



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COLUMNA CON PIEDRA CALIZA
PARA REDUCCIÓN DE HIERRO Y COBRE EN AGUA DE DRENAJE
ÁCIDO DE MINA

AUTOR

Luis Felipe Loayza Jaramillo

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COLUMNA CON PIEDRA CALIZA
PARA REDUCCIÓN DE HIERRO Y COBRE EN AGUA DE DRENAJE ÁCIDO
DE MINA

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesor Guía
MSc. Indira Fernandina Black Solís

Autor
Luis Felipe Loayza Jaramillo

Año
2018

DECLARACIÓN DE PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Diseño y construcción de una columna con piedra caliza para reducción de hierro y cobre en agua de drenaje ácido de mina, a través de reuniones periódicas con el estudiante Luis Felipe Loayza Jaramillo, en el semestre 2018 - 1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Indira Fernandina Black Solís

Magister en Conservación y Gestión del Medio Natural

C.I.: 1711273563

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Diseño y construcción de una columna con piedra caliza para reducción de hierro y cobre en agua de drenaje ácido de mina, del estudiante Luis Felipe Loayza Jaramillo, en el semestre 2018 – 1, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Santiago Daniel Piedra Burgos
Master in Hydro Science and Engineering
C.I.: 1715384150

DECLARACIÓN DE AUTORIA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Luis Felipe Loayza Jaramillo

C.I.: 0706448511

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mi hermana, Andrea y a mi cuñado Christian por cada consejo, regaño, y los valores que me supieron dar; por el trabajo de padres que tuvieron que tener conmigo al recibirme en su hogar.

A mi tutora: Bióloga Indira Black, que desde que la conocí me brindó su apoyo y fue fundamental en la fase final de mi carrera, además, a los ingenieros Daniel Hidalgo, y Santiago Piedra, por su apoyo, los ánimos, y los conocimientos impartidos en mi carrera universitaria.

A mis amigos: Carla Vanessa, Cristian Patricio, Matías, y Jorge Andrés, ya que, cada uno contribuyó para que yo pueda realizar este trabajo y estar siempre pendiente de mí de manera incondicional. Y muy cariñosamente a Carolina Cárdenas por los ánimos brindados a pesar de todo.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado para mis padres, quienes fueron un pilar fundamental en mi formación académica, y depositaron su confianza en mí al apoyarme en todos estos años.

RESUMEN

La siguiente investigación se llevó a cabo en el laboratorio L12 de la Universidad de las Américas, sede Queri, donde, se construyó una columna de tratamiento en acrílico, tomando datos bibliográficos y criterios de diseño, para luego, realizar ensayos experimentales, con 3 repeticiones, las cuales, consistieron en colocar diferentes granulometrías de piedra caliza (5-10, 15-20, 25-30) mm, para conocer el tiempo de residencia del sistema con ayuda de un trazador. Se eligió el mejor tratamiento usando un ANOVA. Luego, se recolectaron 120 litros de agua de drenaje ácido (AMD) a la salida de un proyecto minero en el Cantón Portovelo, Provincia del Oro, para un realizar el proyecto a escala experimental. El AMD se sometió a un tratamiento que se basó en usar un tanque de 15 galones conectado a una columna de flujo ascendente a través de una bomba sumergible, la cual, contenía piedra caliza con granulometría de 5mm a 10mm obtenida del diseño experimental. Se realizó mediciones de pH, Fe, y Cu al inicio y al final del tratamiento en un laboratorio certificado. El valor de pH inicial de AMD fue de 1.99 y el tratado fue de 7.24; y el porcentaje de remoción fue: Fe (99.9%) y Cu (99.1%). Este sistema de tratamiento tiene una alta remoción de los metales puestos a estudio y en conformidad con los resultados obtenidos del laboratorio, la descarga cumple con la normativa ambiental nacional.

ABSTRACT

The following research was carried out in the L12 laboratory of the UDLA, Queri, where a column of acrylic treatment was constructed, taking bibliographic data and design criteria, to then carry out experimental tests, with 3 repetitions, which consisted of placing different granulometries of limestone (5-10, 15-20, 25-30) mm, to know the residence time of the system with the help of a tracer. The best treatment was chosen using an ANOVA. Then, 120 liters of acid drainage water (AMD) was collected at the exit of a mining project in the Portovelo Canton, Provincia del Oro, to carry out the project on an experimental scale. The AMD underwent a treatment that was based on using a 15 gallon tank connected to an upflow column through a submersible pump, which contained limestone with a particle size of 5mm to 10mm obtained from the experimental design. PH, Fe, and Cu measurements were taken at the beginning and at the end of the treatment in a certified laboratory. The initial pH value of AMD was 1.99 and the treated was 7.24; and the percentage of removal was: Fe (99.9%) and Cu (99.1%). This treatment system has a high removal of metals put to study and in accordance with the results obtained from the laboratory, the discharge complies with the national environmental regulations.

ÍNDICE

1. Capítulo I. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Alcance	5
1.3. Justificación	5
1.4. Situación actual	6
1.5. Planteamiento del problema	7
1.6. Objetivos	7
1.6.1. Objetivo General	7
1.6.2. Objetivos específicos	7
1.7. Hipótesis	8
2. Capítulo II. Marco Teórico	8
2.1. Impacto ambiental	8
2.1.1. Drenaje ácido de mina	8
2.1.2. Clasificación del drenaje ácido	9
2.1.3. Impactos Ambientales	10
2.2. Tipos de Tratamiento	11
2.2.1. Tratamientos pasivos	12
2.2.2. Tratamientos activos	14
2.3. Química del sistema de reducción	14
2.3.1. Reactores químicos	15
2.3.2. Reactor flujo pistón	15
2.3.3. Cinética Química	15

2.3.4.	Velocidad de la reacción.....	16
2.3.5.	Tiempo de residencia	16
2.4.	Factores hidráulicos del sistema de reducción	16
2.4.1.	Densidad real.....	17
2.4.2.	Densidad aparente	17
2.4.3.	Porosidad	18
2.4.4.	Conductividad hidráulica.....	18
2.5.	Muestreo de aguas residuales	19
2.5.1.	Muestreo simple	20
2.5.2.	Muestreo compuesto	20
3.	Capítulo III. Metodología	21
3.1.	Dimensionamiento y construcción del sistema	21
3.1.1.	Diseño de las condiciones físicas del sistema.....	21
3.1.2.	Construcción de la columna de remoción.....	21
3.2.	Recolección y caracterización de la muestra de drenaje ácido de mina	21
3.2.1.	Recolección de la muestra para caracterización	21
3.2.2.	Recolección de la muestra para ensayos de reducción.....	22
3.2.3.	Normativa vigente para comparar con el análisis de laboratorio ..	22
3.3.	Calculo de los parámetros físicos e hidráulicos del sistema de piedra caliza	25
3.3.1.	Granulometria del sistema de reducción	25
3.3.2.	Cálculo de Densidad Real	25
3.3.3.	Cálculo de Densidad Aparente	25
3.3.4.	Cálculo de Porosidad.....	26

3.3.5.	Cálculo de Conductividad Hidráulica	26
3.4.	Aplicación de la columna de piedra caliza para obtener los tiempos de residencia.....	27
3.4.1.	Diseño Experimental.....	27
3.4.2.	Cálculo del tiempo de residencia	28
3.4.3.	Análisis de resultados.....	28
3.5.	Ensayo para reducción de hierro y cobre a partir del diseño experimental	29
3.6.	Calculo del porcentaje de remoción de hierro y cobre con el uso del sistema de reducción	29
4.	Capítulo IV. Resultados y Discusión	30
4.1.	Dimensionamiento del sistema de reducción	30
4.2.	Muestreo y análisis de los contaminantes.....	31
4.2.1.	Muestreo Compuesto	31
4.2.2.	Comparación con normativa Nacional	32
4.3.	Parámetros físicos de la piedra caliza e hidráulica de la columna de reducción	33
4.3.1.	Tamizado de la piedra caliza	33
4.3.2.	Densidad real.....	34
4.3.3.	Densidad aparente	35
4.3.4.	Porosidad	35
4.3.5.	Conductividad hidráulica.....	36
4.4.	Resultados del diseño experimental y análisis estadístico	37
4.4.1.	Diseño experimental	37

4.4.2.	Velocidad lineal del sistema	38
4.4.3.	Análisis estadístico	39
4.5.	Implementación de la columna de piedra caliza	40
4.5.1.	Concentración final de los contaminantes	41
4.5.2.	Porcentaje de reducción de los contaminantes	42
4.5.3.	Dispersión mecánica de hierro y cobre en el sistema.....	44
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
5.1.	Conclusiones.....	45
5.2.	Recomendaciones	46
	REFERENCIAS	47
	ANEXOS	52

1. Capítulo I. Introducción

1.1. Antecedentes

La demanda de minerales se ha incrementado en los últimos 20 años a nivel mundial, por ejemplo, en el año 2013 la participación de la minería en el producto interno bruto osciló entre el 8% y 15% en América latina (Carrere, 2004). Sin embargo, los impactos ambientales causados por las actividades mineras son unas de las principales causas de conflictos socio ambientales. Se puede señalar por ejemplo, en Estados Unidos existen más de 180.000 hectáreas de lagunas contaminadas por el paso de la minería industrial, en Colombia el proyecto “Mina Marmato” quiso desalojar todo el casco urbano y desplazar más de 5.000 habitantes en el municipio de Marmato, debido a la extensión del proyecto, ya que, tiene 500 minas de extracción de Oro (Guerrero, 2012). De igual manera, en Perú la “minera Yanococha” derramó 151 kg de mercurio cerca de los poblados de San Juan y Magdalena, días después, un informe médico reportó 755 personas intoxicadas por mercurio y tan solo 49.1 kg de mercurio recuperados luego del derrame (Arana-Zegarra, 2009). En Ecuador, la minería ha afectado principalmente a la cuenca del río Puyango, debido a que ha sido una actividad poco organizada en este sector desde el siglo XVI, donde, según registros del INAMHI el río Calera tiene sólidos en suspensión con una concentración de 130mg/l lo que genera un impacto moderado, e imposibilita en ciertos tramos el uso del agua del río (Ministerio del Ambiente, 2014).

Existen dos tipos de minería de acuerdo a la forma en que se desarrolla esta actividad, la pequeña minería y la minería industrial. La pequeña minería se desarrolla por un determinado grupo de personas, familias o cooperativas, quienes utilizan procedimientos poco o nada técnico para explotar diferentes minerales (Hentschel, 2002). Se calcula que aproximadamente 100 millones de personas trabajan en la explotación artesanal de oro a nivel mundial. Si bien es cierto, la minería artesanal representa una actividad importante para la economía local, sin embargo, al ser realizada de manera poco técnica e ilegal ocasiona serios problemas ambientales, sociales y de salud (Tissafi, 2011). Por

el contrario, la minería industrial explota yacimientos minerales a través de la aplicación de conocimiento científicos y técnicas especializadas que llevan al descubrimiento y explotación de diversos minerales (Banco Central del Ecuador, 2015), por lo tanto, los impactos ambientales y sociales suelen ser menores, debido al uso de tecnología y vigilancia gubernamental que estos tienen. La minería industrial es organizada con planificación a través de una coordinación centralizada, en contraste con la pequeña minería, que posee una organización espontánea e informal (Tissafi, 2011).

Según Bouysse – Cassagne, la historia antigua de la minería en Ecuador se puede resumir de la siguiente manera:

En Ecuador, la minería se inició en la época pre colonial con trabajos en oro, plata, platino y cobre con fines ornamentales. En el siglo XVI, la minería tuvo mayor intensidad debido a la explotación de grandes yacimientos de oro en la cordillera de Nabón y río el Gualaceo. Así como, la explotación de cobre, plata y oro en Paute y Burgay, llegando un estimado de 5600 kg anuales de estos minerales. Posteriormente, en la mitad del siglo XVI, las minas en Zaruma fueron descubiertas por los españoles, los mismos introdujeron la amalgamación (proceso donde se agrega mercurio a la roca mineral durante la trituración, molienda y lavado para formar una especie de lodo en conjunto con el agua, gracias a la afinidad que existe entre el oro y el mercurio) y molinos de piedra para triturar el material de base. Finalmente, la amalgama era sometida a altas temperaturas volatilizando el mercurio y obteniendo mayor pureza en el oro (Bouysse-Cassagne, 2005).

En la actualidad, la actividad minería se desempeña como minería industrial y minería artesanal, es así, que en el 2014 la producción total de oro provino el 78% de la pequeña minería y el 22% de minería industrial, contrastando totalmente del contexto minero internacional, donde la minería industrial produjo un 82% de oro y tan solo el 10% y 8% de la minería industrial ecuatoriana y minería artesanal respectivamente (Banco Central del Ecuador, 2017).

Los impactos ambientales que causa la pequeña minería se generan en el procesamiento del mineral y en la explotación de la mina, es así que existen efectos sobre la calidad del aire debido a la producción de partículas metálicas suspendidas; este tipo de minería perjudica al cauce de los ríos cercanos y a fuentes subterráneas, el suelo también se ve afectado debido a la remoción de la capa vegetal primaria, pérdida de la materia orgánica y afectación de sus características físico-químicas (Carrere, 2004). En Ecuador, en la última década, la pequeña minería incorporó maquinaria para perforaciones, trituración, molienda, recuperación y transporte del material, con lo que se pretende reducir los impactos socio-ambientales. Las provincias en que existe mayor cantidad de este tipo de minería son: El Oro con 226 concesiones, Zamora Chinchipe con 744 concesiones y Azuay con 165 concesiones, debido a que estas fueron las primeras zonas mineras en el Ecuador (Ministerio de Minería del Ecuador, 2016).

Para extraer el mineral en un proyecto minero, primero, se debe conocer el valor del yacimiento y su ubicación; posteriormente, se realizan estudios de campo, inspecciones y perforaciones de prueba; después, se lleva a cabo la construcción de caminos de acceso para el transporte de equipos y del material extraído, al mismo tiempo se prepara el terreno para la construcción de áreas de trabajo, finalmente, se procede a la extracción del mineral, la misma que se realiza a cielo abierto o bajo una red de túneles con acceso directo al mineral (en caso de que el material se encuentre bajo una capa de suelo) (Universidad Politécnica de Madrid, 2007). El proyecto termina con un plan de cierre y rehabilitación del terreno, por parte de la empresa (Banco Central del Ecuador, 2015).

En la fase de extracción, existe un potencial contaminante que es el drenaje ácido, este se genera por el contenido de hierro y materiales sulfurosos contenidos en las paredes de las minas, los cuales, si se exponen al oxígeno y al agua forman ácidos (Almonte, 2013). De esta forma, se disolverán metales y cualquier otro contaminante que se encuentre en los materiales minados y se formará una solución ácida con una alta concentración de metales pesados y sulfatos (Aduvire, 2006).

Al llegar este fluido a un efluente natural se genera un gran impacto en ecosistemas loticos y aguas subterráneas, alterando la composición físico-química e imposibilitando su uso (Ministerio del Ambiente, 2013).

Para mitigar el efecto de las aguas de drenaje ácido de mina se han creado varios sistemas o procesos con el fin de reducir la concentración de los metales pesados dispuestos en el agua.

Uno de estos sistemas utiliza técnicas biológicas de remediación como humedales aeróbicos con microorganismos que soporten y eliminen la acidez del agua, donde su efectividad va del 20 – 30%. Otro sistema utiliza humedales de uso vertical, que consiste en precipitar los metales como los sulfatos. Existen estudios que respaldan este sistema, sin embargo, su eficiencia varía en conformidad con las características meteorológicas del sitio (Brenner & Busler, 2004). Por otro lado, existen sistemas independientes de minerales carbonatados como la piedra caliza, este consiste en un tratamiento físico, donde el mineral aumenta el pH, facilitando la precipitación de metales. En Pensilvania se construyeron nueve de estos sistemas que recibieron un volumen de 210,8 m³ de agua de drenaje ácido de mina, los tanques se diseñaron con un tiempo de retención hidráulico de 15 horas y se logró reducir 9 kg/día de hierro (Bernier, Aubertin, Dagenais, & Bussièrè, 2000).

La roca caliza es de origen sedimentario, formada por 50% de carbonato de calcio (CaCO₃) y materiales tríticos, como cuarzo o arcilla. Es una roca con un contenido de porosidad que va del (5-50) % y tiene un pH mayor a 8, que puede ir variando según la profundidad del terreno de donde se extraiga. Por su porosidad permite el paso del agua lo que hace que la empleen en varios tipos de industrias como la agrícola, química y en las edificaciones (Lynch, 2014). El sector agrícola usa la caliza pulverizada para estimular la producción del suelo disminuyendo la acidez y contribuyendo con nutrientes para las plantas. En la industria minera se usa la piedra caliza totalmente triturada (cal), para tratar los metales pesados (Wolkersdorfer, 2006).

1.2. Alcance

El proyecto de investigación realizará un estudio experimental para probar la eficiencia de sistemas de reducción de hierro y cobre de agua de drenaje ácido de mina usando piedra caliza. Se trabajará con agua de drenaje ácido de mina recolectado en operaciones mineras en la provincia de El Oro, cantón Portovelo. Se determinará la longitud y diámetro de la columna, el tiempo de residencia y tamaño de partícula idóneos para la columna de tratamiento, posteriormente, se realizarán ensayos experimentales para la determinación del tiempo de residencia colocando distinta granulometría, utilizando la columna de tratamiento que se construyó con la información de base. Finalmente, se determinará el porcentaje de reducción de hierro y cobre del drenaje ácido, utilizando el tamaño de grano obtenido del diseño experimental. Esto se llevará a cabo en el laboratorio de aguas de la Universidad de Las Américas, sede Queri.

1.3. Justificación

Los sistemas de piedra caliza consisten en la construcción de zanjas, llenas con esta roca, instalados a una profundidad de 1 a 2 metros. Debido al contacto ácido-base que tiene la piedra caliza con el drenaje ácido se forman radicales OH. Los metales disueltos en el agua tienen afinidad por el radical (OH) libre y tienden a formar un hidróxido que precipitan y recubren la superficie de la roca caliza. De esta forma, el sistema pierde eficacia como generador de alcalinidad (López Pamo, Aduvire, & Barettino, 2002). Es por ello que se realizará una columna de pre – tratamiento, donde la caliza se disolverá al tomar contacto con el drenaje ácido, y de esta manera se logrará elevar el pH; con esto se logrará mantener así eficacia de la columna y la recolección de lodos generados será de más fácil manejo.

Los proyectos mineros poseen plantas de tratamiento para la remoción de metales pesados en el agua de drenaje ácido. Para esto usan reactores y bombas para llevar el agua hacia un tratamiento, el problema es que el agua al tener bajo pH corroe los reactores y daña las bombas. Con el uso de este sistema y debido a que la presencia de la piedra caliza, incrementa el pH en 1.5 por lo

que el agua será más alcalina lo que hará que su tratamiento sea eficiente y no genere pérdidas por daño en los equipos (Wolkersdorfer, 2006).

1.4. Situación actual

En Ecuador, de acuerdo al censo de abril del 2010, el 58% de concesiones dedicadas a la explotación de minas y canteras se encuentran en las provincias de El Oro, Pichincha, Azuay, Orellana, Sucumbíos, Zamora Chinchipe, Guayas y Esmeraldas, y el 42% restante se encuentra en 17 provincias. La provincia de El Oro y es la que mayor número de concesiones tiene y Esmeraldas es la que menor número de concesiones tiene. La contribución de las actividades mineras al producto interno bruto en Ecuador es de 0.3% en el periodo 2014 – 2015. El distrito minero Portovelo conformado por los cantones Zaruma y Portovelo está ubicado en la provincia de El Oro, es una zona representativa por su producción minera, debido a la incidencia en cuanto a la pequeña minería. El 36.5% de la población se dedica a actividades de extracción de minas y canteras. Según la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM) existen 92 concesiones mineras entre Zaruma y Portovelo en consecuencia, la minería es la actividad que genera mayores ingresos en los cantones (38,9%). En este distrito minero los principales productos obtenidos son metálicos (oro y plata) y materiales de construcción (caliza y sílice) (INEC, 2010). Sin embargo, según estudios realizados en el suelo de las zonas mineras de Portovelo, se determinó que este contiene, además, concentraciones de plomo, cobre, hierro y zinc sobre el 35%.

En cuanto a los efluentes obtenidos de este tipo de minería, no se los trata de manera adecuada. Los residuos son enviados directamente al ambiente y en el caso de las plantas de beneficio (pequeña minería) se utilizan piscinas sin un monitoreo de la eficiencia de dicho proceso (Instituto Nacional Geológico Minero Metalúrgico del Ecuador, 2015). De igual forma, se realizó un análisis físico-químico en el Río Amarillo, el mismo que se encuentra cerca a los proyectos mineros y se obtuvo como resultado altos niveles de metales pesados en suspensión (Ministerio de Minería del Ecuador, 2016).

1.5. Planteamiento del problema

La presencia de metales pasados en el drenaje ácido es uno de los problemas principales en las actividades mineras, debido a que éstos, al llegar a un río (ecosistema lótico) se mantienen en suspensión y pueden viajar varios kilómetros desde su punto de origen. Un claro ejemplo son los ríos Calera y Amarillo donde se han realizado monitoreos del contenido de metales pesados en su agua, y los resultados indican que sobrepasan los límites de hierro en un 150% y cobre en un 200% de la norma de legislación ecuatoriana Libro XI, anexo 1, tabla 12 (Ministerio de Minería del Ecuador, 2016). Para controlar sus efluentes y entrar en normativa algunos proyectos mineros emplean un sistema rudimentario de piedra caliza, la cual consiste en que el drenaje ácido pase superficialmente por una cama con de este material, lo que lo hace poco o nada eficiente, puesto que al tomar contacto la piedra con el drenaje ácido se produce una dilución y se generan radicales OH estos precipitarán y recubren la superficie de la piedra, saturando el sistema y perdiendo eficiencia, al poco tiempo de su utilización.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Diseñar un sistema a base de piedra caliza, para reducción de hierro y cobre en agua de drenaje ácido de mina

1.6.2. Objetivos específicos

Determinar los tiempos de permanencia y tamaño de partícula idóneos para sistemas de reducción de hierro y cobre en el drenaje ácido de mina

Construir una columna de reducción a escala de laboratorio.

Calcular el porcentaje de remoción de hierro y cobre del agua de drenaje ácido al finalizar el proceso de experimentación

1.7. Hipótesis

H_0 : El tiempo de residencia del trazador varía según el tamaño de la partícula de piedra caliza.

H_1 : El tiempo de residencia del trazador no varía según el tamaño de la partícula de piedra caliza.

H_0 : El agua de drenaje ácido de mina al pasar por una columna de piedra caliza reduce su concentración de hierro y cobre, y aumenta el pH.

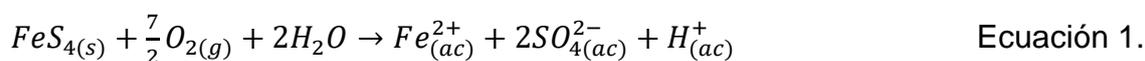
H_1 : El agua de drenaje ácido de mina al pasar por una columna de piedra caliza no reduce su concentración de hierro y cobre, ni aumenta el pH.

2. Capítulo II. Marco Teórico

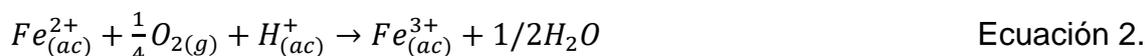
2.1. Impacto ambiental

2.1.1. Drenaje ácido de mina

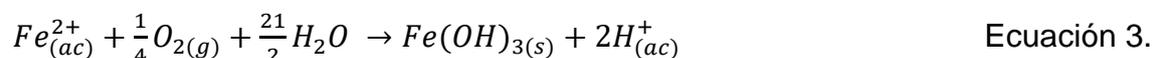
La oxidación de la pirita (FeS_2) generada por el oxígeno atmosférico y agua dan como resultado el drenaje ácido de mina (AMD) (INAP, 2014), además, este lixiviado ácido contiene contaminantes en altas concentraciones de metales, sulfatos y metaloides como pueden ser Cu, Fe, Mn, Pb, As, etc. (Delgado, 2012). El proceso de oxidación de la pirita necesita de tres reactantes, que son: la pirita, el oxígeno y el agua, además, esta reacción puede darse en un medio abiótico o biótico (Chatwin, Ferguson, Verburg, & Bezuidenhout, 2009).



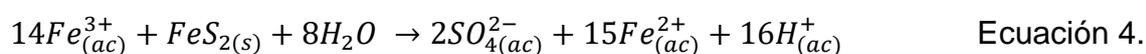
La ecuación 2 muestra como el hierro ferroso reacciona con el oxígeno para obtener hierro férrico.



El hierro férrico (Fe^{2+}), puede sufrir dos procesos que van en función del pH del agua, se obtiene la ecuación 3, cuando el pH del agua es superior a 4,5, donde el hierro ferroso se oxida e hidroliza para tener como resultado hidróxidos en forma de precipitados con un color rojo-marrón (Chaparro, 2015).



Por otro lado, si el pH del agua tiene un valor menor o igual a 4.5, el hierro férrico oxida la pirita, ya que este cumple el papel del oxígeno de la ecuación 2 y genera mayor acidez en el agua como lo indica la ecuación 4.



2.1.2. Clasificación del drenaje ácido

La clasificación del drenaje ácido va en función del pH que el drenaje ácido posea, estudios e investigación recomiendan que se los agrupe de la siguiente manera (Morin & Hutt, 2001).

Tabla 1.

Clasificación de los drenajes en función del potencial alcalinidad/acidez de los minerales.

Clase	pH	Descripción
Acido	< 6	Se genera por la oxidación de los minerales, en especial de sulfuros. Se los asocia a minas que se dediquen a la extracción de metales, carbón y piritas. Posee mayor cantidad de metales pesados que los drenajes casi neutros.
Alcalino	> 9 o 10	Se genera por la disolución de minerales básicos como lo son algunos silicatos, hidróxidos y óxidos.

		Se los asocia con la minería de diamantes, molienda de bauxita y cenizas de combustión de carbón. Existe una concentración muy alta de aluminio que en drenajes ácidos y casi neutros.
Casi neutro	6 – 9 o 10	Para que se genere depende de la abundancia de minerales alcalinos o ácidos. Las concentraciones de los metales exceden los niveles de toxicidad.
Otros	Irrelevante	Se los asocia a la extracción no metálica como: potasa, sales, boratos, gravas, acillas, etc.

Adaptado de (Aduvire, 2006, p. 110).

2.1.3. Impactos Ambientales

El agua de drenaje ácido tiene un gran potencial para contaminar cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneas, lo que representa uno de los principales impactos generados por la operación de empresas mineras en el entorno natural (Nyquist & Greger, 2008) La continua descarga de efluentes mineros con concentraciones elevadas de contaminantes, hacia aguas superficiales y subterráneas puede afectar la vida acuática, alterando las propiedades físico químicas del suelo y los sedimentos (Lottermoser, 2010). La acidificación del agua es un proceso que se da por la presencia del azufre, que al ser expuesto al agua y el aire, se convierte en ácido sulfúrico o una lixiviación ácida; estos componentes ácidos pueden ser arrastrados por el cauce natural de los ríos, alterando la disponibilidad de nutrientes en el suelo, y por ende su fertilidad (MAE, 2017).

Tabla 2.

Impactos ambientales causados según las características del AMD.

Contaminante	Concentración	Impacto Ambiental
Acidez / H ⁺	pH < 4.5	Los organismos fotosintéticos no tienen

		bicarbonato para su desarrollo; mala calidad del agua; los iones metálicos pueden moverse con mayor facilidad.
Fe+3, Fe+2, Fe(OH)3	100 a 1000 mg/L	Aumento en la turbidez en el cuerpo de agua receptor, además conforme sube el pH las sales férricas precipitan; sofocación de los organismos por acumulación de estos precipitados en las branquias de los peces; se reduce la penetración de la luz en el cuerpo receptor.
Metales Pesado (Cu, Pb, Cd, As, Sb, Ni, Zn)	0.01 a 1000 mg/L	Muerte de la flora y fauna; contaminación por sedimentos en el suelo, bioacumulación; pérdida de la calidad de agua.
Sólidos Totales Disueltos, Sulfatos, Mn, Si, Al, Mg, Ca, Na, Fe, K	100 a más de 10000 mg/L	Contaminación por sedimentos; los TDS precipitan al incrustarse en las sales de hierro; mala calidad de agua.

Adaptado de (López Pamo et al., 2002, pp. 3–12)

2.2. Tipos de Tratamiento

Generalmente, la eliminación y el aislamiento de metales y aniones metálicos, es el principio de los procesos para el tratamiento de agua de drenaje ácido (Aduvire, 2006). Algunas técnicas de tratamiento de agua drenaje ácido consistente en el aumento del nivel de pH, para precipitar los metales disueltos y sulfatos y de esta forma disminuir la biodisponibilidad de metales en solución (Lottermoser, 2010)

Para el tratamiento de agua de drenaje ácido, se tiene: métodos activos y métodos pasivos. Los métodos activos se caracterizan por tener un costo elevado, ya que el mantenimiento y control de las instalaciones de tratamiento es continuo; así como la necesidad de adecuar un almacenamiento para los lodos generados en el tratamiento. Mientras que en los métodos pasivos la intervención del hombre es mínima, lo que disminuye significativamente los costos por mano de obra en actividades de operación y mantenimiento (Aduvire, 2006).

2.2.1. Tratamientos pasivos

Los tratamientos pasivos son procesos que abarcan físicos, químicos y biológicos, donde, se busca modificar las características del agua de drenaje ácido para de esta forma eliminar la concentración de metales en disolución, neutralizando el pH (López Pamo et al., 2002); existen métodos pasivos, donde se usan drenajes de piedra caliza, biorreactores anóxicos que tienen el mismo principio (Lottermoser, 2010).

A continuación tenemos los principales métodos usados según (Santomartino & Webb, 2007a, pp. 2344–2361).

- Canales de piedra caliza abierta.
- Drenajes de piedra caliza anóxicos.
- Los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad
- Humedales aerobios y anaerobios; las barreras reactivas permeables
- Sustrato alcalino disperso

Este tipo de tratamientos viene a ser una de las formas más factibles de remediar o a su vez controlar el agua de drenaje ácido, no obstante, estos tratamientos muestran una obstrucción temprana en la porosidad del sistema cuando se trata de altas concentración de acidez y metales de solución (Caraballo, Rötting, Macías, Miguel, & Ayora, 2009).

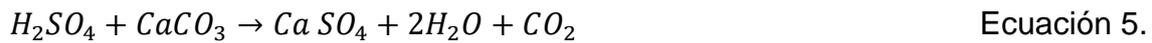
Uno de los tratamientos que supera dicho problemas de obstrucción y pasivación es el denominado sustrato alcalino disperso, que usa un reactivo alcalino de grano fino, mezclado con un material inerte que tenga alta superficie específica, como por ejemplo la viruta de madera; existe un estudio realizado en campo donde este tratamiento fue probado con altas concentraciones de Fe y pH de 3.3 con una acidez neta de 14650 mg/L y elimino un total de 870 mg/L de acidez y una remoción de 99% de Cu y 93% de Fe, sin embargo, hubo metales como el Co que no fueron removidos (Rotting, Caraballo, Ayora, Serrano, & Carrera, 2008).

Otro estudio, uso diferentes granos de MgO con viruta de madera, para ser puesto a prueba eliminando altas concentraciones de Zn t Mn, teniendo como resultado la eliminación total de estos metales, además dejando en claro que tener pequeños tamaños de grano con una gran superficie de la viruta de madera logra una rápida disolución (Rotting, Ayora, & Carrera, 2008).

2.2.1.1. Piedra caliza para tratar agua de drenaje ácido de mina

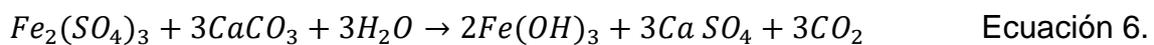
El uso de rocas básicas es una medida que se ha tomado para controlar de cierta forma los drenajes ácidos, aunque su efectividad depende si la aplicación es a corto o largo plazo. Una vez usada se generan residuos estériles que pueden ser controlados en una escombrera, el objetivo por el cual se usa estos materiales es para controlar el pH y mantenerlo neutro con el fin de limitar oxidaciones químicas y actividades bacterianas. En los tratamientos convencionales existen tres etapas: la neutralización, oxidación y precipitación. Estas etapas dependen del agente alcalino que se use (Aduvire, 2006).

La primera etapa de neutralización con roca caliza sucede lo siguiente ecuación.



La segunda etapa se lleva a cabo si es un sistema abierto a la atmósfera tomando de esa forma el oxígeno, logrando modificar el hierro haciéndolo insoluble.

Y la fase de precipitación, es donde se forman hidróxidos al reaccionar el sulfato férrico con los agentes alcalinos, como se explica en la siguiente ecuación.



Estos sólidos se separan en tanques decantadores circulares o rectangulares, y muchas veces se le agrega floculantes (López Pamo et al., 2002).

2.2.2. Tratamientos activos

Este tipo de tratamiento tiene una secuencia, es decir, sigue un proceso u operación continua; ya que éste depende de una planta química, por lo que sus costos son elevados, sobre todo cuando se trata de un gran volumen de agua a tratar, además a esto hay que sumarle el mantenimiento de los equipos de aireación, mezclado, etc. (Aduvire, 2006, p. 80).

En este tratamiento se agrega sustancias alcalinas, que generalmente son cal, cal hidratada, sosa cáustica o amoníaco, con la finalidad de que se realice una neutralización y lograr que los metales pesados precipiten; estos metales precipitan en forma de hidróxidos insolubles en un intervalo de pH entre 8.5 a 10, como por el ejemplo, el aluminio precipita a un pH de 5.5 pero se vuelve soluble a pH 8.5, por estas razones, se debe elegir el tipo de tratamiento químico más apropiado (Aduvire, 2006, p. 81).

2.3. Química del sistema de reducción

2.3.1. Reactores químicos

Se entiende por reactor químico a la una unidad de proceso donde se llevarán a cabo varias reacciones químicas, esta definición aplica para procesos en los cuales se cuenta con líneas de entrada y salida con sus respectivos controles; la importancia de diseñar un reactor es con la finalidad de potenciar el proceso y que la reacción que se lleve a cabo sea más eficiente y se reduzcan los costos, además de que un reactor es la unidad o procesos principal dentro de una planta (Smith, 1991).

2.3.2. Reactor flujo pistón

Un Reactor flujo pistón opera de manera estacionaria de forma ordenada en una sección transversal, es decir, en este reactor los reactivos se consumen a medida de que vaya fluyendo a lo largo del reactor (Perry, 2008). Los reactores de flujo pistón a menudo se los usa en laboratorio, para simular proceso de producción que luego puedan ser llevados a escala comercial (Smith, 1991).

2.3.3. Cinética Química

Se determina que ha ocurrido una reacción química cuando, se encuentran dos o más sustancias en condiciones ideales para que se transformen en otra de diferente naturaleza química, es decir, los átomos se reordenan y se forman nuevas moléculas.

El estudio de la cinética química establece que tan veloz o que tan lenta puede llegar a ser una reacción, para esto se estudian los factores que determinen la velocidad o mecanismo, es decir, las etapas que atraviesa para que ocurra este cambio (Tiscareño, 2008). La velocidad de reacción es el eje principal de la cinética química, tomando en consideración los factores que influirán en la misma, además de explicar la causa de dicha velocidad (Smith, 1991).

Los mecanismos indican los procesos elementales en los que interactúan las moléculas que a su vez producen la velocidad con la que reacciona, también se entiende que los mecanismos de reacción ofrecen una idea clara de cada etapa en las que ocurre la reacción (Tiscareño, 2008).

2.3.4. Velocidad de la reacción

Se define como velocidad de reacción a la cantidad del componente “A” que se produce por unidad de tiempo, por cantidad unitaria de una variable de referencia, y en un sistema que reaccione químicamente. Como se lo expresa en la ecuación.

$$-r_A = \frac{1}{\nu} \frac{dN_A}{d\theta} \quad \text{Ecuación 7.}$$

La velocidad se puede ver afectada por variables como lo son la temperatura, presión y concentración.

También, la velocidad de la reacción se la puede expresar de varias formas, donde, se mide la concentración “b” de un producto en distintos tiempos, otra forma es tener como referencia la concentración de uno de los reactivos en función del tiempo, y en este caso, la pendiente dc/dt tendrían el signo negativo, por lo que se tomaría en cuenta para enunciar la velocidad como $-dc/dt$.

2.3.5. Tiempo de residencia

El tiempo de residencia es el tiempo que tarda una molécula en avanzar de principio a fin por un reactor. Las variaciones que existan de densidad pueden ser causadas por los cambios de temperatura y presión, que afectan directamente al tiempo de residencia (Smith, 1991).

2.4. Factores hidráulicos del sistema de reducción

2.4.1. Densidad real

Densidad real o densidad de las partículas, es el peso de la unidad sólida en un volumen determinado. La densidad es determinada obteniendo el valor del peso seco de la muestra sólida y el volumen que ocupa los sólidos de la muestra, el volumen se determina por el principio de Arquímedes, que corresponde al volumen de líquido que puede desplazar un sólido al ser sumergido (Porta, Acevedo, & Poch, 2008).

La densidad real cambia según el tipo de mineral madre y de la materia orgánica, debido a que la materia orgánica tiene un peso menor a de un volumen igual de sólidos minerales, como consecuencia tenemos que generalmente la densidad de las partículas superficiales son más bajas que las de un subsuelo (Porta et al., 2008).

Para calcular la densidad real se usa la siguiente ecuación.

$$\rho_r = \frac{\text{peso de sólido seco}}{\text{Volumen de sólidos} - \text{volumen líquido}} \quad \text{Ecuación 8.}$$

2.4.2. Densidad aparente

La densidad aparente es el peso seco del suelo por unidad de volumen de suelo sin alteraciones, incluyendo el espacio poroso. Los valores de densidad aparente pueden variar según los factores como la textura, estructura y contenido de materia orgánica, en contraste con la densidad real que no varía, la densidad aparente es altamente variable debido a la cantidad de espacios porosos (Porta et al., 2008).

Para calcular la densidad aparente se usa la siguiente ecuación.

$$\rho_a = \frac{\text{peso de sólido seco}}{\text{volumen del cilindro}} \quad \text{Ecuación 9.}$$

2.4.3. Porosidad

Se representa como los espacios que no son ocupados por partes solidas, debido a la estructura y textura del sólidos; aquí se puede encontrar agua o aire, según estudios los suelos deben tener un 50% de porosidad para ser ideal, donde, el 25% será ocupado por aire y otro 25% por agua; si no se encuentra la cantidad de poros ideal el suelo no sería un medio adecuado para la vida (Porta et al., 2008) .

Para calcular la porosidad se recomienda la siguiente ecuación.

$$V_v = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) * 100 \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde:

ρ_a : Densidad aparente

ρ_r : Densidad real

V_v : Porosidad

2.4.4. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es cómo pasa el agua a través de un suelo saturado, también es usada para evaluar la clase de permeabilidad de un horizonte de suelos.

La conductividad hidráulica es un factor de proporcionalidad de la ley de Darcy, que trata de como el flujo de agua por unidad de gradiente del potencial hidráulico, este también se puede expresar como el flujo de agua por unidad de gradiente de carga hidráulica. Las unidades más usadas para medir conductividad hidráulica son cm/seg, cm/hora y m/día.

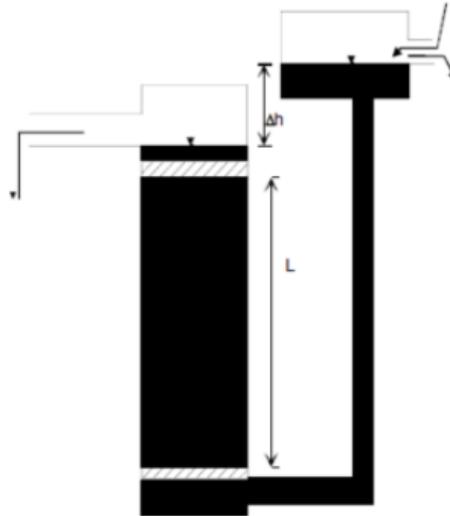


Figura 1. Permeámetro con carga constante.

Se usa la siguiente ecuación para calcular la conductividad hidráulica.

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (\Delta h)}$$

Ecuación 11.

Donde:

K: Conductividad Hidráulica

Q: Caudal de salida del sistema

A: Área de la sección transversal

Δh : Diferencia de carga hidráulica

L: Distancia

2.5. Muestreo de aguas residuales

Para llevar a cabo un estudio en el que implique analizar concentraciones de metales o cualquier contaminante en una solución de agua, se recomienda realizar un muestreo; en el cual, es importante establecerse parámetros como el número de muestras, la cantidad a ser recolectada, y en que periodos se tomará la muestra, esto con la finalidad de que esa muestra tomada sea representativa del cauce que será analizado; existen 2 tipos de muestreo, el simple y el compuesto (APHA/AWWA/WEF, 2012, p. 3).

2.5.1. Muestreo simple

El muestreo simple se lo realiza en un solo instante de tiempo y analizadas por separado y se lo usa para medir, y apreciar las variaciones de parámetros como: cloro residual, pH, gases disueltos, aceites y grasas, entre otros; se las usa como una guía para conocer la composición del universo que se está evaluando (APHA/AWWA/WEF, 2012, p. 44).

2.5.2. Muestreo compuesto

En el muestreo compuesto se toma en cuenta una mayor cantidad de variables, por lo que otorgan resultados más útiles para estimar la cantidad de materiales o residuos descargados en un periodo largo de tiempo; para este tipo de muestreo se toma en cuenta las siguientes variables como son: el caudal de salida, caudal promedio, volumen final de muestra y número de muestras para constituir la muestra total (APHA/AWWA/WEF, 2012, p. 45).

Para tomar la muestra, si el caudal donde se realiza esta actividad es constante, la muestra será conformada por porciones uniformes en un intervalo de tiempo regular (APHA/AWWA/WEF, 2012, p. 45). Para calcular estas porciones se usa la siguiente ecuación.

$$V_i = \frac{Q_i * V}{Q_p - N} \quad \text{Ecuación 13.}$$

Donde:

V_i : Volumen de cada alícuota de cada muestra (mL)

Q_i : Caudal al momento de tomar la muestra ($\frac{L}{s}$)

V : Volumen total que se va a tomar (mL)

Q_p : Caudal promedio durante el período de muestreo ($\frac{L}{s}$)

N : Numero de muestras que toma para completar la muestra

3. Capítulo III. Metodología

Este proyecto es un trabajo experimental, que se desarrollará en el laboratorio de aguas de la Universidad de Las Américas, Sede Queri. Para llevar a cabo la investigación se trabajó con agua de drenaje ácido de mina proveniente del cantón Portovelo, provincia del El Oro.

3.1. Dimensionamiento y construcción del sistema

3.1.1. Diseño de las condiciones físicas del sistema

Se determinó la longitud de la columna, mediante revisión de información bibliográfica y recomendaciones de autores asumiendo un caudal de diseño (Metcalf & Eddy, 2003).

3.1.2. Construcción de la columna de remoción

Se construyó la columna en función de las variables antes obtenidas y los criterios de diseño.

3.2. Recolección y caracterización de la muestra de drenaje ácido de mina

Para recolectar el agua de drenaje ácido, se realizó una salida de campo Zaruma-Portovelo, el día 9 de noviembre del 2017, en la cual, se visitó el proyecto minero y se procedió a localizar el punto de salida de agua de drenaje ácido para recolectar las muestras.

3.2.1. Recolección de la muestra para caracterización

Se colectó una muestra compuesta, el cual consistió en tomar 1L de agua en un envase ambar en intervalos de tiempo, se recolectó 250mL cada 30 minutos; se

almacenó la muestra en un cooler y se la trasladó al laboratorio (Chavez Solution) certificado en menos de 24 horas.

Para calcular las alícuotas de cada muestra se aplicó la siguiente ecuación 13.

$$V_i = \frac{Q_i * V}{Q_p * N} \quad \text{Ecuación 13.}$$

Donde:

V_i : Volumen de cada alícuota de cada muestra (mL)

Q_i : Caudal al momento de tomar la muestra ($\frac{L}{s}$)

V : Volumen total que se va a tomar (mL)

Q_p : Caudal promedio durante el período de muestreo ($\frac{L}{s}$)

N : Numero de muestras que se toma para completar la muestra

3.2.2. Recolección de la muestra para ensayos de reducción

Para los ensayos de reducción se tomaron 120 litros, en 6 envases plasticos, cada uno de 20 litros. Finalmente, se almacenó las muestras tomadas para posteriormente realizar los experimentos (APHA/AWWA/WEF, 2012).

3.2.3. Normativa vigente para comparar con el análisis de laboratorio

Los resultados de los análisis realizados por el laboratorio fueron compados con la tabla 10 del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria.

Tabla 3.

Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
------------	----------------	--------	--------------------------

Aceites y Grasas	Sust. Solubles en hexano	mg/L	30.0
Alkil mercurio		mg/L	No detectable
Aluminio	Al	mg/L	5.0
Arsénico total	As	mg/L	0.1
Bario	Ba	mg/L	2.0
Boro Total	B	mg/L	2.0
Cadmio	Cd	mg/L	0.02
Cianuro	CN	mg/L	0.1
Cinc	Zn	mg/L	5.0
Cloro Activo	Cl	mg/L	0.5
Cloroformo	Ext. Carbon cloroformo ECC	mg/L	0.1
Cloruros	Cl	mg/L	1000
Cobre	Cu	mg/L	1.0
Cobalto	Co	mg/L	0.5
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100ml	10000
Color real	Color real	Unidades de color	--
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/L	0.2
Cromo hexavalente	Cr+6	mg/L	0.5
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO5	mg/L	100
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/L	200
Estaño	Sn	mg/L	5.0
Fluoruros	F	mg/L	5.0
Fósforo total	P	mg/L	10.0

Hierro total	Fe	mg/L	10.0
Hidrocarburos totales de petróleo	TPH	mg/L	20.0
Manganeso total	Mn	mg/L	2.0
Materia Flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/L	0.005
Niquel	Ni	mg/L	2.0
Nitrógeno amoniaco	N	mg/L	30.0
Nitrógeno Total Kjedahl	N	mg/L	50.0
Compuestos Organoclorados	Organoclorados totales	mg/L	0.05
Compuestos organofosforados	Organofosforados totales	mg/L	0.1
Plata	Ag	mg/L	0.1
Plomo	Pb	mg/L	0.2
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/L	0.1
Sólidos suspendidos	SST	mg/L	130
Sólidos totales	ST	mg/L	1600
Sulfatos	SO4	mg/L	1000
Sulfuros	S-2	mg/L	0.5
Temperatura	°C		Condición natural
Tensoactivos	Activas al azul de metileno	mg/L	0.5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/L	1.0

Tomado de (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2015, p. 99)

3.3. Cálculo de los parámetros físicos e hidráulicos del sistema de piedra caliza

3.3.1. Granulometría del sistema de reducción

Se utilizaron tres granulometrías distintas para realizar el experimento, basándose en autores y en el criterio que se ha obtenido en el transcurso de la carrera; para obtener estas tres granulometrías distintas se tamizó el material con tamices de 30mm, 20mm y 10mm.

3.3.2. Cálculo de Densidad Real

Para el cálculo de la densidad real se pesó una cantidad de piedra caliza, usando una balanza de precisión, luego, en una probeta se colocó un volumen conocido de agua y para finalizar se colocó la piedra caliza pesada dentro de la probeta con el volumen de agua conocido.

El volumen que aumentó dentro de la probeta será el volumen que ocupa la piedra caliza dentro de la probeta. Para calcular la densidad real se usó la ecuación 8.

$$\rho_r = \frac{m}{V_f - V_i} \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde:

m: Cantidad conocida de piedra caliza (g)

V_i : Volumen de agua conocido (ml)

V_f : Volumen final, luego de colocar la cantidad de piedra caliza (ml)

ρ_r : Densidad real ($\frac{g}{ml}$)

3.3.3. Cálculo de Densidad Aparente

Para el cálculo de la densidad aparente se pesó la cantidad exacta de piedra caliza que entra dentro de la columna de tratamiento, así mismo, se calculó el volumen de la columna de tratamiento (solo el volumen donde está la piedra caliza).

Para calcular la densidad aparente se usó la ecuación 9.

$$\rho_a = \frac{m}{V} \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde:

m: Masa de piedra caliza que entra dentro de la columna de tratamiento (kg)

V: Volumen de la columna de tratamiento (m^3)

ρ_a : Densidad aparente ($\frac{kg}{m^3}$)

3.3.4. Cálculo de Porosidad

Para calcular la porosidad se tomó en cuenta los valores de densidad aparente y densidad real. Y se calculó con la ecuación 10.

$$V_v = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) * 100 \quad \text{Ecuación 10.}$$

Donde:

ρ_a : Densidad aparente ($\frac{kg}{m^3}$)

ρ_r : Densidad real ($\frac{kg}{m^3}$)

V_v : Porosidad (%)

3.3.5. Cálculo de Conductividad Hidráulica

Para calcular la conductividad hidraulica de la columna de tratamiento, se usó un tanque elevado con un flujo de agua constante. El tanque elevado se conectó a la columna de tratamiento por medio de tubería, de tal forma que el flujo de agua ingrese por la parte inferior de la columna, que atraviese por el medio granular de piedra caliza, y que salga por la parte superior. Luego, se midió el caudal de salida, y se determinó la variación de carga hidráulica. Además se calculó el área transversal del sistema de tratamiento y se midió el espesor del medio de piedra caliza. Con estos datos se uso la ecuación 11.

$$K = \frac{Q*L}{A*(\Delta h)} \quad \text{Ecuación 11.}$$

Donde:

K: Conductividad Hidraulica ($\frac{m}{s}$)

Q: Caudal de salida del sistema ($\frac{m^3}{s}$)

A: Area de la sección transversal (m^2)

Δh : Diferencia de carga hidraulica (m)

L: Distancia(m)

3.4. Aplicación de la columna de piedra caliza para obtener los tiempos de residencia

3.4.1. Diseño Experimental

Determinación de variables:

Variable dependiente

- Tiempo de residencia

Variable independiente

- Tamaño de la piedra caliza

Tabla 4.

Factores y niveles del proceso de reducción.

Niveles				
Factores	Nivel	Nivel	Nivel	Nivel
	Bajo	Medio	Alto	Combinado
Tamaño de piedra caliza	PC_1	PC_2	PC_3	PC_M

4x1=4 tratamientos

4x3 (repeticiones)=12 unidades experimentales

3.4.2. Cálculo del tiempo de residencia

Para el calcular el tiempo de residencia se colocó el medio de piedra caliza con un tamaño de grano conocido dentro del sistema, luego se usó un tanque de 20 litros de agua con flujo constante, dentro del tanque se colocó una bomba sumergible, la cual, con un caudal conocido y mediante tubería de media pulgada se encargó de ingresar el agua a la columna por la parte inferior de la misma, en esta tubería se colocó una "T"; en la parte superior de la "T" se colocó una válvula de bola, en la cual, se adheió una jeringa de 20ml con calor, dentro de la jeringa se colocó una solución de trazador y se la inyectó cuando el flujo de agua entró en régimen laminar.

Una vez que la solución de trazador llegó hacia el medio de piedra caliza se midió el tiempo que se tardó en salir de la columna de tratamiento por la parte superior, este procedimiento se repitió tres veces para cada granulometría.

3.4.3. Análisis de resultados

Se usó el ANOVA para evaluar la importancia de los factores que se ha colocado en el diseño experimental. Para esto, en el ensayo se evaluaron las medias de

las varianzas de los tiempos de residencia obtenidos con cada granulometría de piedra caliza.

Para el análisis estadístico se usó el software PAST, donde se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar si entre los resultados del diseño experimental existe o no diferencias significativas. De esta manera se eligió el mejor tratamiento (granulometría de la piedra Caliza – tiempo de residencia).

3.5. Ensayo para reducción de hierro y cobre a partir del diseño experimental

Se colocó piedra caliza con la granulometría seleccionada en el diseño experimental, y de igual forma como se realizó en los ensayos de residencia, se ingresó un caudal conocido (de agua de drenaje ácido) a la columna de remoción con una bomba sumergible, desde un tanque de 15 galones por medio de tubería de media pulgada; el agua ingresó por la parte baja de la columna teniendo contacto total con el medio granular y salió por la parte superior hacia otro tanque de 15 galones.

Una vez iniciado el proceso se esperó a que el tanque se vacíe completamente y en el tanque receptor se tomó una muestra para análisis de hierro y cobre y pH. Este procedimiento se lo realizó 3 veces midiendo concentraciones de hierro y cobre al final de cada una.

3.6. Cálculo del porcentaje de remoción de hierro y cobre con el uso del sistema de reducción

Se comparó la concentración inicial (agua de drenaje ácido traída del cantón Portovelo) y final (luego de pasar tres veces por la columna de tratamiento) de los contaminantes hierro, cobre y pH. Para esto, se utilizó figuras estadísticas con el software Microsoft Excel, con la finalidad de expresar la reducción en porcentajes y se usó la siguiente ecuación para procesar los valores obtenidos de agua de drenaje ácido inicial y tratada.

$$\%p = \frac{AMD\ in - AMD\ out}{AMD\ in} * 100 \quad \text{Ecuación 14.}$$

Donde:

%p: Porcentaje de remoción (%)

AMD in: Concentración inicial de agua de drenaje ácido (mg/L)

AMD out: Concentración final de agua de drenaje ácido (mg/L)

4. Capítulo IV. Resultados y Discusión

4.1. Dimensionamiento del sistema de reducción

Las medidas que se usaron para construir el sistema de reducción fueron las siguientes:

Tabla 5.

Parámetros con los cuales se diseñó la columna de tratamiento.

Parámetros	Unidad	Columna Piloto
Diámetro de la columna	cm	14
Longitud de la columna	cm	115
Longitud del medio granular	cm	90
Longitud de purga	cm	20
Volumen de purga	L	1.178
Volumen de la columna	L	22.08
Caudal	mL/min	200

Adaptado de (Metcalf & Eddy, 2003, p. 1159).

El diseño de la columna de tratamiento con piedra caliza se lo muestra en la siguiente figura.

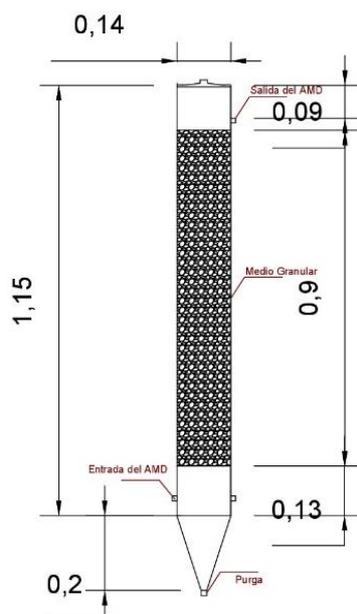


Figura 2. Diseño de la columna de tratamiento, con las medidas expresadas en metros.

Vale recalcar que tanto la entrada como la salida del sistema de tratamiento es de ½ pulgada.

4.2. Muestreo y análisis de los contaminantes

4.2.1. Muestreo Compuesto

Para saber el valor de las alícuotas se ocupó la ecuación 13 con las siguientes variables.

$$V_i = \frac{Q_i * V}{Q_p * N}$$

Ecuación 13.

Tabla 6.

Valores que se tomaron en campo y empleados para cálculo de las alícuotas para conformar la muestra total

Parámetro	Unidad	Valor
-----------	--------	-------

Qi: Caudal al momento de tomar la muestra	L/s	0.075
V: Volumen total que se va a tomar	mL	1000
Qp: Caudal promedio	L/s	0.075
Numero de muestras que conformaron la muestra total	--	4

Usando estos valores en la ecuación 12 tenemos lo siguiente:

$$V_i = \frac{0.075 \cdot 1000}{0.075 \cdot 4} = 250 \text{ mL} \quad \text{Ecuación 12.}$$

Una vez realizado el cálculo se procedió a tomar 250 ml en intervalos de tiempo de 30 minutos en un periodo de 2 horas (APHA/AWWA/WEF, 2012, p. 30).

4.2.2. Comparación con normativa Nacional

Como se indicó anteriormente, se realizó una salida de campo al sitio de estudio, donde se fijó un solo punto para el muestreo compuesto, el cual, fue a la salida de la mina; este lugar se tomó en cuenta debido a que es un punto estratégico, ya que, aquí llega toda el agua por un drenaje que está construido en toda la mina; así de esta forma se puede tomar una muestra del proceso de extracción. Los resultados se presentan a continuación.

Tabla 7.

Informe de resultados de laboratorio químico ambiental, donde se compara la concentración del agua muestreada con el Texto Unificado de Legislación Ambiental, libro VI, Anexo 1, tabla 12.

Tipo de muestras	Agua de Drenaje ácido
------------------	-----------------------

Código de Muestreo NI						
Condiciones ambientales		TEMP (°C)	AMB	NI		
		Humedad (%)		NI		
Coordenadas del punto de muestreo				NI		
Técnico responsable de la toma de muestra				Felipe Loayza		
Tipo de toma de muestra				Compuesta		
Fecha de toma de muestra				9/11/2017		
Hora de toma de muestra				13:15		
Fecha de ingreso de muestra				10/11/2017		
Hora de ingreso				17:30		
Fecha de análisis				10/11/2017 - 15/11/2017		
Analista responsable de elaboración de informe				Carla Molina		
Parámetro	Unidad	Valor	Max	Métodos	Concentración	Cumple
		Permisible				
Hierro	mg/L	10,0		PEE19/SM-Ed-22 3111 B	85,6	NC
Potencial de hidrógeno	ml/L	6 a 9		PEE33/SM-Ed-22, H+B	4500 1,99	NC
Cobre	mg/L	1,0		PEE17/SM-Ed-22, 3111 B	2,7	NC

El valor de pH de 1.99 que tenemos en el agua de drenaje ácido se lo asocia a los procesos de oxidación de los minerales, que se encuentran especialmente en minas metálicas como pueden ser piritas o carbón; además en la muestra se observan precipitados de color amarillo-marrón que como indica Lottermoser, (2010, p. 21) son típicos en los procesos donde existe agua de drenaje ácido.

El análisis de los metales de estudio (Fe y Cu), indican altas concentraciones de los mismos, esto se relaciona de manera directa con la oxidación de la pirita FeS_2 , debido a que este mineral en contacto con el agua y el oxígeno atmosférico (Santomartino & Webb, 2007b, p. 2435).

4.3. Parámetros físicos de la piedra caliza e hidráulica de la columna de reducción

4.3.1. Tamizado de la piedra caliza

Se usó tamices de 30mm, 20mm y 10mm, en los cuales se tamizó 170kg de piedra caliza para tener como resultado 40 kg de caliza con una granulometría entre 25mm y 30mm, 40kg de caliza con granulometría entre 15mm y 20mm y 80kg de caliza con granulometría entre 5mm y 10mm. Vale recalcar que se tomaron rangos debido a que el proceso se lo realizo de manera manual sin ningún equipo que realice esta labor, como por ejemplo un molino industrial con motor.

Tabla 8.

Granulometría de la piedra caliza y la cantidad que se usó.

Cantidad	Granulometría	Abertura de malla
40 kg	Entre 25 mm y 30 mm	30mm
40 kg	Entre 15 mm y 20 mm	20mm
80 kg	Entre 5 mm y 10 mm	10mm

4.3.2. Densidad real

Se calculó la densidad real para cada granulometría distinta usando la ecuación 8.

$$\rho_r = \frac{\text{peso de solido seco}}{\text{Volumen de solidos-volumen liquido}} \quad \text{Ecuación 8.}$$

Para usar esta ecuación se estandarizaron los datos, es decir, siempre se tomó 300mL en la probeta y de igual forma siempre se pesó 150g de piedra caliza con las diferentes granulometrías.

Tabla 9.

Valores calculados para obtener la densidad real de cada medio granular

Granulometría	Peso de Volumen solido seco	de Volumen de líquido	Volumen de solido	Densidad real
----------------------	------------------------------------	------------------------------	--------------------------	----------------------

Entre 25 mm y 30 mm	150g	300mL	352mL	2.88g/mL
Entre 15 mm y 20 mm	150g	300mL	357mL	2.63g/mL
Entre 5 mm y 10 mm	150g	300mL	357mL	2.63g/mL

4.3.3. Densidad aparente

Se calculó la densidad aparente para cada granulometría distinta usando la ecuación 9.

$$\rho_a = \frac{\text{peso de solido seco}}{\text{volumen del cilindro}} \quad \text{Ecuación 9.}$$

Para esta ecuación se uso el volumen de la columna, es necesario aclarar que unicamente se calculo el volumen donde se colocó el medio granular.

Tabla 10.

Valores calculados para obtener la densidad aparente de cada medio granular.

Granulometría	Peso del solido seco	Volumen del cilindro	Densidad aparente
Entre 25 mm y 30 mm	21,4 kg	0.015m ³	1426.6 kg/m³
Entre 15 mm y 20 mm	21,1 kg	0.015m ³	1406.6 kg/m³
Entre 5 mm y 10 mm	21,3 kg	0.015m ³	1420 kg/m³

4.3.4. Porosidad

Se calculó la porosidad para cada granulometría distinta usando la ecuación 10.

$$V_v = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) * 100$$

Ecuación 10.

Para calcular la porosidad se usaron los datos calculados anteriormente.

Tabla 11.

Resultados y datos usados para calcular la porosidad de cada medio granular.

Granulometría	Densidad aparente	Densidad real	Porosidad
Entre 25 mm y 30 mm	1426.6 kg/m ³	2880 kg/m ³	50.5 %
Entre 15 mm y 20 mm	1406.6 kg/m ³	2630 kg/m ³	46.5 %
Entre 5 mm y 10 mm	1420 kg/m ³	2630 kg/m ³	45.9 %

4.3.5. Conductividad hidráulica

Se calculó la conductividad hidráulica para cada granulometría distinta usando la ecuación 11.

$$K = \frac{Q * L}{A * (\Delta h)}$$

Ecuación 11.

Para el cálculo de conductividad hidráulica se usaron los siguientes valores obtenidos en laboratorio.

Tabla 12.

Datos obtenidos en campo para calcular la conductividad hidráulica de cada medio granular.

Granulometría	Longitud	Área de la sección transversal	Caudal de salida	Carga hidráulica
----------------------	-----------------	---------------------------------------	-------------------------	-------------------------

Entre 25 mm y 30 mm	0.9m	0.016m ²	8.5x10 ⁻⁵ m ³ /s	0.49m
Entre 15 mm y 20 mm	0.9m	0.016m ²	9.33x10 ⁻⁵ m ³ / s	0.54m
Entre 5 mm y 10 mm	0.9m	0.016m ²	9.4x10 ⁻⁵ m ³ /s	0.61m

Tabla 13

Resultados de conductividad hidráulica tomando los datos anteriores.

Granulometría	Conductividad hidráulica
Entre 25 mm y 30 mm	0,00975 m/s
Entre 15 mm y 20 mm	0,00972 m/s
Entre 5 mm y 10 mm	0.00866 m/s
Granulometría combinada	0.00935 m/s

Para terminar este ensayo se colocaron diferentes estratos de piedra caliza, es decir, se colocó 30 cm de granulometría de 5mm a 10mm, luego, 30cm de granulometría entre 15mm a 20mm y para finalizar, 30cm de granulometría entre 25mm a 30mm, y se usó la siguiente ecuación para calcular la conductivada hidraulica de ese medio.

$$K_v = \frac{m_t}{\sum \left(\frac{m_i}{k_i} \right)} \quad \text{Ecuación 15.}$$

Donde:

mi: se refiere al espesor de cada medio

ki: indica la conductividad hidráulica de cada medio

mt: expresa el espesor total

4.4. Resultados del diseño experimental y análisis estadístico

4.4.1. Diseño experimental

Los resultados del diseño experimental fueron los siguientes:

Tabla 14.

Resultados que se obtuvo luego de realizar el diseño experimental.

Granulometría	Repeticiones [min]		
	R_1	R_2	R_3
Entre 25 mm y 30 mm	16,55	19,44	20,10
Entre 15 mm y 20 mm	15,44	10,33	11,29
Entre 5 mm y 10 mm	11,56	13,20	12,44
Granulometría combinada	14,18	16,46	13,48

Los resultados mostrados en la tabla 14 son los tiempos de residencia que se obtuvieron con cada granulometría, estos tiempos de residencia fueron calculados con el mismo caudal de entrada al sistema que fue de 200 mL/min.

4.4.2. Velocidad lineal del sistema

Para comprobar los datos de trazabilidad del sistema se ocupó la siguiente formula:

$$v = \frac{vol}{A * \emptyset} \quad \text{Ecuación 16.}$$

Donde:

Vol: volumen que recorre el contaminante

A: Área de la sección transversal del sistema de reducción

\emptyset : porosidad del sistema de reducción

Tabla 15.

Expresado en m/min la velocidad lineal de todos los sistemas puestos a evaluación.

Granulometría	Tiempo de residencia (min)	Velocidad lineal (m/min)
Entre 25 mm y 30 mm	16,55	0.108
Entre 15 mm y 20 mm	15,44	0.12
Entre 5 mm y 10 mm	11,56	0.16

4.4.3. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los resultados obtenidos anteriormente se usó el software Past, para encontrar diferencias significativas entre tratamientos realizando un análisis de varianza.

Tabla 16.

Diferencias entre tratamientos usando el método Kruskal – Wallis test en el software Past.

H(Chi²)	8.128
Hc (Tie Corrected)	8.128
p(same)	0.04344

El valor de significancia es menor a 0.05 por lo cual, hay diferencias significativas entre tratamientos.

Como estadísticamente existen diferencias significativas, se tomó el primer tratamiento con granulometría de 5mm a 10mm, ya que, en este el tiempo de residencia es menor, y que presenta una curva más constante que el resto, como lo explica la figura 3.

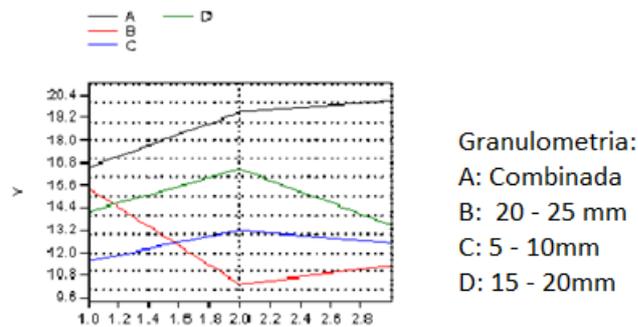


Figura 3. Gráfico de los Tiempos de Residencia según las repeticiones realizadas.

4.5. Implementación de la columna de piedra caliza

El sistema de reducción se lo implemento de la siguiente manera, donde se usó una columna de flujo ascendente abierta a la atmosfera, para maximizar la oxidación del Fe^{2+} como ya lo dijo Rotting, Ayora, et al., (2008, pp. 9370–9372).

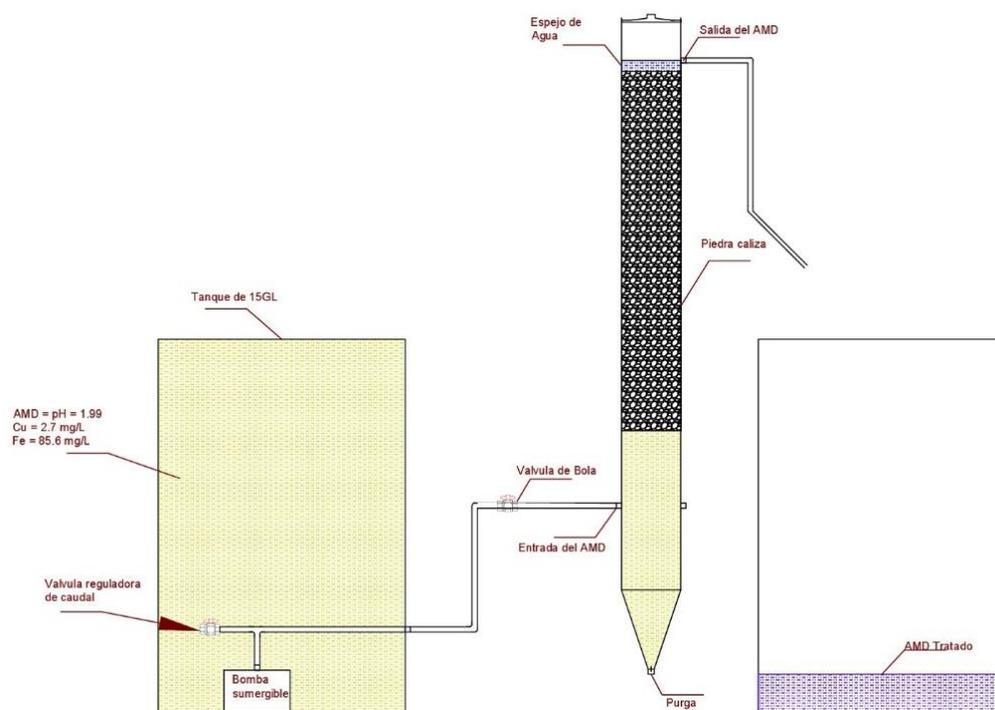


Figura 4. Diseño del sistema de tratamiento

El agua de drenaje ácido entró por la parte inferior como se especifica en la figura 4, y salió de igual forma por la parte superior, la entrada se encuentra a 24 cm de la purga y a 8 cm del medio granular de piedra caliza.

Se usó una bomba sumergible marca Evans de 23 L/min de flujo máximo, para esto se colocó la válvula reguladora de caudal para lograr tener un flujo constante de 200 mL/min, además se usaron 2 tanques de 15 galones para colocar el agua a tratar y el agua tratada.

El medio de piedra caliza que se usó fue de 5 mm a 10 mm que fue el que presentó mayor tiempo de residencia en el experimento.

4.5.1. Concentración final de los contaminantes

Con una bomba sumergible se bombearon 15 galones de agua de drenaje ácido desde un tanque del mismo volumen que ingreso a la columna de piedra caliza con un caudal de 200mL/min y se receptaron en un tanque de 15 galones. Este proceso se lo realizó 3 veces y se tomaron 500mL de agua del tanque receptor para su posterior análisis, al final del proceso.

Tabla 17.

Informe de resultados de laboratorio químico ambiental, donde se compara la concentración del agua muestreada con el Texto Unificado de Legislación Ambiental, libro VI, Anexo 1, tabla 12

Tipo de muestras	Agua tratado		
Código de Muestreo	NI		
Condiciones ambientales		TEMP (°C)	AMB NI
		Humedad (%)	NI
Coordenadas del punto de muestreo			NI
Técnico responsable de la toma de muestra			Felipe Loayza
Tipo de toma de muestra			Compuesta
Fecha de toma de muestra			03/12/2017
Hora de toma de muestra			9:15
Fecha de ingreso de muestra			03/12/2017
Hora de ingreso			9:30
Fecha de análisis			04/12/2017 - 14/12/2017
Analista responsable de elaboración de informe			Carla Molina

Parámetro	Unidad	Valor Max Permissible	Métodos	Concentración	Cumple
Hierro	mg/L	10,0	PEE19/SM-Ed-22 3111 B	0,017	C
Potencial de hidrógeno	de ml/L	6 a 9	PEE33/SM-Ed-22, 4500 H+B	7,24	C
Cobre	mg/L	1,0	PEE17/SM-Ed-22, 3111 B	0,025	C

4.5.2. Porcentaje de reducción de los contaminantes

4.5.2.1. Cobre (Cu)

La concentración inicial de Cu en mg/L fue de 2.7 como lo indica en la tabla 7, mientras que el valor final luego del tratamiento fue de 0.025 mg/L. El porcentaje de cobre que se ha removido es del 99.1%.

Según Macías, (2010, p. 28) la remoción de cobre se encuentra directamente relacionado con el aluminio y el hierro, debido a existen procesos de co-precipitación con los precipitados de Fe y Al, esto quiere decir que, en las partículas precipitadas de hidróxido de hierro y aluminio también precipita el Cobre por un proceso de adsorción de estas partículas precipitadas en forma de sulfato de cobre. Estudios indican que con el uso de tratamientos pasivos como la piedra caliza el cobre es removido del 90 al 99 % con columnas de tratamiento de 90 cm y porosidad de un 70 % (Rotting, Caraballo, et al., 2008, pp. 1661–1666).

La concentración de cobre se encuentra por debajo el límite máximo permisible normado por la legislación ambiental nacional.

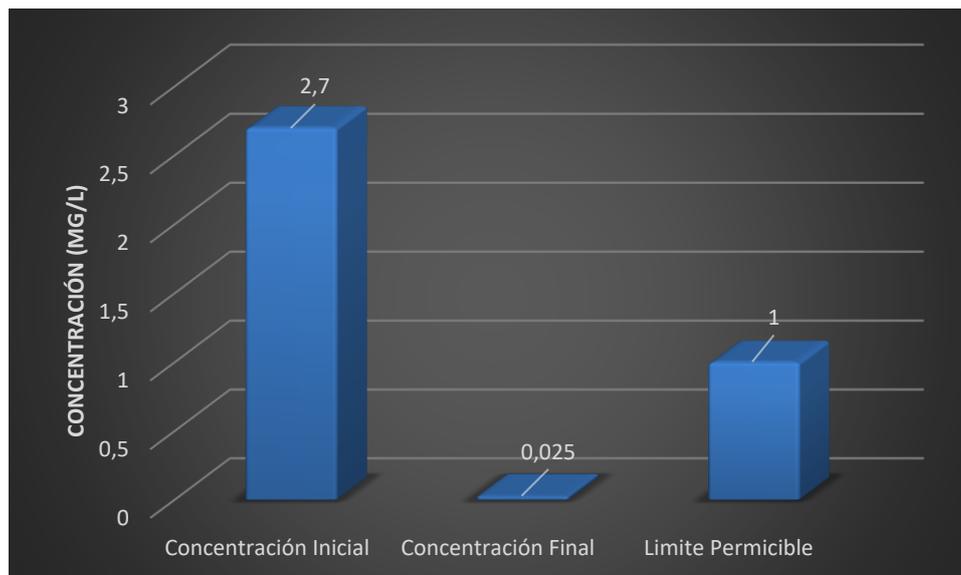


Figura 5. Comparación inicial y final de la concentración de Cu.

4.5.2.2. Hierro (Fe)

La concentración inicial de Fe en mg/L fue de 85.6 como lo indica en la tabla 7, mientras que el valor final luego del tratamiento fue de 0.017 mg/L. Usando la ecuación 14 se calculó el porcentaje de remoción que fue del 99.9%.

Como menciona Caraballo et al., (2009, p. 2309), la remoción de hierro se puede generar por varios procesos de oxidación, precipitación y formación de un mineral llamado Goethita ($\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$).

La remoción de hierro se da al momento de que el agua entra en contacto con la piedra caliza, ya que la caliza se disuelve y el pH aumenta lo que favorece a los procesos de precipitación de metales trivalentes; existen estudios donde se demuestra que estos tratamientos tienen una eficiencia del (71 al 99) % debido a que existe una gran capacidad en el cambio estructural de la caliza (Bernier et al., 2000, p. 514).

La concentración de hierro se encuentra por debajo el límite máximo permisible normado por la legislación ambiental nacional.

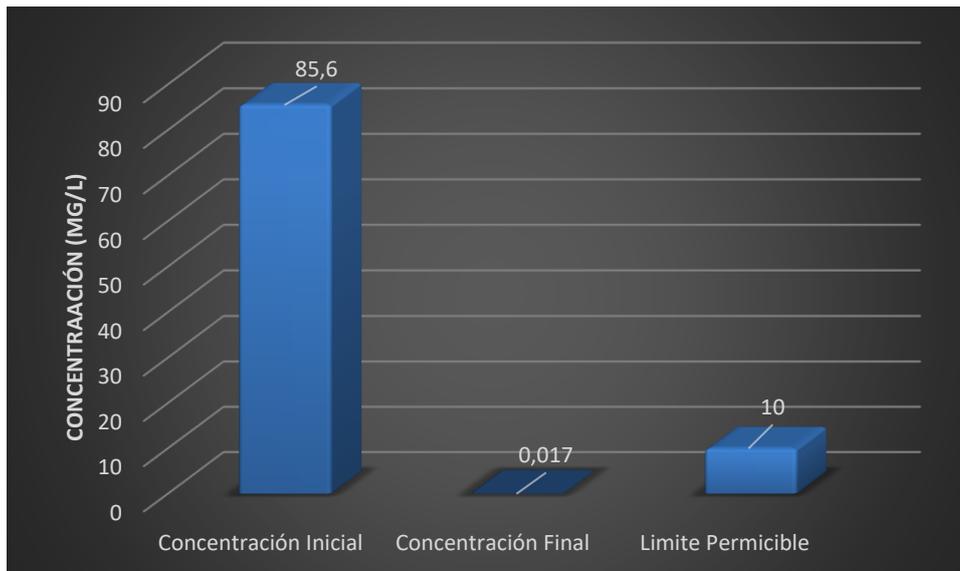


Figura 6. Comparación inicial y final de la concentración de Fe.

4.5.3. Dispersión mecánica de hierro y cobre en el sistema

Para conocer el flujo másico de contaminante, en este caso el hierro se usa la siguiente fórmula para conocer los procesos de transporte del material en el sistema.

$$J_{dis,m} = -n_e \times A[L^2] \times \alpha [L] \times v\left[\frac{L}{T}\right] \times \frac{\Delta C\left[\frac{M}{L^3}\right]}{L[L]} \quad \text{Ecuación 17.}$$

Donde,

n_e : Porosidad efectiva del sistema multiplicada por un factor de 0.8

A : Área de la sección transversal de la columna de tratamiento

α : Dispersividad de 0.1m

v : Velocidad lineal

ΔC : Variación de concentración del contaminante inicial y final

L : Altura de la columna de tratamiento

Tabla 18.

Valores calculados para calcular la dispersión mecánica del sistema.

Variable	Unidad	Valor
n_e	---	0.45
A	m^2	0.016
α	m	0.1
v	$\frac{m}{min}$	0.16
ΔC Fe	$\frac{mg}{m^3}$	85583
ΔC Cu	$\frac{mg}{m^3}$	2675
L	m	0.9
$J_{dis,m}$ Fe	$\frac{mg}{min}$	8.7
$J_{dis,m}$ Cu	$\frac{mg}{min}$	0.27

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El uso de piedra caliza a escala de laboratorio demostró que puede remover los metales como el hierro y el cobre del agua de drenaje ácido, en altas cantidades en base a los resultados que se han obtenido.

Existe un espesor menor a 1mm que separa la piedra caliza y el revestimiento, por lo que el precipitado se puede eliminar fácilmente de la piedra caliza mediante agitación, lo que permite que el sistema de piedra caliza vuelva a funcionar a su máximo potencial y mantener una alta tasa de neutralización.

Los sistemas pasivos son un método efectivo de bajo mantenimiento para tratar las descargas de agua de drenaje ácido. Estos sistemas son especialmente eficientes para reducir la acidez, el hierro y el cobre en este caso; debe recordarse que AMD ha afectado negativamente a corrientes naturales durante años y que todos los precipitados de metales pesados acumulados se demorarán en disiparse de los sustratos de la corriente.

La concentración de los metales puestos a estudio como: hierro y cobre, que fueron medidos luego del tratamiento con piedra caliza, se encuentran ahora bajo el límite permisible establecido en la normativa ambiental nacional vigente en concordancia con el Texto Unificado de Legislación Ambiental, libro VI, Anexo 1, tabla 12.

5.2. Recomendaciones

Realizar un tratamiento primario de sedimentación, ya que, este tipo de agua lleva consigo alta carga de sólidos lo que genera que el sistema de piedra caliza tenga menor efectividad en el tiempo, además para terminar se recomienda realizar un tanque decantador debido a la generación de precipitados de Fe y Cu.

Seguir con el estudio, y probar con otros materiales como por ejemplo la zeolita que por su gran capacidad de adsorción puede ser de utilidad para un tratamiento secundario.

Realizar la fase experimental en campo, para tener un flujo de agua de drenaje ácido continuo para calcular otros parámetros como por ejemplo el tiempo de vida útil del sistema.

Investigar sobre el posible aprovechamiento de los residuos que deja este tratamiento pasivo.

REFERENCIAS

- Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento. Instituto Geológico Y Minero de España, 640, 51 - 52. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00065-9).
- Almonte, P. (2013). Aguas ácidas en minería : La amenaza fantasma. Minería Chilena, 385, 30–33. <https://doi.org/10.1007/s10230-009-0078-4>
- APHA/AWWA/WEF. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Standard Methods, 541. <https://doi.org/ISBN9780875532356>
- Arana-Zegarra, M. (2009). El caso del derrame de mercurio en choropampa y los daños a la salud en la población rural expuesta. Revista Peruana de Medicina Experimental Y Salud Publica, 26(1), 113–118.
- Banco Central del Ecuador. (2015). La minería ecuatoriana. Ecuador. Recuperado el 17 de Septiembre del 2017 de: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero012015.pdf>
- Banco Central del Ecuador. (2017). Reporte de minería. Recuperado el 15 de Agosto del 2017 de: <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero012015.pdf>
- Bernier, L. R., Aubertin, M., Dagenais, A., & Bussière, B. (2000). Limestone Drain Design Criteria in AMD Passive Treatment: Theory , Practice and Hydrogeochemistry Monitoring at Lorraine Mine Site , Temiscamingue ., 9(514). Recuperado el 10 de Octubre del 2017 <http://www.polymtl.ca/enviro-geremi/pdf/articles/LimestonedrainsLorraineSite.PDF>
- Bouysse-Cassagne, T. (2005). Las minas del centro-sur andino, los cultos prehispánicos y los cultos cristianos. Bulletin de l'Institut Français D'études Andines, 34(34 (3)), 443–462.

<https://doi.org/10.4000/bifea.4988>

Brenner, F. J., & Busler, S. (2004). DRAINAGE AND THEIR IMPACT ON RECEIVING STREAMS. World Water & Environmental Resources Congress 2003 World, (724), 1–8.

Caraballo, M. A., Rötting, T. S., Macías, F., Miguel, J., & Ayora, C. (2009). Applied Geochemistry Field multi-step limestone and MgO passive system to treat acid mine drainage with high metal concentrations. Applied Geochemistry, 24(12), 2301–2311. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.007>

Carrere, R. (2004). Minería: Impactos sociales y ambientales. Recuperado el 15 el Noviembre del 2017 de: <http://www.wrm.org.uy/oldsite/deforestacion/mineria/texto.pdf>

Chaparro, T. (2015). Drenajes Ácidos de Mina Formación y Manejo. ESAICA, 1, 53–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Chatwin, T., Ferguson, K., Verburg, R., & Bezuidenhout, N. (2009). The Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide). Springer, 28, 305–310. <https://doi.org/10.1007/s10230-009-0078-4>

Delgado, J. (2012). Estudio de la Contaminación por Metales Pesados en la Cuenca Baja del Río Guadiana, 57–59. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>

Guerrero, R. (2012). Territorialidad y conflicto, 19(33), 89–113. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.007>

Hentschel, T. (2002). Global Report on Artisanal & Small-Scale Mining. Mining, Minerals and Sustainable Development, (70), 67. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

INEC. (2010). Fascículo provincial El Oro. Recuperado el 17 Noviembre del 2017 de: http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/el_oro.pdf

- Instituto Nacional Geológico Minero Metalúrgico del Ecuador. (2015). PROGRAMA DE MEJORAMIENTO DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO DE LA PEQUEÑA MINERÍA Y MINERÍA ARTESANAL.
- López Pamo, E., Aduvire, O., & Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: Estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico Y Minero*, 113(1), 3–21.
- Lottermoser, B. G. (2010). *MineWastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts (Third Edit)*. Australia: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>
- Lynch, M. (2014). Limestone. Recuperado el 26 Noviembre del 2017 de: www.uky.edu/KGS
- Macías, F. (2010). Estudio mineralógico y geoquímico de la optimización de un sistema de tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina con alta carga metálica. UNiversidad de Huelva. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- MAE. (2017). PROYECTO DE REPARACIÓN AMBIENTAL Y SOCIAL – PRAS. Recuperado el 15 Noviembre del 2017 de: <http://pras.ambiente.gob.ec/documents/228536/448248/k.+Proyecto+de+Remediaci%C3%B3n+Ambiental+y+Social+%28PRAS%29%202015.pdf/2132c3ea-8ecb-46a6-94b3-786f5b912e37>
- Metcalf, E., & Eddy, H. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 4th Edition. New Delhi, India. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(80\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(80)90067-6)
- Ministerio de Minería del Ecuador. (2016). Plan nacional de desarrollo del sector minero. Recuperado el 20 Diciembre del 2017 de: <http://www.mineria.gob.ec/plan-nacional-de-desarrollo-del-sector-minero/>
- Ministerio del Ambiente. (2013). Sistema Nacional De Control Forestal, Recuperado el 8 Diciembre del 2017 de: <http://www.ambiente.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2015/07/CONTROL-FORESTAL.pdf

Ministerio del Ambiente. (2014). Ordenamiento Ambiental Integral en la cuenca del río Puyango. Recuperado el 17 Noviembre del 2017 de: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/06/1.-Documento-Programa-del-Puyango-26-11-2013.pdf>

Morin, K. A., & Hutt, N. M. (2001). Relocation of net-acid-generating waste to improve post-mining water chemistry. *Waste Management*. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00065-9)

Nyquist, J., & Greger, M. (2008). A field study of constructed wetlands for preventing and treating acid mine drainage. *Ecological Engineering*, 35, 630–642. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.10.018>

Rotting, T. S., Ayora, C., & Carrera, J. (2008). Improved Passive Treatment of High Zn and Mn Concentrations Using Caustic Magnesia (MgO): Particle Size Effects. *Environ. Sci. Technol*, 42(24), 9370–9377. <https://doi.org/10.1021/es801761a>

Rotting, T. S., Caraballo, M. A., Ayora, C., Serrano, J. A., & Carrera, J. (2008). Field application of calcite Dispersed Alkaline Substrate (calcite-DAS) for passive treatment of acid mine drainage with high Al and metal concentrations. *Applied Geochemistry*, 23, 1660–1674. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.02.023>

Santomartino, S., & Webb, J. A. (2007a). Estimating the longevity of limestone drains in treating acid mine drainage containing high concentrations of iron. *Applied Geochemistry*, 22(11), 2344–2361. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.04.020>

Santomartino, S., & Webb, J. A. (2007b). Estimating the longevity of limestone drains in treating acid mine drainage containing high concentrations of iron. *Applied Geochemistry*, 22, 2344–2361. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.04.020>

Tissafi, M. (2011). SDC experiences with Formalization and Responsible

Environmental Practices in Artisanal and Small-scale Gold Mining in
Latin America and Asia (Mongolia).
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

ANEXOS

Anexo 1

Informe del laboratorio Chavez Solution sobre el Agua de drenaje acido muestreada en campo.

LABORATORIO ACREDITADO
SASO NORMAS
NTE 8001/REC 13035-2006

CHAVEZSOLUTIONS AMBIENTALES Cía. Ltda.
Tecnología y Soluciones Ambientales

**INFORME DE RESULTADOS
LABORATORIO QUÍMICO AMBIENTAL**

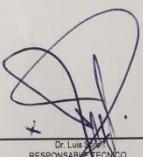
ANÁLISIS: Fisicoquímico de Muestras de Agua CIU: NA R: A0199-17
Revisión: 7
Orden de trabajo N° OT - 2017 - A - 187

CLIENTE:	N/A	TIPO DE MUESTRAS:	Agua de drenaje
EMPRESA:	N/A	CODIGO DE MUESTREO:	NI
DIRECCION:	Felipe Loayza	CUERPO RECEPTOR:	NI
TELEFONO:	0994837324	LOCALIZACION DE DESCARGA:	NI
SOLICITADO POR:	Felipe Loayza		
PROCEDIMIENTO DE TOMA DE MUESTRAS:	NA		

CONDICIONES AMBIENTALES	HUMEDAD (%):	NI
	TEM AMB (°C):	NI
COORDENADAS EN EL PUNTO DE MUESTREO		NI
TECNICO RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA		Felipe Loayza
TIPO DE TOMA DE MUESTRA (Simple/Compuesta)		Simple
FECHA DE TOMA DE MUESTRA		NI
HORA DE TOMA DE MUESTRA		NI
FECHA DE INGRESO DE MUESTRA		2017/11/10
HORA DE INGRESO		17:30
FECHA DE ANALISIS		2017/11/10 - 2017/11/15
FECHA DE REALIZACION DE INFORME		2017/11/15
ANALISTA RESPONSABLE DE ELABORACION DE INFORME		Carla Molina

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR MAX. PERMISIBLE**	METODOS	U (k=2)	Especial	
					A0199-17	CUMPLE (*)
Potencial de hidrogeno*	mg/L	NA	PEE33/ SM 56-22-4500 H+B	NA	1,09	NA
Hierro*	mg/L	NA	PEE19/SM-E3-22 3111B	NA	85,6	NA
Cobre*	mg/L	NA	PEE17 /SM-E3-22 3111B	NA	2,7	NA

(1) Las opiniones e interpretaciones que se indican a continuación, están fuera del alcance de la acreditación del SAE


 Dr. Luis Sosa
 RESPONSABLE TECNICO

NOTA: C= Cumple con la norma, NC=No cumple con la norma, NI= No indicado por el cliente, NA=No aplica
 SM= Standard Methods; EPA=Environmental Protection Agency; TNRC 1009=Texas Natural Resource Commission.
 PEE= Procedimiento Especifico de Ensayo U= Incertidumbre del Método

- El informe solo aplica a las muestras sometidas a ensayo
 - Prohibida la reproducción parcial, por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio
 - El valor reportado para aceites y grasas es expresado como menor al límite de detección.
 - Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE
 - El valor reportado para hierro y cobre se calculo con diluciones sucesivas de la muestra
 - La muestra ingresó sin conocer el tiempo de conservación. Cliente autoriza el análisis

CHAVEZSOLUTIONS AMBIENTALES Cía. Ltda.
 Tecnología y Soluciones Ambientales

Ignacio Asín NS2-27 y Antonio Román * Urb. San Fernando * Telfs.: [5932] 246-4304/224-0724 * Telefax: 227-4038 * Cel.: 098 4495850
 Email: efuentes@chavezolutions.com.ec / Web: www.chavezolutions.com.ec
 Quito - Ecuador

Página 1 de 1

Anexo 2

Informe del laboratorio Chavez Solution sobre el Agua de drenaje acido tomada luego del tratamiento.

LABORATORIO ACREDITADO
ISAC NORMA
NIT: 898184/REC: 17025-088

INFORME DE RESULTADOS
LABORATORIO QUIMICO AMBIENTAL

ANALISIS: Fisicoquímico de Muestras de Agua
NICZ: 1
Revisión: 7
Orden de trabajo N° OT - 2017 - A - 202

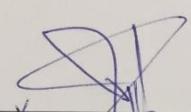
CRU: NA R: A0224-17

CLIENTE: EMPRESA: N/A DIRECCION: Felipe Loayza TELEFONO: 09984837624 SOLICITADO POR: Felipe Loayza PROCEDIMIENTO DE TOMA DE MUESTRAS: N/A	TIPO DE MUESTRAS: Agua de drenaje CODIGO DE MUESTREO: NI CUERPO RECEPTOR: NI LOCALIZACION DE DESCARGA: NI
---	--

CONDICIONES AMBIENTALES	HUMEDAD (%):	NI			
	TEM AMB (°C):	NI			
COORDENADAS EN EL PUNTO DE MUESTREO		NI			
TECNICO RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA		Felipe Loayza			
TIPO DE TOMA DE MUESTRA (Simple/Compuesta)		Simple			
FECHA DE TOMA DE MUESTRA		2017/12/03			
HORA DE TOMA DE MUESTRA		9:00			
FECHA DE INGRESO DE MUESTRA		2017/12/04			
HORA DE INGRESO		9:00			
FECHA DE ANALISIS		2017/12/04 - 2017/12/14			
FECHA DE REALIZACION DE INFORME		2017/12/14			
ANALISTA RESPONSABLE DE ELABORACION DE INFORME		Carla Molina			

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR MAX. PERMISIBLE**	METODOS	U (k=2)	Especial	CUMPLE (1)				
					A0224-17					
Potencial de hidrógeno	Unidades de pH	NA	PEE-33/ SM Ed 22-4500 H+ B	0,61%	7,24	NA				
Hierro*	mg/l	NA	PEE19/SM-Ed-22 3111B	NA	0,017	NA				
Cobre*	mg/L	NA	PEE17 /SM-Ed-22 3111B	NA	0,025	NA				

(1) Las opciones e interpretaciones que se indican a continuación, están fuera del alcance de la acreditación del SAE



Dr. Carla Molina
RESPONSABLE TECNICO

NOTA: C= Cumple con la norma, NC=No cumple con la norma, NI= No indicado por el cliente, NA=No aplica
 SM= Standard Methods; EPA=Environmental Protection Agency, TNRCC 1005=Texas Natural Resource Commissions;
 PEE= Procedimiento Especifico de Ensayo U = Incandumbre del Método

- El informe solo afecta a las muestras sometidas a ensayo
 - Prohibida la reproducción parcial, por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio
 - Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE

Ignacio Asín N52-27 y Antonio Román * Urb. San Fernando * Telfs.: [5932] 246-4304/224-0724 * Telefax: 227-4038 * Cel.: 098 4495850
 Email: gfluentes@chavezolutions.com.ec / Web: www.chavezolutions.com.ec
 Quito - Ecuador

Página 1 de 1

Anexo 3

Modelo hecho en acrílico de la columna de tratamiento.

**Anexo 4**

Salida de campo al proyecto minero en la provincia de El Oro, Cantón Portovelo.



Toma de los 120 litros de agua para tratar en laboratorio, en envases de 20 litros.



Anexo 5

Calculo de la conductividad hidráulica usando un tanque elevado.



Anexo 6

Ensayo de tiempo de residencia con un medio de granulometría combinada.

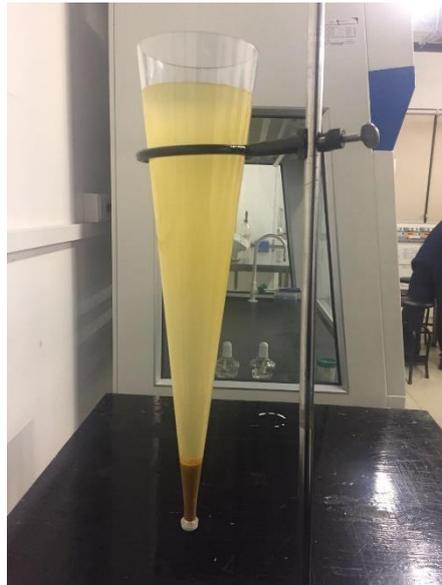


Ensayo de tiempo de residencia con el uso del trazador y con un medio de piedra caliza de 15-20mm.



Anexo 7

Ensayo con usando el cono imhoff, para saber la cantidad de sólidos en el agua a tratar y saber si es necesario un tratamiento previo o no.



Anexo 8

Diseño de toda la operación para reducir hierro y cobre, usando 2 tanques de 15 galones cada uno.



Muestra del agua tratada, que fue llevada al laboratorio Chavez Solution.



