pequeños mineros para ejercer su actividad económica sin ningún tipo de problema legal, ya que en algunos casos se tildan a los pequeños mineros como criminales por ocasionar contaminación al ambiente, esto permitiría legalizar sus procesos y mantenerlos en cumplimiento con las normas ambientales, además de permitir que la minería siga siendo una actividad económica reconocida tanto para las grandes empresas como para los pequeños mineros. Este trabajo aportará a los desarrollos de la línea de investigación en Biosistemas integrados, en la identificación de procesos que aporten a la sostenibilidad ambiental de la práctica minera.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar la remoción de cianuro y metales pesados, en efluentes líquidos provenientes del beneficio de oro de la pequeña minería, mediante la adsorción con carbón activado y peróxido de hidrógeno.

2.2. Objetivos específicos

- Calcular la eficiencia del proceso de adsorción con carbón activado en la remoción de cianuro, Pb, Zn y Fe en los efluentes líquidos que provienen de una planta de recuperación de oro de la pequeña minería.
- Valorar la eficiencia del proceso de degradación de cianuro y precipitación de metales pesados (Pb, Zn y Fe) utilizando peróxido de hidrógeno, sobre el efluente previamente tratado con carbón activado.
- Diseñar una propuesta metodológica para la remoción de cianuro y metales pesados en efluentes líquidos, que se adapte a las necesidades de las plantas de beneficio de recuperación de oro que utilizan los pequeños mineros.

3. Referente teórico

3.1. Antecedentes

A nivel mundial existen varias alternativas para la remoción de cianuro y eliminación de metales pesados, algunas de estas alternativas se han aplicado en el tratamiento de efluentes de minería, encontrándose documentadas en investigaciones y en artículos científicos que han servido como referencia inicial.

En artículo titulado *Removal of heavy metals and cyanide from gold mine wastewater* presentado por Achepong et al., (2010) se describen y comparan diferentes alternativas de tratamiento de cianuro y metales pesados, dando un pequeño resumen de los métodos: precipitación química, coagulación–floculación, flotación, filtración, intercambio iónico, osmosis inversa, filtración por membranas, electroquímica, degradación biológica, adsorción y bioadsorción, mencionando las principales ventajas y desventajas de cada método, rangos de eficiencia y condiciones aplicables para su implementación. En artículo titulado *Adsorption of heavy metals in mine wastewater by mongolian zeolites*, por Egashira et al., (2012), se estudia el comportamiento de las zeolitas como material adsorbente en la remoción de cobre, zinc y magnesio, se cuantifican cantidades de metal adsorbidos y se calculan parámetros para las isotermas de adsorción a diferente pH y tipo de zeolita.

En estudio titulado *Removal of cyanide adsorbed on pyrite by H₂O₂* presentado por Tu et al., (2019) se estudia la eficiencia de remoción de cianuro adsorbido en pirita mediante peróxido de hidrógeno a diferente pH y temperatura. En artículo titulado *the treatment of cyanide from gold mine effluent by a novel five-compartment electrodyalisis* por Zheng et al., (2015) se propone el tratamiento de cianuro mediante electrodiálisis, estudiando dos modelos de remoción de cianuro: membranas de intercambio iónico homogéneas y membranas de intercambio iónico heterogéneas, midiendo la eficiencia de recuperación y la variación de pH. En el artículo *An integrated biological approach for treatment of cyanidation wastewater* presentado por Mekuto et al., (2016) se comparan los tratamientos físicos, químicos y microbianos para la remoción de cianuro, mencionando las principales ventajas y desventajas haciendo un especial énfasis en la utilización de microorganismos para degradar cianuro debido a los bajos costos que estos pueden presentar y presenta la gran variedad de microorganismos que pueden ser utilizados para degradar compuestos de cianuro.

Actualmente se han desarrollado y patentado dos procesos que utilizan el peróxido de hidrógeno en la remoción de cianuro. El primer proceso conocido como proceso Kastone

fue propuesto por la Dupont, (1974) y por Mathre Devries, (1981). Este proceso utiliza una solución de peróxido de hidrógeno al 41% especialmente estabilizada con unos pocos mg/L de formaldehído y cobre; este proceso fue probado a nivel piloto en forma continua en *Homestake Minig Company* en 1981. El segundo proceso fue desarrollado por *Degussa Corporation*, empleando una solución de peróxido de hidrógeno y sulfato de cobre en varias concentraciones, este proceso confirma que no es necesaria la presencia de formaldehído. La primera instalación a nivel mundial fue construida y operada por *Degussa Corporation* en la mina Ok Tedi en Papua, Nueva Guinea (Knorre, 1987).

En Colombia se han realizado algunas investigaciones para la evaluación de la degradación de cianuro en efluentes de minería y de algunos metales pesados en efluentes industriales de otra procedencia. La degradación de cianuro en efluentes de minería, se ha evaluado en investigaciones basadas en la aplicación de tratamientos químicos y microbianos. En estudio realizado por Restrepo et al., (2006) se evaluó la bacteria *Pseudomonas fluorescens*, con la cual se apreció una adecuada degradación del cianuro en efluentes con una concentración inicial del metal hasta 700 ppm, sin embargo, las concentraciones típicas de un efluente de cianuración están entre 500 ppm y 5500 ppm. En esta investigación no se estudió el efecto de la bacteria sobre los metales pesados. En los tratamientos químicos se han realizado investigaciones de la degradación de cianuro con peróxido de hidrógeno e hipoclorito de sodio, con el objetivo de comparar estos dos métodos en la eficiencia de degradación de cianuro. Estrada, (2001) identificó preliminarmente el potencial del peróxido de hidrógeno para precipitar los metales pesados en forma de hidróxidos; es necesaria la confirmación de esta hipótesis a través de análisis que confirmen este proceso de remoción de metales pesados.

Se han realizado otro tipo de investigaciones evaluando la adsorción de metales pesados con carbón activado, en otro tipo de soluciones diferentes a los efluentes de minería (Mendoza, 2012). A pesar de las investigaciones existentes es importante tener en cuenta que las soluciones residuales de los procesos de minería de oro son muy complejas y presentan una variedad de compuestos que deben ser tratados conjuntamente para lograr la calidad necesaria para ser vertidas en fuentes hídricas. En Colombia no se han identificado investigaciones orientadas a la evaluación de un tratamiento integral tanto para metales pesados como para cianuro residual. Por lo tanto, esta investigación se propone valorar una metodología que permita contribuir en el cierre de brechas resultantes de investigaciones anteriores, al evaluar los dos métodos planteados la adsorción de metales pesados con carbón activado y la oxidación de cianuro con peróxido de hidrógeno, que a

su vez precipita metales pesados residuales y así aportar en el tratamiento integral de las soluciones procedentes de minería con altos contenidos de cianuro y metales pesados de una forma eficiente y de fácil implementación para la pequeña minería.

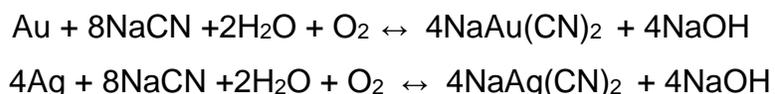
3.2. Marco Teórico

3.2.1. Descripción del proceso de tratamiento y recuperación de oro en la pequeña minería

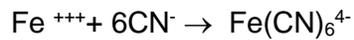
El proceso de recuperación de oro que realiza la pequeña minería en los lugares conocidos como entables, tiene como objeto procesar el mineral que se extrae de las minas para obtener un producto final que es el oro puro o combinado con plata. Para la obtención de éste se utilizan compuestos como mercurio, a través de un proceso que recibe el nombre de amalgamación (no todas las plantas lo realizan ya que se está en un proceso prohibición de uso del mercurio), cianuro de sodio en el proceso conocido como cianuración y zinc en polvo en el proceso de precipitación (Figura 1) (Bruger et al, 2018).

De acuerdo con lo graficado en la Figura 1, en los procesos de trituración y molienda se disminuye el tamaño del mineral para que éste pueda entrar en contacto con los reactivos (cianuro de sodio y mercurio). El mercurio entra en contacto con el mineral en la etapa de molienda formando una amalgama, este fenómeno superficial se da por la mojabilidad preferencial del oro por el mercurio, permitiendo la combinación de dos metales. Las tres amalgamas que se forman con el oro son: AuHg, Au₂Hg y Au₃Hg que pueden contener entre 60 y 70% en oro (Valderrama et al, 2013).

El cianuro de sodio disuelve el oro y la plata y durante este proceso además de disolverse el oro por medio del cianuro, también se disuelven otros elementos como Fe, Pb, Cu y Zn principalmente, es aquí donde se forman las soluciones cianuradas que son ricas en oro pero además en otros metales pesados. En el proceso de cianuración, se realiza la disolución de oro y plata (Acheapong et al, 2010):



Seguida por la disolución de metales contenidos en el mineral por acción de cianuro, comúnmente conocidos como cianicidas (Lovera et al, 2002):



Posteriormente, las soluciones cianuradas pasan al proceso de precipitación con zinc, el cual precipita el oro. El precipitado posteriormente se lleva a fundición para obtener las barras o lingotes de oro.

En el paso a seguir relacionado en la Figura 1, la reacción de precipitación de oro media el uso de zinc (Mpinga et al, 2014):



Finalmente, la solución después de haber pasado por el proceso de precipitación se convierte en una solución pobre de oro pero con altas cantidades de cianuro y metales pesados, esta solución es la que se toma como desecho del proceso y se vierte en fuentes hídricas cercanas.

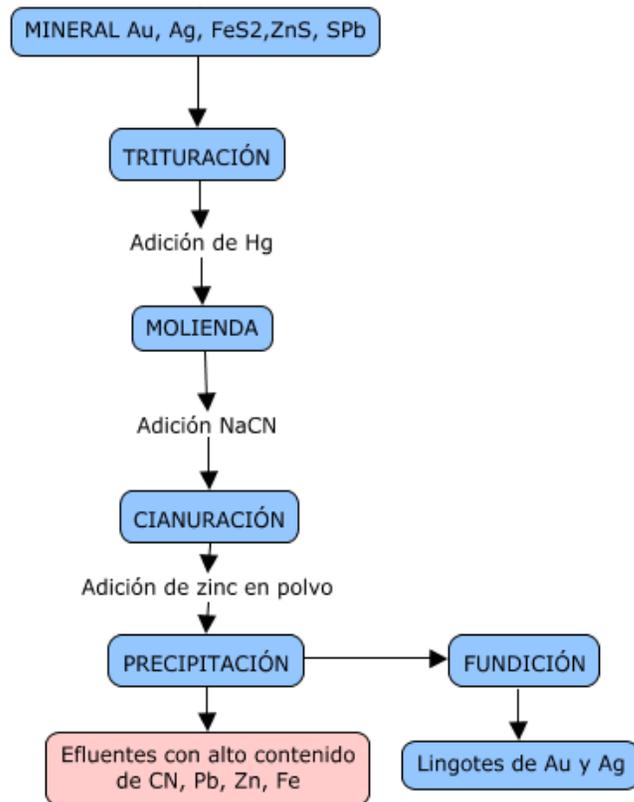


Figura 1. Proceso de recuperación de oro.
Fuente: Autoría propia.

3.2.2. Cianuro y metales pesados en efluentes de minería de oro

Se denomina cianuro al radical químico que se caracteriza por estar formado de un átomo de carbono enlazado a un átomo de nitrógeno mediante un enlace triple ($C\equiv N^-$). El cianuro o compuestos sintéticos de éste, son tóxicos para la mayoría de los organismos. En consecuencia, el empleo industrial de los compuestos de cianuro debe ser controlado, a fin de evitar su descarga en concentraciones que excedan la capacidad de asimilación del medio ambiente (Kuyucak et al, 2013).

Los compuestos de cianuro presentes en la minería de oro y en las soluciones y efluentes de cianuración, comprenden el cianuro libre, sales de cianuro de metales alcalinos y alcalino térreos y complejos de cianuro metálicos formados con oro, mercurio, cadmio, zinc, plata, cobre níquel, hierro y cobalto, estos compuestos se pueden clasificar en 5 categorías diferentes (Tabla 1) (Cáceres, 2001).

Tabla 1. Compuestos que forman el cianuro y metales pesados presentes en soluciones cianuradas.

Clasificación	Compuesto
1. Cianuro Libre	CN ⁻ , HCN
2. Compuestos simples:	
a. sales solubles	NaCN, KCN, Ca(CN) ₂ , Hg(CN) ₂
b. sales insolubles neutras	Zn(CN) ₂ , Cd(CN) ₂ , CuCN, Ni(CN) ₂ , AgCN
3. Complejos débiles	Zn(CN) ₄ ²⁻ , Cd(CN) ₃ ⁻ , Cd(CN) ₄ ²⁻
4. Complejos moderadamente fuertes	Cu(CN) ₂ ⁻ , Cu(CN) ₃ ²⁻ , Ni(CN) ₄ ⁴⁻ , Ag(CN) ₂ ⁻
5. Complejos fuertes	Fe(CN) ₆ ⁴⁻ , Co(CN) ₆ ⁴⁻ , Au(CN) ₂ ⁻ , Fe(CN) ₆ ³⁻

Fuente: Cáceres, (2001).

Los metales pesados son elementos químicos con alta densidad (mayor 4 g/cm³), número atómico por encima de 20 y son tóxicos en concentraciones bajas. Algunos de estos elementos son: aluminio (Al), bario (Ba), berilio (Be), cobalto (Co), cobre (Cu) estaño (Sn), hierro (Fe), manganeso (Mn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cromo (Cr), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plata (Ag), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (Va), oro (Au) y zinc (Zn). Es importante considerar que los seres vivos requieren pequeñas cantidades de estos metales, por ejemplo cobre, zinc y hierro, para varias funciones biológicas. Sin embargo, una escasa o excesiva concentración de éstos puede alterar procesos bioquímicos y/o fisiológicos en el organismo y lo que realmente hace tóxico a los metales pesados no son solo sus características químicas, sino las concentraciones en las que puede presentarse y más importante aún el tipo de compuesto o metabolito que forman. Además, las interacciones entre los metales y sus efectos tóxicos pueden complicar las enfermedades. Los metales pesados no pueden ser biodegradados o destruidos, por lo tanto se bioacumulan y se biomagnifican, algunos forman complejos solubles y son transportados y distribuidos en los ecosistemas hasta incorporarse en la cadena trófica (suelo, agua, plantas, etc.), primordialmente aquellos procedentes de áreas contaminadas. (Londoño et al., 2016).

3.2.3. Toxicología del cianuro y metales pesados

- **Cianuro:** La exposición a cantidades pequeñas de cianuro puede ser fatal, la gravedad de los efectos depende en parte de la forma de cianuro ya sea cianuro de hidrógeno

gaseoso o sales de cianuro. La exposición a niveles altos de cianuro durante un periodo breve daña el cerebro y el corazón y puede producir coma o la muerte. El cianuro produce efectos tóxicos a niveles iguales o mayores a 0,05 miligramos de cianuro por decilitro de sangre; casos fatales han ocurrido a niveles iguales o mayores a 0,3 mg/dL. Las personas que ingieran pequeñas cantidades de cianuro en un tiempo breve pueden morir, a menos que reciban un tratamiento médico rápidamente. Los primeros indicios de intoxicación con cianuro son respiración rápida y profunda y falta de aliento, seguido de convulsiones y pérdida de conocimiento. Estos síntomas pueden manifestarse rápidamente dependiendo de la cantidad de cianuro ingerida (ATSDR, 2006).

- **Metales pesados:** Se considera que los metales son perjudiciales para la salud, sin embargo, muchos de éstos son esenciales en la dieta. En algunos casos su deficiencia o exceso puede conducir a problemas, por ejemplo el organismo requiere de cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio y zinc, pero un consumo en exceso de éstos puede presentar problemas de salud. Otros metales en cambio no cumplen una función fisiológica conocida, alteran la salud y es mejor evitarlos (Londoño et al., 2016). En los efluentes de proceso de beneficio de oro, los principales metales pesados encontrados son: plomo, zinc, hierro, plata y mercurio; aunque está prohibida la utilización de mercurio, en algunos casos se encuentra la presencia de este metal. A continuación se describen las características más importantes y la toxicidad de cada metal estudiado en este trabajo.
 - **Plomo:** La absorción de plomo es un grave riesgo de salud pública; provoca retraso del desarrollo mental e intelectual de los niños, causa hipertensión y enfermedades cardiovasculares en adultos. La intoxicación se debe a la ingestión accidental de compuestos de plomo o a la ingestión por parte de los animales de forrajes o alimentos con plomo, procedentes de áreas ambientalmente contaminadas. El plomo absorbido se distribuye en el riñón, hígado, encéfalo y huesos por su semejanza con el calcio, inhibe la síntesis de la hemoglobina y causa daño neurológico. Los efectos agudos en el sistema nervioso central consisten en parestesia, dolor y debilidad muscular, anemia grave y albuminuria. Aunque la intoxicación aguda puede causar la muerte, es más frecuente que el paciente se recupere y presente intoxicación crónica con daño gastrointestinal, neuromuscular, nervioso, hematológico, renal y

reproductivo. El plomo y sus compuestos están clasificados en el grupo 2B, probablemente cancerígenos para el hombre (Londoño et al., 2016).

- **Zinc:** Es un elemento esencial, componente de las metaloenzimas que participan en el metabolismo de los ácidos nucleicos y en la síntesis de las proteínas (Gunnar1998). La exposición al Zn ocurre cuando se ingieren cantidades de este elemento presentes en alimentos o al tomar agua contaminada. Aunque el Zn es un elemento esencial en la dieta, la baja ingestión de este metal puede causar problemas de salud, pero demasiado Zn también es perjudicial. La ingestión de grandes cantidades, puede causar calambres estomacales, náusea y vómito. Si se administran grandes cantidades durante un período más prolongado puede ocurrir anemia y disminución de los niveles del tipo de colesterol que es beneficioso. No se sabe si los niveles altos de Zn afectan la reproducción en seres humanos, pero la administración de grandes cantidades en ratas las hizo estériles (ASTSDR, 2005).
- **Hierro:** La toxicidad se debe al hierro elemental ingerido, que se absorbe en estado ferroso (Fe ++), posteriormente se oxida (Fe +++) y se une a la ferritina, el cual se transporta por la globulina transferrina (Mencias et al., 2000). Las manifestaciones clínicas se desarrollan en cuatro fases: (i) de 30 minutos a 2h postingesta, aparecen síntomas intestinales por el efecto irritante-corrosivo: náuseas, vómito, diarreas, dolor abdominal. En casos graves existe alteración de los sistemas nervioso central (letargo y coma) y cardiovascular (palidez, taquicardia, hipotensión); (ii) de 6 - 24h postingesta, el paciente mejora pero pueden presentarse periodos de letargo; (iii) de 12-24h postingesta aparece un cuadro sistémico grave: recurrencia de los síntomas gastrointestinales, letargo, coma, convulsiones; (iv) de 2-6 semanas: cicatrización gástrica, estenosis pilórica, fibrosis hepática (Mencias et al., 2000).

3.2.4. Valores permisibles para cianuro y metales pesados en efluentes de minería

Los valores permisibles para descargas de efluentes líquidos procedentes de procesos de minería, basados en la resolución No. 0631 de 17 de marzo de 2015 del

Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, se encuentran entre 0,50 y 3 mg/L dependiendo del metal (Tabla 2).

Tabla 2. Valores permisibles para descargas mineras.

Parámetro		Concentración (mg/L)
Ión	Cianuro (CN ⁻)	1,00
Metal	Plomo (Pb)	0,20
	Zinc (Zn)	3,00
	Hierro (Fe)	2,00

Adaptado de Resolución No. 0631 de 2005.

3.2.5. Remoción de cianuros y metales pesados en efluentes líquidos, provenientes del proceso de cianuración

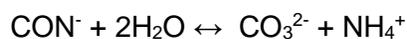
3.2.5.1. Degradación de cianuro y precipitación de metales pesados con peróxido de hidrógeno

La degradación de cianuro con peróxido de hidrógeno tiene como objeto transformar éste en sustancias menos tóxicas y más inestables, como son los cianatos que en presencia de agua se convierten en carbonatos y nitratos, como se puede observar en las siguientes reacciones (Griffiths et al, 1987):

El ion cianuro se oxida a cianato:

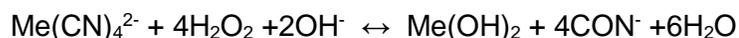


El cianato formado se hidroliza para formar carbonato de amonio:

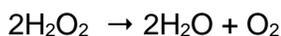


Además de la capacidad que tiene de degradar cianuro, el peróxido de hidrógeno, también puede precipitar metales que se encuentran asociados a complejos débiles en forma de hidróxidos como es el caso de los complejos débiles de: Fe, Hg, Zn, Cu.

En la siguiente reacción se presenta una forma generalizada para la precipitación de metales pesados con peróxido de hidrógeno, teniendo en cuenta que Me corresponde al metal a precipitar.



Una de las razones de la gran acogida del peróxido de hidrógeno es que el exceso, se descompone para dar agua y oxígeno.



3.2.5.2. *Adsorción de metales con carbón activado*

El carbón activado es una denominación que se aplica a toda una serie de productos derivados de materiales carbonosos; es un material amorfo que presenta un área superficial excepcionalmente alta y se caracteriza por tener una alta proporción de microporos (poros menores de 2 nanómetros). Estas características le confieren propiedades adsorbentes excepcionales que pueden ser aprovechadas en diferentes aplicaciones, como es el caso del tratamiento de aguas residuales y la purificación de agua para el consumo humano (Giraldo 2008).

La eliminación de iones de metales pesados tóxicos de aguas residuales ha recibido en los últimos años una mayor atención debido a la necesidad de disminuir la contaminación en los diferentes sectores de la industria por presencia de metales pesados en sus desechos, ya que la aplicación de técnicas tradicionales de tratamiento conllevan a altos costos y continuo uso de productos químicos, por lo tanto el interés radica más en lo eficaz, económico y ecológico (Tiwari, 2007).

La adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material. En química la adsorción de una sustancia, se da por su acumulación en una determinada superficie. El resultado es la formación de una película líquida o gaseosa en la superficie de un cuerpo sólido o líquido (Giraldo, 2008).

4. Materiales y métodos

4.1. Ubicación del experimento y toma de muestras

El estudio se realizó en la planta La Cristalina ubicada en el municipio de Segovia (Antioquia) perteneciente a la sociedad minera el Manzanillo. Como las descargas no son continuas en la planta y sólo se realizan una vez el proceso haya finalizado, se tomó una muestra compuesta de los efluentes residuales líquidos. El muestreo se realizó durante el tiempo de descarga del tanque (2 horas 30 minutos) a intervalos de 15 minutos tomando 10 muestras de 8 litros cada una; la muestra total para la realización de las pruebas fue el compuesto de las muestras tomadas.

Los ensayos experimentales se realizaron en el laboratorio de la Planta La Cristalina, al igual que los análisis de cianuro (análisis volumétrico Ref. SM 4500-CN); los análisis de las variables de respuesta para plomo, zinc y hierro se llevaron a cabo en el Laboratorio CIMEX (Centro de Investigación en Metalurgia Extractiva) de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín a través del método de adsorción atómica (llama aire acetileno Ref SM 3111 B).

4.2. Eficiencia del proceso de adsorción con carbón activado en la remoción de cianuro y de los metales pesados Pb, Zn y Fe

En un recipiente plástico se adicionaron 7 litros de la muestra compuesta, proveniente del efluente en estudio. La muestra se puso en contacto con carbón activado (el análisis de calidad de carbón y la ficha técnica se presentan en el anexo 1) y se homogenizó, mediante agitación a 140 RPM en un agitador como se muestra en la figura 2. Con el fin de analizar el efecto de la cantidad de carbón por litro del efluente, se evaluaron tres dosis de carbón (20, 40 y 60 g/L), tomando 40 g de carbón /L de solución a tratar como valor medio, basado en pruebas similares realizadas para el metal Plomo (Pb) (Mendoza, 2012). Igualmente se evaluó el efecto del tiempo en el porcentaje de remoción de los elementos a analizar. Se determinaron las concentraciones de cada elemento en tres tiempos diferentes de adsorción (4, 8, 12 horas), tomando el tiempo de 12 horas como referencia, debido a que es el tiempo en el cual la cantidad de elementos adsorbidos por el carbón ya se han estabilizado y no presentan cambios significativos; este tiempo está basado en pruebas

similares de adsorción de Pb (Mendoza, 2012). Los ensayos se realizaron por duplicado (Tabla 3). En la definición de la línea base de la muestra inicial a tratar, se tomaron 3 muestras compuestas para análisis. Para cada prueba se montó un blanco, el cual se puso en agitación para analizar la variación de las concentraciones de los componentes durante el tiempo sin presencia de carbón activado. En el presente ensayo se analizaron las variables concentración de cianuro, plomo, zinc y hierro (método, cálculos, curvas de calibración y datos de análisis de cianuro y metales pesados se presentan en anexo 3 y 4).



Figura 2. Tanques con agitación, en los cuales se realizaron las pruebas experimentales de adsorción con carbón activado.

Para determinar la eficiencia de adsorción de los diferentes metales, con carbón activado, se utilizó la siguiente ecuación:

$$E_R = 100 * (C_o - C) / C_o$$

Donde C_o es la concentración inicial del elemento (CN, Pb, Zn y Fe) y C es la concentración en un tiempo (t). El cálculo se realizó de forma independiente para cada metal.

Tabla 3. Tratamientos a evaluar en la determinación de la eficiencia de la adsorción con carbón activado en la remoción de cianuro y metales pesados.

Tratamiento	Concentración carbón activado (g/L)	Tiempo de adsorción (h)
1	20	4
2	40	4
3	60	4
4	20	8
5	40	8
6	60	8
7	20	12
8	40	12
9	60	12
10	Blanco	4
11	Blanco	8
12	Blanco	12

4.3. Valoración de la eficiencia del proceso de degradación de cianuro y precipitación de metales pesados (Pb, Zn y Fe) utilizando peróxido de hidrógeno, sobre el afluente previamente tratado con carbón activado

A partir de la muestra tratada en el paso anterior, se tomó 1 litro en un recipiente plástico, para analizar la influencia del peróxido en el efluente. Se evaluaron tres cantidades diferentes de peróxido de hidrógeno (1, 1,5 y 2 L de peróxido/Kg de CN en la de solución) basados en pruebas experimentales realizadas para la degradación de cianuro (Estrada, 2001). Las muestras se llevaron a agitación mecánica durante 4 horas (figura 3), tiempo durante el cual el peróxido de hidrógeno reacciona para degradar y precipitar los metales pesados (ficha técnica peróxido de hidrógeno se presenta en el anexo 2.); transcurrido este tiempo el cianuro se descompone en agua y oxígeno (Meza, 1999). Durante las pruebas se midió cada hora el pH para evaluar su variación y al final de la prueba se tomaron las muestras para el análisis de la concentración de CN y la determinación de metales, estos

resultados permitieron evaluar el proceso de degradación de cianuro y precipitación de metales pesados. Los ensayos se realizaron por duplicado (Tabla 4).



Figura 3. Pruebas experimentales con adición de peróxido de hidrógeno.

Tabla 4. Tratamientos a evaluar en la determinación de la eficiencia de la adsorción con peróxido de hidrógeno en la remoción de cianuro y metales pesados.

Tratamiento	L H ₂ O ₂ / Kg de CN en la solución	Tiempo de reacción(h)
13	1	4
14	1,5	4
15	2	4
16	Blanco	4

4.4. Análisis estadístico de la información

Se realizó análisis de varianza mediante el programa R studio V. 3.5.2, paquete agricolae versión 1.2-8, para determinar la ocurrencia de diferencias significativas entre tratamientos para el conjunto de variables evaluadas.

El paquete agricolae ofrece una amplia funcionalidad en el diseño de experimentos, especialmente en experimento agrícola para la mejora de plantas, el cual también puede ser utilizado para otros fines. Contiene las siguientes opciones: latice, alfa, diseño de bloques incompletos balanceados, cíclicos, bloques completos al azar, cuadrado latino, greco latino, diseño de bloques aumentados, parcelas divididas, bloques divididos. También cuenta con varios procedimientos de análisis experimentales, tales como las comparaciones de tratamientos de Waller-Duncan, Bonferroni, Duncan, Student-Newman-Keuls, Ryan-Einot-Gabriel-Welsch (REGW) Scheffe, o la diferencia mínima de significación (DLS) clásico de Tukey; así también las comparaciones no paramétricas como: Kruskal-Wallis, Friedman, Durbin, Waerden y la prueba de la mediana; análisis de estabilidad y otros procedimientos aplicados a la genética, así como los procedimientos de la biodiversidad y la estadística descriptiva (Mendiburu, F., 2017)

4.5. Diseño de una propuesta metodológica para la remoción de cianuro y metales pesados en afluentes líquidos.

Una vez analizados los resultados se procedió a diseñar una propuesta metodológica, basada en los mejores resultados obtenidos en las pruebas. Esta propuesta relaciona la implementación de estas técnicas de una forma simple, con adaptación a las condiciones de la pequeña minería. La propuesta consta de un diagrama de flujo del proceso con los equipos para la implementación de esta y de una ficha técnica con las cantidades adecuadas de reactivos para diferentes cantidades de efluentes a tratar y los costos de tratamiento.

5. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en la evaluación de los objetivos 1 y 2, se analizaron mediante estadística no paramétrica, con el modelo de Krustal Wallis con el programa R studio V. 3.5.2, paquete agricolae versión 1.2-8, debido a que los datos no presentaron normalidad en su distribución, en el análisis inicial. En la presentación de los resultados se empleó un código asignado a cada tratamiento, estructurado con base en la siguiente información: número del tratamiento_concentración de reactivo (carbón activado – peróxido de hidrógeno)_tiempo de tratamiento. Los códigos definidos se relacionan en la tabla 5.

Tabla 5. Código asignado a los tratamientos para el análisis estadístico.

Tratamiento	Código
1	1_20_4
2	2_40_4
3	3_60_4
4	4_20_8
5	5_40_8
6	6_60_8
7	7_20_12
8	8_40_12
9	9_60_12
10	10_0_4
11	11_0_8
12	12_0_12
13	13_1_4
14	14_1,5_4
15	15_2_4
16	16_0_4

5.1. Eficiencia del proceso de adsorción con carbón activado en la remoción de cianuro y de los metales pesados Pb, Zn y Fe.

Los resultados obtenidos para la adsorción de metales y cianuro con carbón activado se aprecian en la tabla 6. En términos generales se observó que a medida que aumentó la cantidad de carbón, se incrementó la eficiencia de adsorción de los diferentes

elementos. El pH en la solución no presentó variación por acción de la adsorción de los elementos en el carbón activado. Los mayores porcentajes de adsorción se presentaron con 60 gramos de carbón activado/ L de solución. En cuanto a los tiempos de adsorción, se observaron diferentes comportamientos para cada elemento, siendo el plomo adsorbido completamente a las 4 horas con 60 g de carbón / L de solución. El zinc a las 4 horas con 60 g de carbón/ L de solución se estabilizó y no se observaron cambios notorios a las 8 y 12 horas, lo cual se corroboró mediante análisis estadístico. Sin embargo, para el cianuro y el hierro, se observaron cambios importantes a medida que iba incrementando el tiempo de adsorción logrando obtener sus mayores porcentajes de eficiencia con 60 g de carbón/ L y 12 horas de tratamiento.

Tabla 6. Concentraciones de las variables de respuesta, posterior al tratamiento de adsorción con carbón activado.

Tto	Carbón activado (g/L)	Tiempo de adsorción (h)	CN (mg/L)	Eficiencia Adsorción CN %	Zn (mg/L)	Eficiencia Adsorción Zn %	Pb (mg/L)	Eficiencia Adsorción Pb %	Fe(g/L)	Eficiencia Adsorción Fe %	pH
Muestra inicial	0	0	1673,5	0,00	261,20	0,00	0,840	0,00	2,41	0,00	12
T 1	20	4	1475,0	11,86	242,30	7,24	0,150	82,29	2,26	6,30	12
T 2	40	4	1429,5	14,58	208,53	20,17	0,002	99,82	2,22	7,63	12
T 3	60	4	1316,0	21,36	194,43	25,56	0,000	100,00	2,16	10,12	12
T 4	20	8	1429,5	14,58	237,73	8,99	0,000	100,00	2,22	7,57	12
T 5	40	8	1373,0	17,96	212,45	18,66	0,000	100,00	2,08	13,49	12
T 6	60	8	1270,5	24,08	197,93	24,22	0,000	100,00	2,02	16,11	12
T 7	20	12	1316,0	21,36	234,88	10,08	0,000	100,00	2,13	11,54	12
T 8	40	12	1202,5	28,14	219,34	16,03	0,000	100,00	2,08	13,74	12
T 9	60	12	1055,0	36,96	195,85	25,02	0,000	100,00	1,58	34,52	12
T 10	Blanco	4	1657,0	0,99	254,75	2,47	0,810	2,52	2,15	10,79	12
T 11	Blanco	8	1634,0	2,36	253,80	2,83	0,790	4,88	2,12	11,87	12
T 12	Blanco	12	1611,0	3,73	252,85	3,20	0,770	7,36	2,11	12,37	12

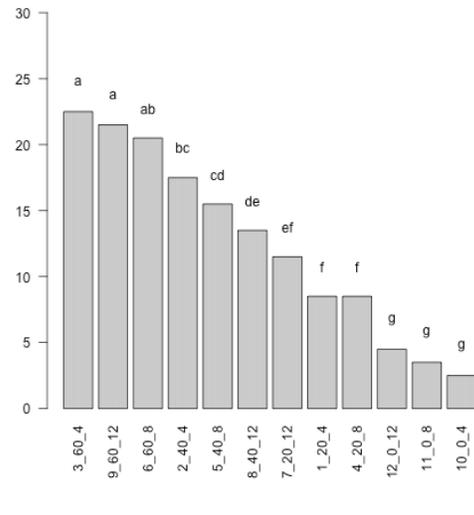
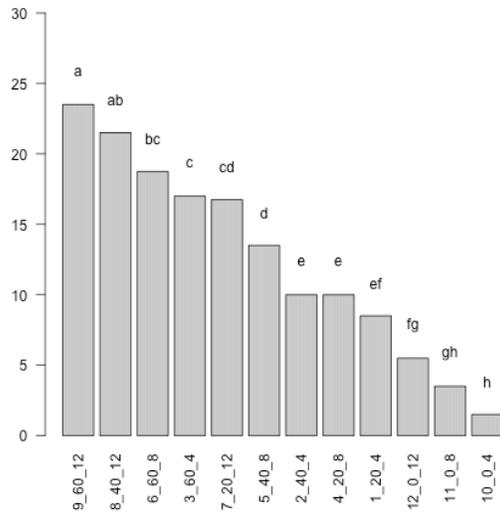
En el porcentaje de adsorción de cianuro, empleando carbón activado los mejores tratamientos fueron el 8 y 9, los cuales no tienen diferencias estadísticas significativas entre ellos (figura 4 a). La mayor eficiencia de adsorción de cianuro se obtuvo con el tratamiento 9 (36,96%), en el cual se empleó una concentración de 60 g de carbón activado/L de solución durante un tiempo de 12 horas, seguido por el tratamiento 8 (28,14%) en el cual se utilizaron 40 g de carbón activado en el mismo tiempo de duración de la reacción (12 h).

Se aprecia con los resultados anteriores que a mayor concentración de carbón activado se obtiene mayor porcentaje de remoción de cianuro. También se observaron diferencias estadísticas significativas de los tratamientos 8 y 9 con los blancos (tratamientos 10, 11 y 12), confirmando la adsorción de cianuro con carbón activado al éste ser adicionado en la solución.

En la figura 4b no se aprecian diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos 3, 9 y 6 con relación a la eficiencia de adsorción de zinc. En estos tratamientos se utilizó la misma cantidad de carbón activado (60 g), a diferentes tiempos de contacto (4, 12 y 8 horas respectivamente), apreciándose que un tiempo superior a 4 h, no tuvo efectos significativos en los cambios de la eficiencia. Igualmente, se observó la diferencia estadística existente entre los tratamientos 3, 9 y los blancos, mostrando el efecto de adsorción a medida que se incrementa la cantidad de carbón adicionada en la solución.

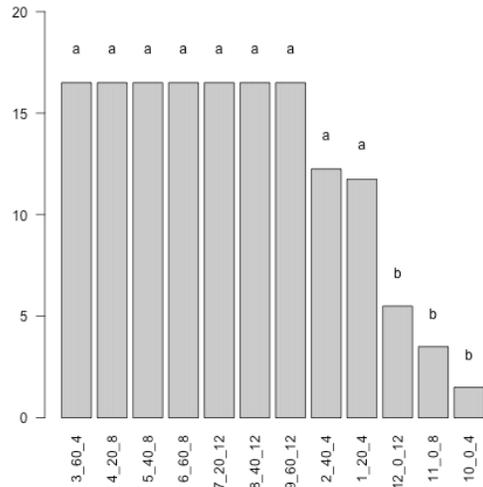
No se apreciaron diferencias estadísticas significativas en los tratamientos del 1 al 9, en la adsorción de plomo con carbón activado, en comparación con los tratamientos 10, 11 y 12 (blancos) (figura 4 c). Del tratamiento 3 al 9, se obtuvo una remoción de plomo del 100%, demostrando el efecto de adsorción del carbón activado sobre el plomo, con relación a los tratamientos testigo, con los cuales se apreciaron diferencias estadísticas significativas con un máximo de adsorción del 7%.

En la figura 4d se observa que la mayor remoción de hierro se dio en el tratamiento 9 (34,52%) con 60 gramos de carbón por litro de solución y 12 horas de contacto. Este tratamiento presentó diferencias estadísticas significativas con los tratamientos 1, 2, 3 y 10, en los cuales se emplearon diferentes cantidades de carbón, con el mismo tiempo de contacto (4 horas). Lo anterior indica que en la eficiencia de adsorción de hierro, no existe una influencia de la concentración del carbón activado, sino del tiempo de contacto con el efluente a tratar.

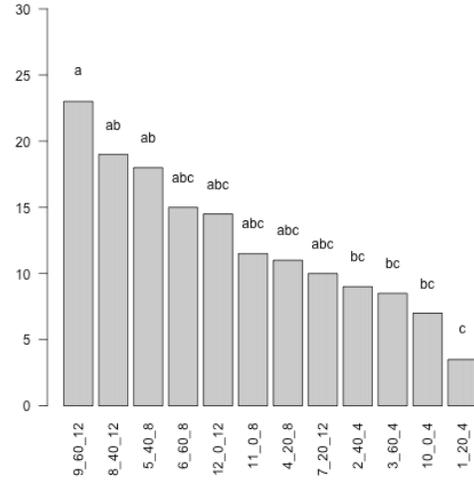


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 4. Eficiencia de adsorción mediante tratamiento con carbón activado. a) Eficiencia de adsorción para cianuro. b) Eficiencia de adsorción para Zinc. c) Eficiencia de adsorción de plomo. c) Eficiencia de adsorción de hierro.

*Letras iguales no tienen diferencias significativas.

Para seleccionar el mejor tratamiento en la adsorción de los elementos contaminantes (CN, Zn, Pb y Fe), posterior a la aplicación de carbón activado, se consideraron los resultados del análisis estadístico (figura 4). Como criterio de selección se definió elegir el tratamiento que mejor comportamiento tuviera en la adsorción de los elementos contaminantes considerados en el estudio. De acuerdo con lo anterior, se identificó que el tratamiento 9 reunía esta característica, debido a que estadísticamente tuvo

diferencias significativas con los demás tratamientos, perfilándose como el mejor tratamiento en la adsorción de contaminantes.

Los resultados obtenidos, permiten apreciar que los mayores porcentajes de adsorción se presentaron con 60 g de carbón activado por litro de solución, mostrando un comportamiento directamente proporcional entre la concentración de carbón y la eficiencia de adsorción. Al aumentar la cantidad de carbón adicionada en la solución a tratar, aumenta la eficiencia de adsorción de los diferentes elementos contaminantes (Garzón, 2012). Sin embargo, en los tiempos de adsorción se observaron diferentes comportamientos, indicando la necesidad de disponer de un mayor tiempo de contacto (12 h) cuando se emplearon 60 g de carbón/ litro de solución en el caso de cianuro y del hierro y un menor tiempo de contacto para la adsorción de plomo y zinc (4 h), mostrando diferentes comportamientos en las velocidades de adsorción, ya que para que la adsorción se dé, se necesita romper los enlaces entre el soluto y la solución (Marin, 2011), en los resultados se observó mayores velocidades de adsorción en el plomo y zinc, comparadas con el cianuro y el hierro reflejados en los tiempos de adsorción. En la adsorción de plomo se obtuvieron eficiencias de remoción entre 82,29 y 100% en un tiempo de 4 horas, lo cual confirma el poder adsorbente del carbón activado sobre este elemento (Mendoza, 2012).

El pH de la solución no varió durante las pruebas de adsorción, manteniéndose en 12, esto se debe a que el fenómeno de adsorción presentado en las pruebas es de tipo físico indicando que la unión entre el carbón activado y los elementos contaminantes removidos es ocasionado por las fuerzas de Van Der Waals, y no hubo reacción química ni formación de nuevos compuestos, siendo este un proceso reversible (Marin, A., 2011).

5.2. Valoración de la eficiencia del proceso de degradación de cianuro y precipitación de metales pesados (Pb, Zn y Fe) utilizando peróxido de hidrógeno, sobre el afluente previamente tratado con carbón activado.

Los resultados obtenidos en el proceso de degradación de cianuro y precipitación de metales con adición de peróxido de hidrógeno se pueden observar en la tabla 7.

Tabla 7. Concentraciones de las variables de respuesta, posterior al tratamiento con adición de peróxido de hidrógeno.

Tto	L H ₂ O ₂ /Kg CN en solución	Tiempo de reacción (h)	CN(mg/L)	% Eficiencia degradación CN	Zn(mg/L)	% Eficiencia precipitación Zn	Pb(mg/L)	% Eficiencia precipitación Pb	Fe(mg/L)	% Eficiencia precipitación Fe	pH
Muestra Inicial	0	0	1044,00	0,00	190,65	0,00	0,00	0,00	2,34	0,00	12,0
T 13	1,0	4	260,50	75,05	86,45	54,66	0,00	N.A.	0,29	87,84	9,5
T 14	1,5	4	68,10	93,50	4,48	97,65	0,00	N.A.	0,00	100,00	9,5
T 15	2,0	4	0,56	99,95	4,17	97,82	0,00	N.A.	0,00	100,00	9,0
T 16	Blanco	4	1022,00	2,11	185,71	2,60	0,00	N.A.	2,44	3,88	12,0

El efecto de la adición de peróxido de hidrógeno en la degradación del cianuro se muestra en la figura 5a. Se observa que la mejor eficiencia de degradación de cianuro (99,95%) se dio en el tratamiento 15 (2 L de peróxido de hidrogeno/Kg de cianuro en la solución, durante 4 horas), mostrando diferencias estadísticas significativas con los tratamientos 13 y 14 (eficiencias de 75,05 y 93,5%, respectivamente) y con el blanco (tratamiento 16), en el cual se obtuvo una eficiencia de 2,11%. Lo anterior indica el efecto que representa la cantidad de peróxido adicionado a la solución en la degradación de cianuro.

En la remoción de zinc por efecto de la precipitación de peróxido de hidrógeno, se obtuvieron las mejores eficiencias con los tratamientos 14 (97,65%) y 15 (97,82%) (figura 5b). Entre estos dos tratamientos no hay diferencias estadísticas significativas, pero sí de estos con el blanco (tratamiento 16), con una eficiencia de remoción de Zn del 2,6%. Lo anterior muestra el efecto de la cantidad de reactivo adicionado sobre la eficiencia de la remoción de Zinc.

En la figura 5c, se observan los resultados de la remoción de hierro, el cual tuvo un comportamiento similar a la remoción de zinc. Los tratamientos 14 y 15 no presentan diferencias estadísticas significativas entre ellos (remoción de 100%), pero si, con el tratamiento 13 (87,84%) y con el blanco (3,88%). Se mostró una marcada diferencia en la eficiencia al ser adicionado el peróxido, en comparación con los tratamientos en los cuales no se adicionó éste.

Para seleccionar el mejor tratamiento en la etapa de adición de peróxido de hidrógeno se analizaron en conjunto las gráficas presentadas en la figura 5. Se identificó que el tratamiento que cumple con las mejores eficiencias para los tres elementos contaminantes es el 15. Aunque el tratamiento 14 es una buena opción en cuanto a la menor

cantidad de reactivo empleado, que podría disminuir los costos del tratamiento, se apreció que éste funciona con una buena eficiencia para el zinc y el hierro sin diferencias marcadas con relación al tratamiento 15, sin embargo, en el caso de cianuro el tratamiento 14 no es la mejor opción. En el caso del plomo no se realizó el análisis estadístico, ya que éste fue removido completamente en la etapa de carbón activado

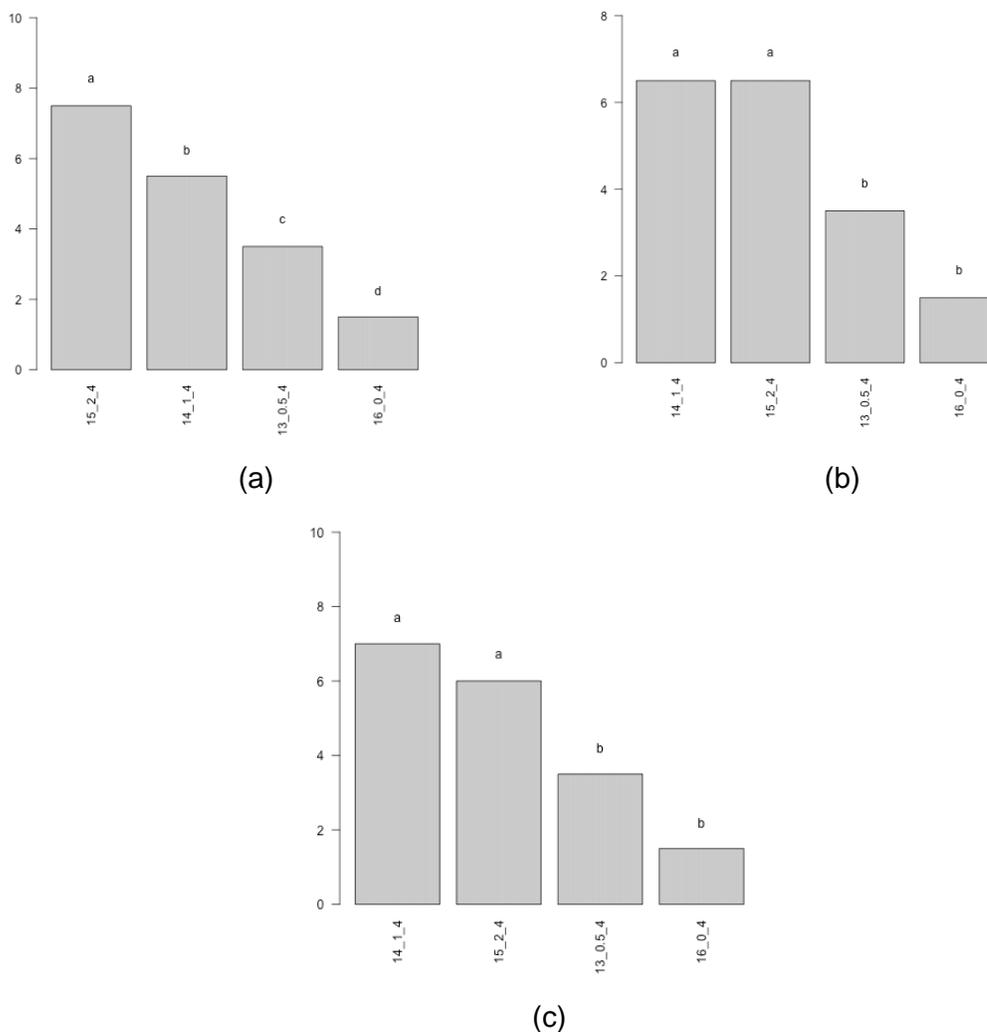


Figura 5. Eficiencia de degradación de cianuro y precipitación de plomo y hierro, mediante adición de peróxido de hidrógeno. a) Eficiencia degradación de cianuro. b) Eficiencia de precipitación de Zinc. c) Eficiencia de precipitación de hierro.

*Letras iguales no tienen diferencias significativas.

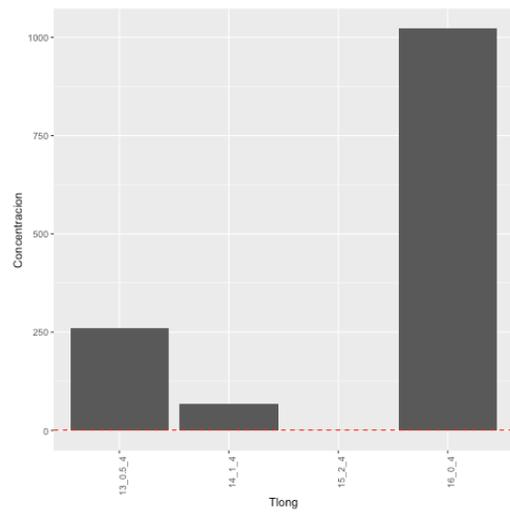
En términos generales se puede observar que a medida que aumenta la cantidad de peróxido de hidrógeno adicionado en la solución, aumenta la eficiencia de degradación de cianuro y la precipitación de metales (Estrada, 2001). En el pH se observó que a medida que aumenta la cantidad de peróxido de hidrógeno, éste disminuye, ya que el peróxido es un agente oxidante y después de 4 horas se descompone en agua y oxígeno. Además

durante el cambio de pH, se da la precipitación de los metales pesados en forma de hidróxidos (Meza, 1999).

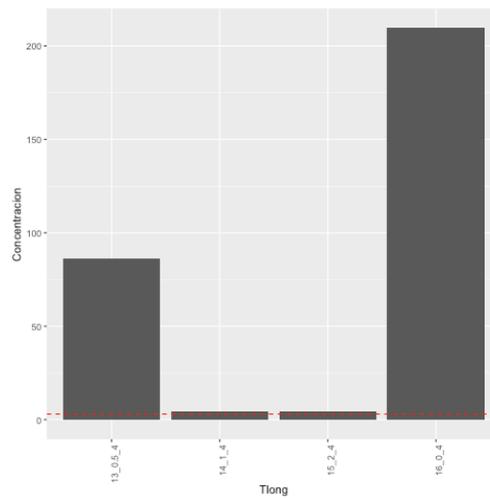
Las diferencias estadísticas observadas en los tratamientos con adición de peróxido de hidrógeno con respecto a los blancos, muestran la tendencia en el incremento de la eficiencia al adicionar el reactivo. Las bajas eficiencias obtenidas en la muestra testigo indican que hay un bajo porcentaje de remoción en estas muestras, que se puede atribuir al efecto del oxígeno adicionado a la solución por efecto de la agitación y la degradación natural o volatilización del cianuro que se puede presentar en la solución (Bruger, 2018). De acuerdo con lo anterior, a los resultados obtenidos se les restaron los valores de los blancos, afín de corregir este efecto evidenciado en los experimentos.

En la figura 6 se puede apreciar con una línea roja, el límite permisible para cada elemento de acuerdo con lo requerido por las autoridades ambientales según la resolución No. 0631 del 17 de marzo de 2015, emitida por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, en contraste con las concentraciones obtenidas en cada tratamiento en la etapa final de tratamiento con peróxido de hidrógeno. Al ser esta etapa la final, es la que determina las concentraciones finales del vertimiento para la descarga. En este sentido, se aprecia que en el tratamiento 15 se obtiene una concentración de 0,56 mg/L para cianuro (figura 6a), cumpliendo con el límite permisible de la norma (1 mg/L). Igualmente el tratamiento 15 presentó una concentración de zinc de 4,165 mg/L, siendo el límite de 3 mg/L, encontrándose muy cerca del límite permisible.

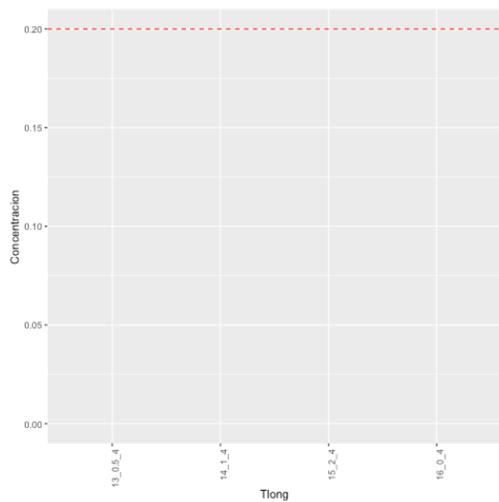
En la figura 6c, se evidencia el cumplimiento del límite permisible en la concentración de plomo (0,2 mg/L), ya que todo el plomo fue removido en la etapa de adsorción con carbón activado. Finalmente, en la figura 6d, se aprecia que tanto para el tratamiento 14 como 15 se cumple con el límite permisible de hierro (2 mg/L), ya que se logra la remoción total llegando a 0 mg/L.



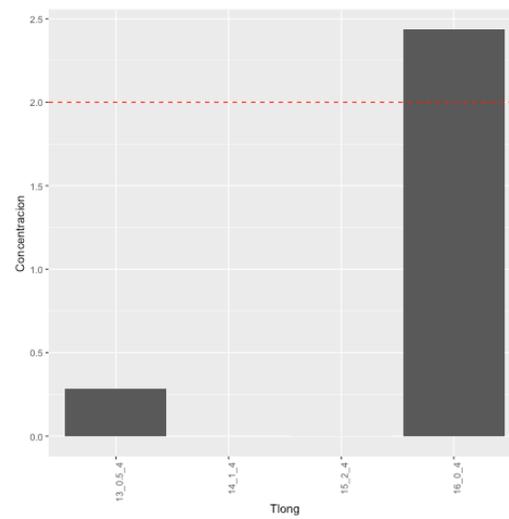
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6. Comparación de concentraciones en la etapa final del tratamiento, con respecto al límite permisible. a) Concentración de cianuro b) Concentración de zinc c) Concentración de plomo d) Concentración de hierro.

5.3. Diseño de una propuesta metodológica para la remoción de cianuro y metales pesados en afluentes líquidos.

La propuesta metodológica planteada, se basó en los mejores resultados obtenidos mediante el análisis estadístico de las pruebas, la viabilidad técnica y operacional y los límites permisibles de los elementos en estudio en descargas.

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la combinación de los dos procesos: adsorción con carbón activado y degradación de cianuro y precipitación de metales pesados con peróxido de hidrógeno (tabla 8). Se puede apreciar la concentración inicial de la muestra sin tratamiento y la concentración final de la muestra después de haber sido tratada con carbón activado y peróxido de hidrógeno, además de sus respectivas eficiencias de remoción. Estos datos se proyectan a partir de la combinación de los tratamientos 9 y 15.

Tabla 8. Porcentajes de remoción de cianuro, plomo, zinc y hierro.

Parámetro	CN	Zn	Pb	Fe
Concentración inicial (mg/L)	1671,67	261,53	0,84	2,41
Concentración final (mg/L)	0,56	4,165	0,00	0,00
% Eficiencia de remoción total	99,97	98,41	100,00	100,00

En la figura 7 se observa el diagrama propuesto, para la implementación de las alternativas de remoción estudiadas en este trabajo. Este diagrama se basa en una metodología de fácil aplicación, equipos accesibles y de fácil manejo para los pequeños mineros.

El efluente líquido que contiene altos contenidos de cianuro y metales pesados, es puesto en contacto con el carbón activado en un tanque y mezclado mediante un agitador (aproximadamente 140 RPM), este proceso se realiza durante un tiempo de 12 horas. Posteriormente la mezcla de solución y carbón es enviada a un segundo tanque, en el cual en la parte superior se instala una malla o tamiz separador para retirar el carbón activado el cual ya ha sido impregnado por los elementos en la primera etapa de adsorción. El líquido libre de carbón es depositado en un segundo tanque agitador en el cual se adiciona peróxido de hidrógeno y se deja en agitación durante 4 horas, en esta segunda etapa se forman unos precipitados blancos conformados por los hidróxidos metálicos, la mezcla de líquido y precipitado es enviada a unos tanques sedimentadores en los cuales se separa el líquido del precipitado. Una vez removidos los hidróxidos metálicos (precipitados) la solución queda tratada con bajos contenidos de cianuro y metales, y puede ser descargada.

Los precipitados removidos de la solución se disponen en los rellenos que las pequeñas plantas tienen destinados para disponer residuos sólidos de mineral.

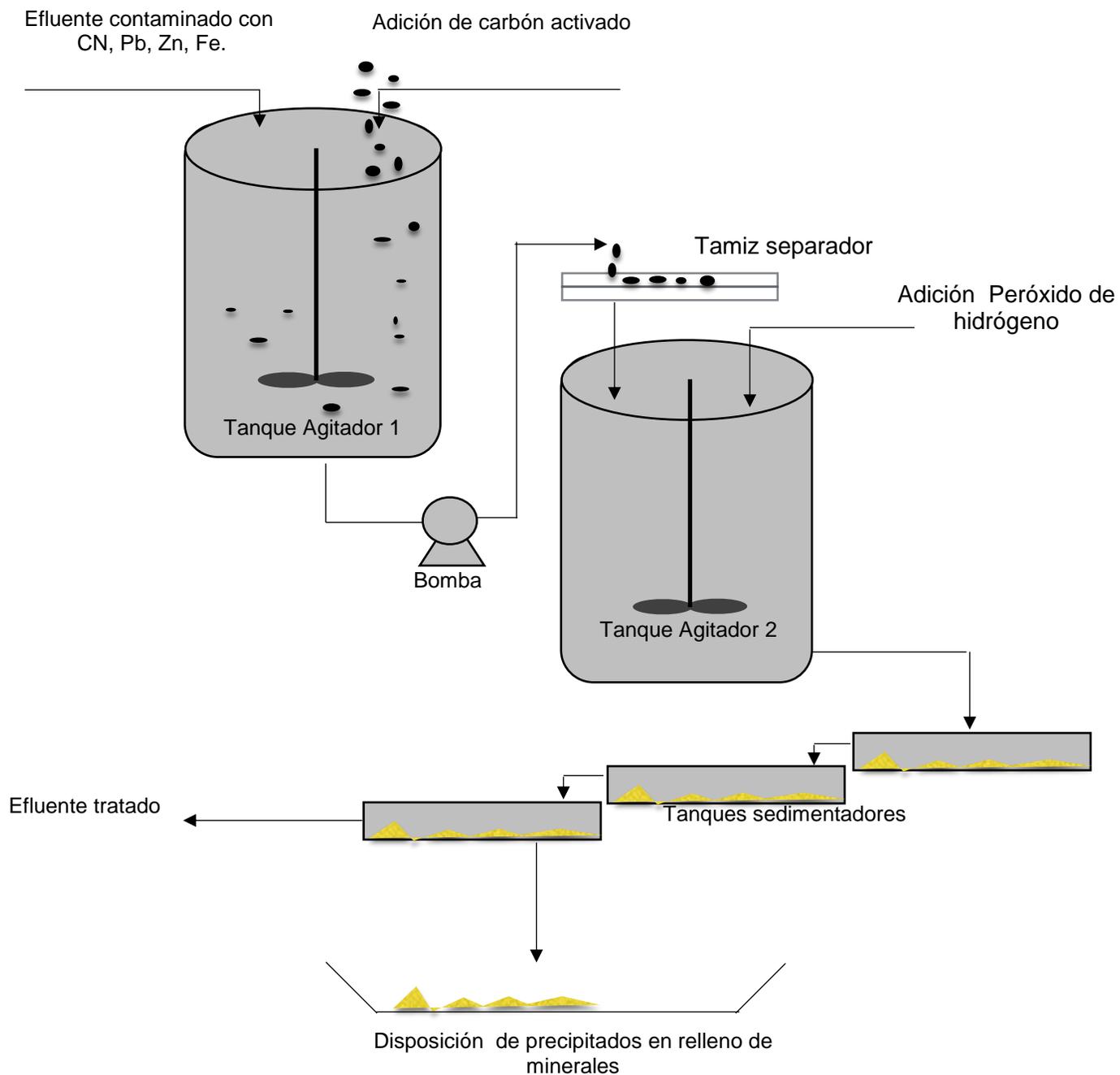


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de remoción de cianuro y metales pesados en efluentes líquidos de la pequeña minería.

Los equipos utilizados para este tratamiento pueden ser adaptados de equipos ya existentes en las plantas de beneficio, como es el caso de los agitadores, los cuales la mayoría de plantas cuentan con estos para realizar el proceso de cianuración, estos agitadores se pueden adaptar para que una vez finalizado el proceso de cianuración y precipitación, se proceda al tratamiento de los efluentes en el mismo equipo, o en caso de no contar con este tipo de tanques se pueden adaptar tanques plásticos con un sistema de agitación, de acuerdo a la cantidad de solución a tratar.

En la tabla 9 se presentan las condiciones operacionales, costo de tratamiento y cantidades de carbón para la etapa de adsorción, dependiendo de la cantidad de solución a tratar.

Tabla 9. Parámetros operacionales para remoción de cianuro y metales pesados mediante adsorción con carbón activado, con el costo de tratamiento.

Tratamiento con Carbón Activado				
Volumen de solución a tratar (L)	Cantidad de carbón activado (Kg)	Tiempo de agitación (h)	Velocidad de agitación (RPM)	Costo (\$_COP)
500	30	12	120 - 140	289.170
1000	60	12	120 - 140	578.340
1500	90	12	120 - 140	867.510
2000	120	12	120 - 140	1.156.680
2500	150	12	120 - 140	1.445.850
3000	180	12	120 - 140	1.735.020
3500	210	12	120 - 140	2.024.190
4000	240	12	120 - 140	2.313.360
4500	270	12	120 - 140	2.602.530
5000	300	12	120 - 140	2.891.700

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para los cálculos de la tabla 9.

Cálculo cantidad de carbón en Kg:

$$C = \frac{R \times V}{1000}$$

Donde,

C = Cantidad de carbón activado Kg

R = Relación de gramos de carbón activado/litro de solución del mejor tratamiento obtenido con el análisis estadístico, tratamiento 9 (60 g/L).

V = Volumen de solución a tratar en litros.

Cálculo costo tratamiento:

$$\text{\$} = P \times C$$

Donde,

\\$_COP = Costo de tratamiento en pesos colombianos

P = Precio Kg carbón activado = \\$9.639

C = Cantidad de carbón activado Kg

En la tabla 10 y 11. Se presentan las condiciones de operación para el proceso de degradación de cianuro y precipitación de metales pesados con peróxido de hidrógeno, estos datos están en función del volumen de solución a tratar y la cantidad de cianuro que contiene la solución, debido a que el peróxido de hidrogeno se comercializa en presentaciones al 35 y 50 %, se realizan las tablas para los dos valores, se toma como parámetro inicial la concentración de cianuro y el volumen a tratar, ya que son dos parámetros de fácil medida, en todas las plantas o entables donde se realiza el proceso de recuperación de oro mediante cianuración, siempre hay reactivos para medir por titulación la cantidad de cianuro en la solución, y es una medida con la que los pequeños mineros están familiarizados.

Tabla 10. Parámetros operacionales para remoción de cianuro y metales pesados mediante adición de peróxido de hidrógeno al 50%

Concentración de Cianuro (mg/L)	Cantidad de Peróxido de hidrógeno (litros de H ₂ O ₂ al 35%) de acuerdo a litros de solución a tratar										Tiempo de Agitación (h)	Velocidad de agitación (RPM)	Costo de tratamiento (\$/m ³)
	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000			
0 - 300	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4	6	4	120 - 140	4.974
301 - 600	1,2	2,4	3,6	4,8	6	7,2	8,4	9,6	10,8	12	4	120 - 140	9.948
601 - 900	1,8	3,6	5,4	7,2	9	10,8	12,6	14,4	16,2	18	4	120 - 140	14.922
901 - 1200	2,4	4,8	7,2	9,6	12	14,4	16,8	19,2	21,6	24	4	120 - 140	19.896
1201 - 1500	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	4	120 - 140	24.870
1501 - 1800	3,6	7,2	10,8	14,4	18	21,6	25,2	28,8	32,4	36	4	120 - 140	29.844
1801 - 2100	4,2	8,4	12,6	16,8	21	25,2	29,4	33,6	37,8	42	4	120 - 140	34.818
2101 - 2400	4,8	9,6	14,4	19,2	24	28,8	33,6	38,4	43,2	48	4	120 - 140	39.792
2401 - 2700	5,4	10,8	16,2	21,6	27	32,4	37,8	43,2	48,6	54	4	120 - 140	44.766
2701 - 3000	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	4	120 - 140	49.740

Tabla 11. Parámetros operacionales para remoción de cianuro y metales pesados mediante la adición de peróxido de hidrógeno al 35%.

Concentración de Cianuro (mg/L)	Cantidad de Peróxido de hidrógeno (litros de H ₂ O ₂ al 35%) de acuerdo a litros de solución a tratar										Tiempo de Agitación (h)	Velocidad de agitación (RPM)	Costo de tratamiento (\$/m ³)
	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000			
0 - 300	0,9	1,7	2,6	3,4	4,3	5,1	6,0	6,9	7,7	8,6	4	120 - 140	6.086
301 - 600	1,7	3,4	5,1	6,9	8,6	10,3	12,0	13,7	15,4	17,1	4	120 - 140	12.171
601 - 900	2,6	5,1	7,7	10,3	12,9	15,4	18,0	20,6	23,1	25,7	4	120 - 140	18.257
901 - 1200	3,4	6,9	10,3	13,7	17,1	20,6	24,0	27,4	30,9	34,3	4	120 - 140	24.343
1201 - 1500	4,3	8,6	12,9	17,1	21,4	25,7	30,0	34,3	38,6	42,9	4	120 - 140	30.429
1501 - 1800	5,1	10,3	15,4	20,6	25,7	30,9	36,0	41,1	46,3	51,4	4	120 - 140	36.514
1801 - 2100	6,0	12,0	18,0	24,0	30,0	36,0	42,0	48,0	54,0	60,0	4	120 - 140	42.600
2101 - 2400	6,9	13,7	20,6	27,4	34,3	41,1	48,0	54,9	61,7	68,6	4	120 - 140	48.686
2401 - 2700	7,7	15,4	23,1	30,9	38,6	46,3	54,0	61,7	69,4	77,1	4	120 - 140	54.771
2701 - 3000	8,6	17,1	25,7	34,3	42,9	51,4	60,0	68,6	77,1	85,7	4	120 - 140	60.857

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para los cálculos de la tablas 10 y 11.

Cálculo de cantidad de Peróxido de hidrógeno:

$$C = \frac{R \times M}{D}$$

Donde,

C = Cantidad de H₂O₂ (litros)

R= Relación de litros de H₂O₂ / Kg de cianuro en la solución. Seleccionada en el mejor tratamiento obtenido mediante el análisis estadístico, tratamiento 15 (2L H₂O₂ / Kg CN)

D = % pureza del peróxido de hidrógeno (35 o 50%)

Cálculo Kilogramos de cianuro en solución:

$$M = \frac{C_{CN} \times V}{1 \times 10^6}$$

Donde,

M = Kilogramos de cianuro en la solución

C_{CN} = Concentración de CN en mg/L

V = Volumen de la solución a tratar en litros

Cálculo costo tratamiento:

$$\text{\$} = P \times C$$

Donde,

\\$ = Costo de tratamiento en pesos

P = Precio en pesos litro de peróxido de hidrógeno

C = Cantidad de Peróxido de hidrógeno en litros requeridos

Precio litro H₂O₂ al 35% = 3550 pesos

Precio litro H₂O₂ al 50% = 4145 pesos

En la tabla 12, se presentan los costos totales de tratamiento por metro cúbico de solución a tratar para diferentes concentraciones de cianuro en la solución.

Tabla 12. Costos totales de tratamiento por m³ de solución a tratar.

Concentración de Cianuro (mg/L)	Costo tratamiento Carbón activado (\$/m³)	Costo tratamiento H₂O₂ (35%) (\$/m³)	Costo Total (\$/m³)
0 - 300	578.340	6.086	584.426
301 - 600	578.340	12.171	590.511
601 - 900	578.340	18.257	596.597
901 - 1200	578.340	24.343	602.683
1201 - 1500	578.340	30.429	608.769
1501 - 1800	578.340	36.514	614.854
1801 - 2100	578.340	42.600	620.940
2101 - 2400	578.340	48.686	627.026
2401 - 2700	578.340	54.771	633.111
2701 - 3000	578.340	60.857	639.197

Se realizó cálculo de costos de tratamiento por metro cúbico de solución a tratar, teniendo en cuenta que en las cantidades de solución de efluente varían de acuerdo a la capacidad de procesamiento que tenga cada entable minero.

Uno de las principales requerimientos que se tuvo en cuenta en la selección de los métodos de tratamiento, fue la fácil implementación y adaptación por parte de los pequeños mineros, por esto sólo se calculan los costos de tratamiento correspondientes a insumos, ya que en la mayoría de plantas cuentan con equipos que se pueden utilizar (tanques, bombas, agotadores etc.) o acondicionar para la implementación de estas metodologías y sólo requieren pequeños ajustes que varían de dependiendo del entable en el cual se implemente.

Los costos requeridos para tratamiento de un metro cubico de efluente varían entre 584.000 y 639.000 pesos colombianos (COP), estos costos en su mayor parte corresponden al costo que genera el tratamiento con carbón activado que representa entre un 90 – 98% del costo total de tratamiento, dependiendo de la concentración de cianuro del efluente a tratar.

Los costos de tratamiento correspondientes a la etapa de peróxido de hidrógeno son muy bajos con respecto al costo total (2-10%).

Si se tiene en cuenta que las plantas de beneficio de oro de la pequeña minería descargan efluentes una vez cada 20 o 30 días, dependiendo de su capacidad y ciclos de

cianuración que realicen, estos costos no son altos comparados con el daño ambiental que ocasiona una solución con estos contenidos de contaminantes.

6. Conclusiones

En el proceso de adsorción con carbón activado se obtuvieron los mejores resultados con 60 g de carbón activado/ litro de solución, confirmando que a medida que aumenta la relación sólido/líquido la cantidad de metal absorbido aumenta (Garzón, 2012) logrando una eficiencia de adsorción de 36,89% para cianuro, de 25,66 % para zinc, 34,52% para hierro y 100% para plomo. Este último resultado confirma la gran eficiencia del carbón activado en la remoción de plomo (Mendoza, 2012). En cuanto al tiempo de adsorción para el cianuro y el hierro fue de 12 horas, mientras que el zinc y el plomo se estabilizaron a las cuatro horas partir de las cuales, los resultados no presentaron cambios significativos.

En el proceso con adición de peróxido de hidrógeno a la muestra previamente tratada con carbón activado, se obtuvieron los mejores resultados en el tratamiento 15 (2 L de H_2O_2 /Kg de CN en solución), logrando una eficiencia de degradación de cianuro de 99,95% y una precipitación de zinc de 97,82% y de hierro del 100%, confirmando la eficiencia del peróxido de hidrógeno en la degradación de cianuro (Estrada, 2001) y la teoría de la capacidad del peróxido de hidrogeno de precipitar metales y de esta forma ser removidos de la solución (Meza, 1999). Para el plomo no se muestran resultados ya que este fue completamente eliminado en la etapa de adsorción con carbón activado y la muestra a tratar con peróxido ya no contenía plomo.

Con la combinación del proceso de adsorción con carbón activado y posterior tratamiento con peróxido de hidrógeno se logró llevar una concentración de cianuro de 1.671 a 0,56 mg/L, zinc de 261,53 a 4,165 mg/L, plomo de 0,84 a 0 mg/L, hierro de 2,41 a 0 mg/L, logrando disminuir de manera significativa las concentraciones hasta límites permisibles para cianuro, plomo, hierro y acercándose al límite permisible la concentración de zinc (Resolución No. 0631 de 2005) (Límites permisibles en descargas de minería: Cianuro: 1 mg/L, Plomo: 0,2 mg/L, Zinc: 3 mg/L, Hierro: 2 mg/L).

Las grandes diferencias estadísticas que se observaron en los tratamientos con adición de carbón activado y peróxido de hidrógeno con respecto a las pruebas sin adición de algún agente descontaminante, solo con agitación (blancos), muestran el efecto en la eficiencia de remoción al implementar las metodologías de tratamiento propuestas, en contraste con las bajas eficiencias obtenidas en los tratamientos testigos, aunque los

valores de estos tratamientos son bajos, muestran el efecto que produce la agitación y por tanto la adición de oxígeno en la solución, fenómeno que ocasiona una de las metodologías conocidas como degradación natural o volatilización del cianuro (Bruger, 2018). Sin embargo, estos procesos naturales son de baja eficiencia requiriendo días y hasta meses para degradar los compuestos, además que en el caso de los metales pesados estos no se degradan, se bioacumulan, confirmando la necesidad de implementar alternativas eficientes en este tipo de efluentes antes de ser descargados en fuentes hídricas y así evitar daños irreversibles en los ecosistemas.

En cuanto a costos de tratamiento, el proceso de adsorción representa la mayor parte del costo total (90-98%), en comparación con el costo del tratamiento con peróxido de hidrógeno 2 -10% del costo total. Aunque en esta investigación no se comparan los dos métodos de tratamiento (carbón activado y peróxido de hidrógeno) como alternativas individuales, sino como métodos complementarios que permiten mediante la combinación consecutiva de estos llegar a límites permisibles, si podemos decir que el peróxido de hidrogeno es una alternativa, además de eficiente muy económica para tratar tanto cianuro como metales pesados.

Los costos requeridos para tratamiento de un metro cubico de efluente varían entre 584.000 y 639.000 pesos colombianos (COP), dependiendo de la concentración de cianuro en la solución a tratar, teniendo en cuenta que las plantas de beneficio de oro de la pequeña minería descargan efluentes una vez cada 20 o 30 días, según su capacidad y ciclos de cianuración y teniendo en cuenta los altos ingresos económicos que reciben por beneficiar el mineral y la obtención de los lingotes de oro, estos costos no son altos comparados con el daño ambiental que ocasiona que una solución con este tipo de contaminantes sea vertida en fuentes hídricas sin previo tratamiento.

7. Recomendaciones

Debido a que las soluciones residuales de los procesos de minería de oro son complejas y presentan además de altos contenidos de cianuro, plomo zinc e hierro, concentraciones de otros metales como cobre, cromo, plata, mercurio, etc., se deben realizar pruebas similares para evaluar la eficiencia de los métodos propuestos en este trabajo en estos otros elementos contaminantes.

Como complemento de esta investigación se pueden buscar alternativas para aprovechar nuevamente los contenidos de metales que fueron removidos de la solución y que quedaron impregnados en el carbón activado y en los lodos removidos del proceso con peróxido de hidrógeno.

Evaluar otras alternativas de materiales como: las zeolitas (Egashira, 2012), carbón activado obtenido de la cáscara de naranja (Garzon, 2012), carbón activado obtenido partir de semillas de guaje (Sun-Kou, 2014) etc., que ya han sido probados para metales pesados en otro tipo de soluciones residuales.

8. Referencias bibliográficas

Acheapong, M., Meulepas, Roel., Lens, P., (2010), Removal of heavy metal and cyanide from gold Mine wastewater. *Journal of chemical technology, Volume 85, Issue 5, page 590-613*. Recuperado: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jctb.2358>.

ATSDR (2005), Agency for toxic substances and disease registry. Cinc CAS #7440-66-6 Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts60.pdf

Bruger, A., Fafilek, G., Restrepo, O., Mendoza, L., (2018), On the volatilisation and decoposition of cyanide contaminations from gold mining. *Science of the total Environment, volume 627, pages 1167-1173*. Recuperado: <https://biblioproxy.umanizales.edu.co:2058/science/article/pii/S0048969718303620>

Cáceres, G., (2001), Impacto ambiental de la minería de oro. *Revista metalúrgica UTO, Vomunen 22, pag. 19-28*. Recuperado: http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2078-55932001000200004&lng=es&nrm=iso

Estrada, C., (2001), *Tratamiento de afluentes de cianuración en las pequeñas plantas de beneficio de oro del Nordeste Antioqueño*, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

Egashira, R., Tanabe, S., Habki, H., (2012), Adsorption of heavy metals in mine wastewater by Mongolian natural zeolite. *Procedia Engineering, volume 42, pages 49-57*. Recuperado: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812027944>.

Garzón, J. A., (2012) *Adsorción de Cr (VI) utilizando carbon activado a partir de cascara de naranja*. Universidad de Cartagena. Colombia.

Gil, Edison., (1999), *Remoción y recuperación de metales pesados de aguas residuales industriales*. Eafit Medellín, Colombia.

Griffiths, H., Knore, S., (1987) *The detoxification of gold- mill tailings with hydrogen peroxide*. South Africa.

Giraldo, I., Garcia, V., Moreno J.C., (2008). Superficial Characterization in gas and liquid phase of actived Carbons. *Revista de Ingeniería*. Universidad de los Andes, Bogotá Colombia.

Kuyucak, N., Akcil, A.,(2013). Cyanide Removal options from effluents in gold mining and metallurgical process. *Minerals Engineering, volume 50, pages 13-29*. Recuperado: <https://biblioproxy.umanizales.edu.co:2058/science/article/pii/S089268751300188X>.

Linarte, R., (2017). ocmal.org, Destrucción de cianuros en afluentes de la industria minera mediante el empleo de reductores químicos. Hidalgo, Mexico. Recuperado de https://www.ocmal.org/wp-content/uploads/2017/03/destruccion_de_cianuro.pdf.

Londoño, L., Londoño, P., Muñoz, F., (2016), Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteconlog, en el sector Agropecuario y agroindustrial Vol 14 No.2 (145-153)*.

Lovera, D., Quiñones, J., Aramburú V., Gagliuffi P., (2002) Proceso de tostación - lixiviación de minerales auríferos con metales cianicidas. *Revista de instituto de investigación de la facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, Volumen 5, número 10, paginas 44-51. Recuperado: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v05_n10/proce_tosta.htm.

Makhlesur, M., Alias, M., (2013), *Removal of Heavy metals ions with acid active carbons derived from oil palm and coconut shells*. Malaysia.

Marin, A., (2011). Estudio de adsorción de Boro con Amberlite IRA 743, Cataluña, España. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12077/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Marsden J., House I. (2006), *The chemistry of gold extraction*, Colorado USA.

Mekuto, L., Ntwampe, S., Akcil, A., (2016), An integrated biological approach for treatment of cyanidation wastewater. *Science of the total Environment, Volume 571, pages 711-720*. Recuperado: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716314851>.

Mendiburu, F., (2017). Tutorial de agricultura (Versión 1.2-8). pag. 1-98. Recuperado: <https://tarwi.lamolina.edu.pe/~fmendiburu/index-filer/download/SPagricolae.pdf>

Mendoza, E., (2012), *Remoción de Pb(II) de soluciones mediante carbon activado : experimentos en lotes*. Universidad Nacional, Colombia

Meza, L., (1999). *El peróxido de hidrógeno : Una alternativa tecnológica y ecológicamente eficiente para la recuperación de metales preciosos*. Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia.

Meza, L., (1994). *Procesos unitarios en hidrometalurgia*. Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia.

Mencías, R., Mayero, L., (2000). *Manual de toxicología básica*. Madrid España.

Michael, M., (2001). [botz.com](http://www.botz.com). London UK. Overview of cyanide treatment methods. Recuperado de: <http://www.botz.com/MEMCyanideTreatment.pdf>.

Mpinga, C., Bradshaw, S., Akdogan, G., Snyder, C., (2014) Evaluación of the Merrill-Crowe process for the simultaneous removal of platinum and gold from cyanide leach solutions. *Revista hidrometalurgia* , Volume 142, pages 36-46. Recuperado: <https://biblioproxy.umanizales.edu.co:2058/science/article/pii/S0304386X13002223>

Morrillo, J., Guevara, J., (2015). *Degradación de cianuro de sodio por pseudomonas sp*. Peru.

Mona, K., Ahmad, K., Hanafy, H., (2014). *Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite*. Levanense American University. Libano.

Mudder, T., Botz, M., Smith, A., (2001), *The chemistry and treatment of cyanidation wastes* Mining Journal Books, London.

Nava, A., Elorza, E., Uribe, A., Perez, R., (2007). Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos. *Revista Metalurgia*, Volumen 43, pag. 20-28. recuperado: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/48/48>.

Nordberg, G. (1998). Metales: propiedades químicas y toxicidad. *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo cap. 63*. Recuperado de: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/63.pdf>.

Restrepo, O., Montoya, C., (2006). *Degradación microbiana de cianuro procedente de las plantas de beneficio de oro mediante una cepa nativa de P. florecen*. Medellin Colombia.

Reyes, E., et al (2006). *Remoción de metales pesados con carbon activado como soporte de biomasa*. Universidad UANL. Mexico.

Sun-Kou, M., Obregon Valencia D., (2014). *Cd²⁺ Pb²⁺ Adsorción de metales pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de guaje*. Per+.

Tiwari, D., Kim, H., Lee, S., (2007). Removal behavior of sericite for Cu(II) and Pb(II) from aqueous solutions: Batch and column studies. *Separaciis and purification technology, volume 57, Issue 1 pag. 11-16*. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586607001360>.

Tu, Y., Han, P., Wei, L., Zhang, X., Yu, B., Qian, P., (2019). Removal of cyanide on pyrite by H₂O₂ oxydation under alkaline conditions. *Journal of enviromental sciences, volume 78, pages 287-292*. Recuperado: <https://biblioproxy.umanizales.edu.co:2058/science/article/pii/S1001074218308039>.

Valderrama, L., Chamorro, J. Olgún, D., Rivera, J., Oyarse, J., (2012) Amalgamación de concentrado de oro obtenido en concentrador KNelson, *Revista de ingeniería UDA, volumen 27, paginas 33-38*. Recuperado: <http://www.revistaingenieria.uda.cl/Publicaciones/270005.pdf>.

Veiga, M., Angeloci, G., Hitch, M., Velasquez, P., (2013). Proccesing Centers in artisanal gold mining. *Journal of Clear Producción, volume 64, pages 535-544*. Recuperado: <https://biblioproxy.umanizales.edu.co:2058/science/article/pii/S0959652613005374>.

Zeng, Y., Li, Z., Wang, X., Gao, X., (2015). The treatment of cyanide from gold mine effluent by a novel five-compartment electrodialysis. *Electrochemical Acta, volume 169, pages 150-158*. Recuperado: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468615008932>.

9. Anexos

Anexo 1. Certificado de calidad y ficha técnica del carbón activado.

	CERTIFICADO DE ANÁLISIS	Código: GT-F-39
	Versión: 03	Fecha: 06/08/2018
		Página: 1 de 1

NIT: 890.922.294-4

CERTIFICADO DE ANÁLISIS Carbon Activado Granular- M8x30

Código: MP10088085
Numero Lote de Protokimica: ODS2018066
Número de lote de Fabricante: 999
Fecha Actualización: ABR/08/2019
F. Vencimiento: FEB/06/2019

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO

Fecha de vencimiento	6 de febrero de 2019	
Número de lote	999	
Parámetros	Método	Resultado de Laboratorio
Número de Yodo (mg I ₂ / g CA)	ASTM D4807 - 94 (04)	804,8
Humedad (%)	ANSI/AWWA B604-12	5,2%
Densidad aparente	Sulfoquímica S.A	0,50
Resistencia a la abrasión, %	ASTM D5159 - 04(09)	81,0%
Dureza	ASTM D3802 - 10	90
Granulometría, JS standard	ASTM D2862 - 10	8X30

Nota: Los resultados reportados en el presente certificado son tomados de la información suministrada por nuestro proveedor, por lo tanto, se fundamentan en sus técnicas de análisis. Esta información no exime al comprador de realizar sus propios análisis

Productos Químicos al por Mayor y al Detall – Artículos para Laboratorio y Reactivos
 Implementos de Protección Personal – Fragancias y Sabores – Productos para el Aseo y Limpieza
 Dirección: Cra. 52 No 6 Sur | Medellín – Colombia PBX: (+57) (4) 444-8787
 E-mail: serviciocliente@protokimica.com Web: www.protokimica.com

Continuación anexo 1. Certificado de calidad y ficha técnica del carbón activado.

	FICHA TÉCNICA	Código: GT-F-40
	Versión: 02	Fecha: 27/09/2014
Número de Revisión: 001 Declaración de Fecha de Revisión: 21/10/2014		Página: 1 de 1
TITULO: CARBÓN ACTIVADO GRANULAR		

1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Nombre químico: Carbón Activado.

Fórmula Química o Componentes: C

CAS: 7440-44-0

UN: N.A.

Calidad: Técnica.

Descripción: El Carbón activado granular es de origen vegetal, producido a partir de maderas de reforestaciones y activado con vapor de agua. Estas condiciones lo convierten en un producto con gran variedad de meso y macroporos, especiales para la absorción de materia orgánica.

Vencimiento: 10 Años.

2. APLICACIONES GENERALES

Purificación, decoloración, separación y desodorización. Utilizado en grandes volúmenes de agua en sistemas de abastecimiento público e industriales. También es utilizado en metalurgia, electroquímica, química y petroquímica, farmacéutica, catalizadores, descontaminantes, medicina.

3. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Sustancias incompatibles: Ácidos fuertes, bases fuertes y agentes oxidantes fuertes.

Parámetro	Unidad	Especificación
Índice de yodo	mg I ₂ /gCA	800 Mín.
Humedad	%	8,0 Máx.
Densidad aparente	g/mL	0,25 Mín.
Pasante malla 10	%	15 Máx.

4. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y PRECAUCIONES

Condiciones de almacenamiento: Consérvese únicamente en el recipiente de origen, en lugar fresco y bien ventilado. Mantenga el envase cerrado cuando no lo esté usando. Almacénesse lejos de Bases fuertes. Ácidos fuertes. Fuentes de ignición. Luz directa del sol.

Precauciones: No es un producto peligroso, sin embargo, cuando se encuentra pulverizado, debe utilizarse protección respiratoria y para los ojos, además se recomienda el uso de guantes.

Nota: El uso final del producto es responsabilidad directa del cliente, la información consignada en este documento es sólo de carácter ilustrativo y fue tomada de distintas fuentes bibliográficas por nuestro departamento técnico. Estos datos no representan responsabilidad legal alguna y no eximen al comprador de hacer sus propios análisis e investigaciones.

Materias Primas - Productos para Aseo y Desinfección - Distribución - Implementos de Protección Personal - Fragancias Puras, Fijadores y Sabores- Accesorios y Equipos
 - Artículos para Laboratorio y Reactivos - Servicio de Maquila y Desarrollo de Productos
 VENTAS INSTITUCIONALES - PLANTA - OFICINA: Cra. 52 N° 5 Sur 35 PBX. (4) 444 87 87 - PUNTOS DE VENTA: CENTRO: Cra. 56B N° 49-58 OPCIÓN 3.
 - CRISTO REY: Cra. 52 N° 25 Sur-67 OPCIÓN 4. - BELÉN: Cl. 30 N° 74-24 OPCIÓN 5. - GUAYABAL: Cra. 52 N° 6 Sur 35 OPCIÓN 6.
 E-mail: protokimica@une.net.co Web: www.protokimica.com
 Medellín - Colombia

Anexo 2. Ficha técnica peróxido de hidrógeno al 35% y 50%

	FICHA TÉCNICA	Código: GT-F-40
	Versión: 02	Fecha: 27/09/2014
		Página: 1 de 2
Número de Revisión: 001 Declaración de Fecha de Revisión: 21/10/2014		
TÍTULO: PERÓXIDO DE HIDROGENO 35%		

1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Nombre químico: Peróxido de hidrógeno 35%
Otros nombres: Dióxido de Hidrógeno, Agua Oxigenada.
Formula Química o Componentes: H₂O₂
CAS: 7722-84-1 **UN:** 2014 **Calidad:** Técnica
Descripción: Líquido incoloro con ligero olor característico.

2. APLICACIONES GENERALES

Blanqueadores de textiles, papel, en la producción de químicos, plásticos, electroplateado, tratamiento de agua, refinado y limpieza de metales; combustible de cohetes, caucho para espuma, desinfectante de semillas. Bactericida y Virucida.

3. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

Sustancias incompatibles: Materiales combustibles, agentes reductores, iones metálicos, materiales oxidables, hierro, cobre, latón, bronce, cromo, cinc, plomo, plata, manganeso, alcoholes, glicerol, agentes reductores, sustancias orgánicas tales como papel, madera, algodón, paja, etc. No diluya con agua de la llave.

Parámetro	Unidad	Especificación
Concentración H ₂ O ₂	%p/p	35 Mín.
pH	-	<2,50
Densidad (20°C)	g/cm ³	1,131 Mín.
Estabilidad (96°C, 16 h)	%	<10
Arsénico	mg/kg	AUSENTE
Estaño	mg/kg	AUSENTE
Metales Pesados	mg/kg	AUSENTE

4. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y PRECAUCIONES

Condiciones de almacenamiento: Almacene en áreas frías y ventiladas lejos de los rayos solares y fuentes de calor. Los recipientes no deben ser apilados. Siempre deben ser almacenados en posición vertical. Guarde lejos de combustibles, material explosivo y sustancias incompatibles. El lugar de almacenamiento debe ser espacioso con control de temperatura y provisto de un suministro de agua. En caso de una descomposición inicial diluya inmediatamente con agua desmineralizada Almacene solo en recipientes de polipropileno, polietileno de alta densidad, vidrio o en Acero 316.

Precauciones: Oxidante fuerte Al manipular, úsense anteojos de seguridad para productos químicos y máscara, guantes y traje de seguridad, sólo en áreas bien ventiladas. No beba, coma y fume durante su manejo. Guarde el recipiente cerrado después de su uso. Diluya solamente con agua destilada o desmineralizada. Proteja los recipientes contra daños físicos.

Materias Primas - Productos para Aseo y Desinfección - Distribución - Implementos de Protección Personal - Fragancias Puras, Fijadores y Sebores- Accesorios y Equipos
 - Artículos para Laboratorio y Reactivos - Servicio de Maquila y Desarrollo de Productos
 VENTAS INSTITUCIONALES - PLANTA - OFICINA: Cra. 52 Nº 6 Sur 35 PBX: (4) 444 67 87 - PUNTOS DE VENTA: CENTRO: Cra. 56B Nº 46-68 OPCIÓN 3.
 - CRISTO REY: Cra. 52 Nº 25a-67 OPCIÓN 4. BELÉN: Cl. 30 Nº 74-24 OPCIÓN 5. - GUAYABAL: Cra. 52 Nº 6 Sur 35 OPCIÓN 6.
 E-mail: protokimica@pura.net.co Web: www.protokimica.com
 Medellín - Colombia

Continuación anexo 2. Ficha técnica peróxido de hidrógeno al 35% y 50%

	FICHA TÉCNICA	Código: GT-F-40
	Versión: 02	Fecha: 27/09/2014
		Página: 2 de 2
Número de Revisión: 001 Declaración de Fecha de Revisión: 21/10/2014		
TÍTULO: PERÓXIDO DE HIDROGENO 35%		

5. RECOMENDACIONES DE USO

No debe ser inyectado ni aplicado a ninguna concentración en cavidades cerradas, porque libera oxígeno que al no poder escapar, puede producir embolismo. Es tóxico por vía oral. Utilizar gafas y guantes. Debe guardarse en recipientes bien cerrados.

Usos del peróxido de hidrógeno para Prevención y control de factores de riesgo Biológico

Concentración % v/v Volumen a volumen	Uso	Tiempo de lavado Y/o exposición (minutos)
7	Manos, huevos, frutas, verduras.	20
	Vasos, biberones, equipo y material en acero inoxidable.	
	Área administrativa: pisos, paredes, baños. Mesas de trabajo, limpiadores, traperas, Pocetas.	
	Servicios asistenciales: pisos, paredes, Baños, vajillas.	
	Material altamente contaminado. Biológico, patógeno.	30

Preparación de peróxido de hidrógeno al 7 %

Tabla de preparación

(Se recomienda preparar únicamente lo que se va a utilizar durante el día)

Cantidad a preparar	Cantidad de peróxido de hidrógeno al 35%	Cantidad de Agua
1 litro	200 mL	800 mL
1 Galón (3.8 Litros)	760 mL	3040 mL
20 Litros	4 Litros	16 Litros
Cantidad a preparar	Cantidad de peróxido de hidrógeno al 50%	Cantidad de Agua
1 litro	140 mL	860 mL
1 Galón (3.8 Litros)	532 mL	3268 mL
20 Litros	2800 mL	17.2 Litros

Nota: El uso final del producto es responsabilidad directa del cliente, la información consignada en este documento es sólo de carácter ilustrativo y fue tomada de distintas fuentes bibliográficas por nuestro departamento técnico. Estos datos no representan responsabilidad legal alguna y no eximen al comprador de hacer sus propios análisis e investigaciones.

Materias Primas - Productos para Aseo y Desinfección - Distribución - Implementos de Protección Personal - Fragancias Puras, Fijadores y Sabones- Accesorios y Equipos
- Artículos para Laboratorio y Reactivos - Servicio de Maquila y Desarrollo de Productos
VENTAS INSTITUCIONALES - PLANTA - OFICINA: Cra. 52 N° 6 Sur 35 PBX: (4) 444 87 87 - PUNTOS DE VENTA: CENTRO: Cra. 56B N° 46-50 OPCIÓN 3.
- CRISTO REY: Cra. 52 N° 25ur-67 OPCIÓN 4. BELÉN- Cl. 30 N° 74-34 OPCIÓN 5. - GUAYABAL: Cra. 52 N° 6 Sur 35 OPCIÓN 6.
E-mail: protokimica@una.net.co Web: www.protokimica.com
Medellín - Colombia

Continuación anexo 2. Ficha técnica peróxido de hidrógeno al 35% y 50%

	FICHA TÉCNICA	Código: GT-F-40
	Versión: 02	Fecha: 27/09/2014
		Página: 1 de 2
Número de Revisión: 001 Declaración de Fecha de Revisión: 24/07/2018		
TÍTULO: PERÓXIDO DE HIDRÓGENO 50%		

1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Nombre químico: Peróxido de hidrógeno 50%

Otros nombres: Dióxido de hidrógeno, agua oxigenada

Fórmula Química o Componentes: H₂O₂

CAS: 7722-84-1

UN: 2014

CALIDAD: Técnica

Descripción: Líquido incoloro con ligero olor característico.

Vencimiento: 1 año

2. MANEJO Y APLICACIÓN

Blanqueadores de textiles, alimentos, papel, en la producción de químicos, plásticos, farmacéuticos, electroplateado, tratamiento de agua, refinado y limpieza de metales, combustible de cohetes, caucho para espuma, antiséptico, agente neutralizante en la destilación del vino, desinfectante de semillas. Bactericida y Virucida.

3. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

Sustancias incompatibles: Materiales combustibles, agentes reductores, iones metálicos, materiales oxidables, hierro, cobre, latón, bronce, cromo, cinc, plomo, plata, manganeso, alcoholes, glicerol, agentes reductores, sustancias orgánicas tales como papel, madera, algodón, paja, etc. No diluya con agua de la llave.

Parámetro	Unidad	Especificación
Concentración	%p/p	50,0 Min
pH	-	0,5 – 2,5
Densidad (25°C)	g/cm ³	1,188 – 1,207
Metales pesados	ppm	1,0 Máx

4. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y PRECAUCIONES

Condiciones de almacenamiento: Almacene en áreas frías y ventiladas lejos de los rayos solares y fuentes de calor. Los recipientes no deben ser apilados. Siempre deben ser almacenados en posición vertical. Guarde lejos de combustibles, material explosivo y sustancias incompatibles. El lugar de almacenamiento debe ser espacioso con control de temperatura y provisto de un suministro de agua. En caso de una descomposición inicial diluya inmediatamente con el agua desmineralizada almacene solo en recipientes de polipropileno, polietileno de alta densidad, vidrio o en acero 316.

Precauciones: Oxidantes fuertes al manipular, úsese anteojos de seguridad para productos químicos y máscara, guantes y traje de seguridad, sólo en áreas bien ventiladas. No beba, coma y fume durante su manejo. Guarde el recipiente cerrado después de su uso. Diluya solamente con agua destilada o desmineralizada. Proteja los recipientes contra daños físicos.

5. RECOMENDACIONES DE USO

No debe ser inyectado ni aplicado a ninguna concentración en cavidades cerradas, porque libera oxígeno que al no poder escapar, puede producir embolismo. Es tóxico por vía oral. Utilizar anteojos y

Productos Químicos al por Mayor y al Detall – Artículos para Laboratorio y Reactivos
 Implementos de Protección Personal – Fragancias y Sabones – Productos para el Aseo y Limpieza
 Dirección: Cra. 52 No 6 Sur 35 (Medellín – Colombia PBX: (+57) (4) 444-0707
 E-mail: servicioalcliente@protokimica.com Web: www.protokimica.com

Anexo 3. Registros y cálculos para determinación de concentración de cianuro (Standard Methods 4500-CN-D)

Muestra	Descripción de la muestra.	Volumen muestra (ml)	Volumen AgNO ₃ gastado (ml)	Concentración de CN- mg/l
1	Inicial	10	3,7	1679,8
2	Inicial	10	3,65	1657,1
3	Inicial	10	3,7	1679,8
4	4h, 20g carbón	10	3,3	1498,2
5	4h, 40g carbón	10	3,2	1452,8
6	4h, 60g carbón	10	2,85	1293,9
7	8h, 20g carbón	10	3,20	1452,80
8	8h, 40g carbón	10	3,05	1384,7
9	8h, 60g carbón	10	2,7	1225,8
10	12h, 20g carbón	10	2,9	1316,6
11	12h, 40g carbón	10	2,6	1180,4
12	12h, 60g carbón	10	2,35	1066,9
13	4h, 20g carbón	10	3,2	1452,8
14	4h, 40g carbón	10	3,1	1407,4
15	4h, 60g carbón	10	2,95	1339,3
16	8h, 20g carbón	10	3,1	1407,4
17	8h, 40g carbón	10	3,0	1362,0
18	8h, 60g carbón	10	2,9	1316,6
19	12h, 20g carbón	10	2,9	1316,6
20	12h, 40g carbón	10	2,7	1225,8
21	12h, 60g carbón	10	2,3	1044,2
22	4h, blanco	10	3,65	1657,1
23	8h, blanco	10	3,6	1634,4
24	12h, blanco	10	3,55	1611,7
25	Inicial H ₂ O ₂	10	2,3	1044,2
26	4h, 1 H ₂ O ₂	10	0,55	249,7

Muestra	Descripción de la muestra.	Volumen muestra (ml)	Volumen AgNO ₃ gastado (ml)	Concentración de CN ⁻ mg/l
27	4h, 1,5 H ₂ O ₂	10	0,15	68,1
28	4h, 2 H ₂ O ₂	400	0,05	0,5675
29	4h, 1 H ₂ O ₂	10	0,6	272,4
30	4h, 1,5 H ₂ O ₂	10	0,15	68,1
31	4h, 2 H ₂ O ₂	400	0,05	0,5675
32	4h, blanco	10	2,25	1021,5

CALCULOS:

Se basa en la reacción del nitrato de plata con el ión cianuro en solución alcalina para formar el complejo soluble NaAg(CN)₂ según la reacción (Nava et al, 2007):



Cuando no queda más cianuro en solución, el exceso de plata precipita como AgCN o reacciona con el indicador (Yoduro de potasio KI) para formar AgI. el punto final de la titulación lo proporciona la aparición de una turbidez permanente, blanca o amarillo opalescente.

Solución Patrón: Nitrato de plata al 0,787% (0,0463N)

Indicador: KI al 5%

169,9 g. de AgNO₃ saturan 98 g de NaCN

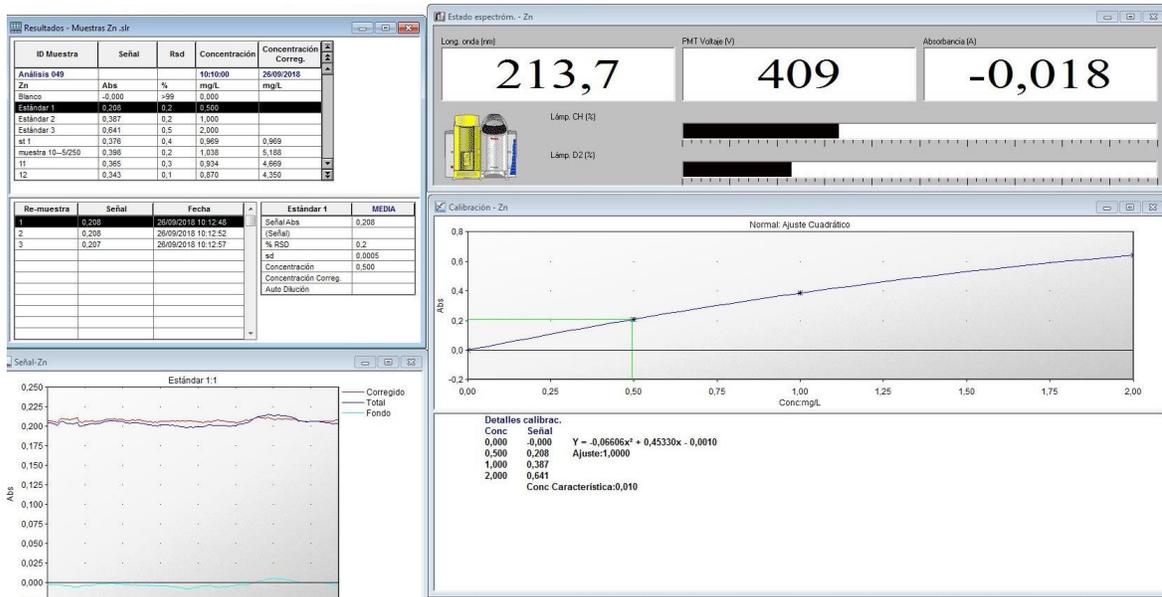
Para la solución patrón: 7,87 g de AgNO₃ saturan 4,54 g de NaCN

1ml de solución gastada equivalen a 0,00454 g. NaCN

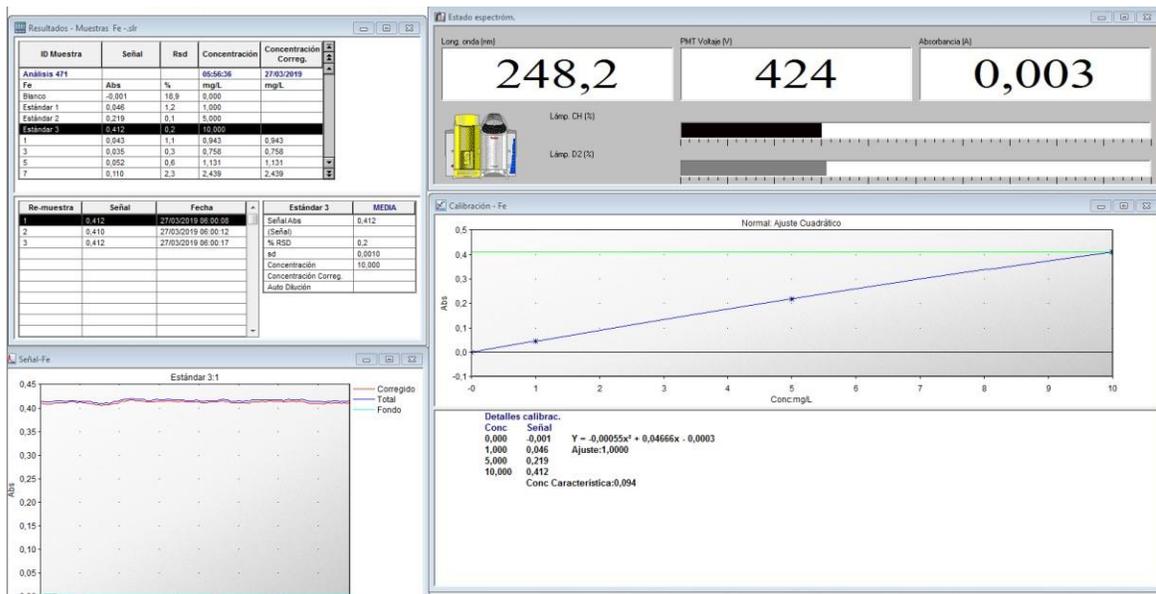
Concentración (mg/l) = mg. de cianuro/ litros de muestra.

Anexo 4. Curvas de calibración y datos de concentración para metales (método de adsorción atómica llama aire acetileno Ref SM 3111 B).

Curva de calibración Zinc

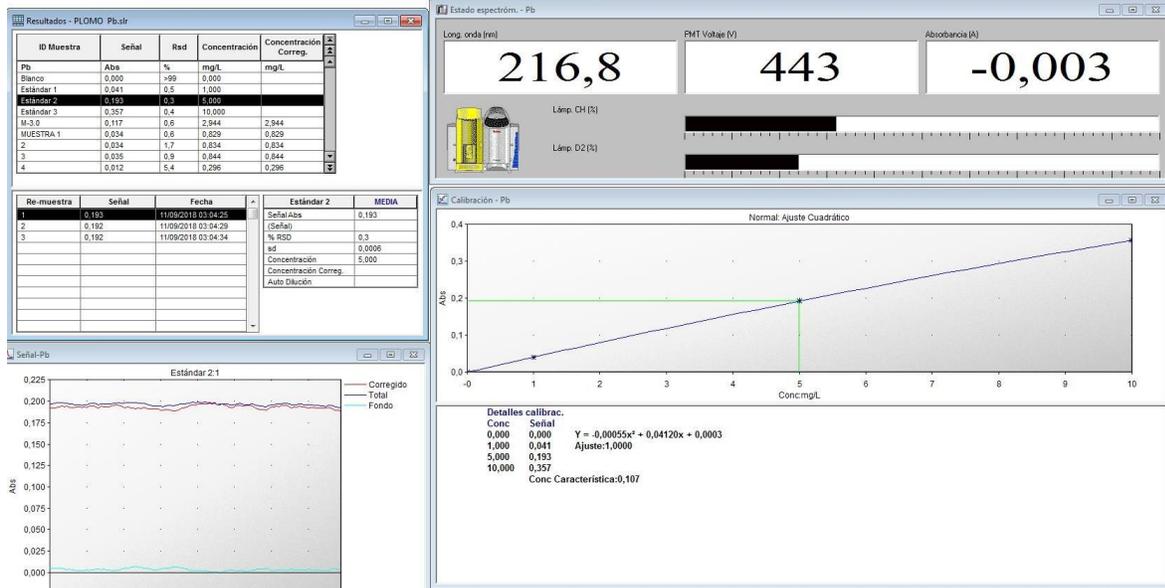


Curva calibración Hierro



Continuación anexo 4. Curvas de calibración y datos de concentración para metales (método de adsorción atómica llama aire acetileno Ref SM 3111 B).

Curva calibración Plomo



Continuación anexo 4. Resultados metales (Pb, Zn y Fe) entregados por el CIMEX (Centro de Investigación en Metalurgia Extractiva) Universidad Nacional Sede Medellín.

Instituto de Minas CIMEX
Facultad de Minas
Sede Medellín



Fecha Emisión:	14 de septiembre del 2018
Solicitud:	E160
Interesado:	Claudia Estrada
Contacto:	ccestradam@gmail.com
Número de muestras:	32

**INFORME DE RESULTADOS
LECTURAS EN SOLUCIÓN**

Muestra	ppm Fe	ppm Zn	ppm Pb
Muestra #1	2,109	244,25	0,829
Muestra #2	2,121	260,2	0,834
Muestra #3	2,147	280,15	0,844
Muestra #4	2,115	238,85	0,296
Muestra #5	2,099	210,85	0,003
Muestra #6	2,113	197,6	0
Muestra #7	2,060	238,8	0
Muestra #8	2,082	215,7	0
Muestra #9	1,885	199,6	0
Muestra #10	2,076	24,7	0
Muestra #11	2,129	235,2	0
Muestra #12	1,910	17,05	0
Muestra #13	2,255	246,45	0
Muestra #14	2,347	206,55	0
Muestra #15	2,213	191,25	0
Muestra #16	2,389	236,65	0
Muestra #17	2,590	209,2	0
Muestra #18	2,153	196,25	0
Muestra #19	2,407	234,55	0
Muestra #20	2,923	221,7	0
Muestra #21	1,962	201,05	0
Muestra #22	2,406	254,75	0,398
Muestra #23	2,382	220,1	0,399
Muestra #24	2,432	252,85	0,415
Muestra #25	2,344	190,65	0
Muestra #26	0,005	86,45	0
Muestra #27	0	4,480	0
Muestra #28	0	2,836	0
Muestra #29	0,520	228,25	0
Muestra #30	0	273,4	0

(Página 1 de 2)
Elaboró: AEPG

Centro de Investigación en Metalurgia Extractiva
Bloque G4 - Piso 1 Oficina 102
Teléfonos: (57-4) 4309290 o 4309000 ext. 49290
Medellín, Colombia
cimex_med@unal.edu.co

Patrimonio
de todos
los colombianos

Continuación anexo 4. Resultados metales (Pb, Zn y Fe) entregados por el CIMEX (Centro de Investigación en Metalurgia Extractiva) Universidad Nacional Sede Medellín.

Instituto de Mineros CIMEX
Facultad de Minas
Sede Medellín



Fecha Emisión:	27 de septiembre del 2018
Solicitud:	E160
Interesado:	Claudia Estrada
Contacto:	cestradam@gmail.com
Número de muestras:	32

**INFORME DE RESULTADOS
LECTURAS EN SOLUCIÓN**

Muestra	ppm Zn	ppm Pb
Muestra #10	259,40	
Muestra #11	233,45	
Muestra #12	217,50	
Muestra #19	247,25	
Muestra #20	240,90	
Muestra #21	233,40	
Muestra #22		0,386
Muestra #23		0,406
Muestra #24		0,410

Observaciones:

Norma o método utilizado: Espectrofotometría de absorción atómica.

Zn: Zinc
Pb: Plomo

[Firmado en Original]

M. Oswaldo Bustamante

Facultad de Minas – Instituto de Minerales CIMEX

NOTA: El Instituto de Minerales - CIMEX garantiza el resultado del ensayo de las muestras analizadas, pero no es responsable de que tales especímenes sean representativos de la muestra original. Las muestras analizadas serán resguardadas por el laboratorio sólo hasta tres meses después de haber entregado el informe de resultados.

(Página 1 de 1)
Laborio ASFG

Carrera 65 No. 63-20
Bloque 64 – Piso 1 Oficina 102
Teléfono: (57-4) 4308390 o 4308000 ext. 48290
Medellín, Colombia
cimex_med@unal.edu.co

Patrimonio
de todos
los colombianos