

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**Evaluación de la estabilidad geoquímica de relaves sulfurados  
de Quiulacocha mediante el uso de cobertura biológica en  
medios no saturados con riego de efluentes domésticos a  
escala piloto - AMSAC-2018.**

**Para optar título profesional de:**

**Ingeniero Ambiental**

**Autor: Bach. Amparo Elizabeth ROBLES ZAMBRANO**

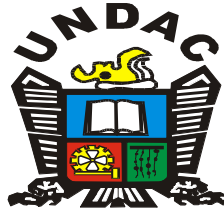
**Asesor: Mg. Luis Alberto PACHECO PEÑA**

**Cerro de Pasco-Perú-2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
AMBIENTAL**



**TESIS**

**Evaluación de la estabilidad geoquímica de relaves  
sulfurados de Quiulacocha mediante el uso de cobertura  
biológica en medios no saturados con riego de efluentes  
domésticos a escala piloto - AMSAC-2018.**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

Mg. Eleuterio Andrés ZAVALETA SANCHEZ  
**PRESIDENTE**

---

Mg. David Johnny CUYUBAMBA ZEVALLOS  
**MIEMBRO**

---

Ing. Anderson MARCELO MANRIQUE  
**MIEMBRO**

## DEDICATORIA

A mis padres, a mis hermanas, a mi familia por todo sus esfuerzos y sacrificios.

A mis docentes universitarios, mi gratitud eterna por sus enseñanzas, su ejemplo de solidaridad, trabajo, comprensión y lucha constante de superación.

A todas las personas que conocí, me cobijaron y tendieron la mano en el camino.

A Dios por bendecir mi mente, por estar conmigo en cada desafío que emprendo y por permitirme llegar hasta este momento tan significativo de mi vida.

Amparo Robles.

## RECONOCIMIENTO

Un especial agradecimiento a la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, a mis docentes y compañeros con quienes compartimos el grato deber del conocimiento, experiencias e incentivarnos a lograr muchos objetivos y metas propuestas.

A Activos Minero S.A.C. por darme la oportunidad de incluirme al proyecto de investigación para el cierre del depósito de relaves de Quiulacocha-Pasco.

Especialmente agradezco al Ing. Ben Ricaldi Tinoco - Gerente de proyectos en Activos Mineros S.A.C. quien incondicionalmente me brindó asesoramiento en cada paso del desarrollo de la investigación, además por compartir sus conocimientos e inspirarme mucha admiración.

A WSP, por brindarme información y conocimientos acerca de la investigación.

A todos los profesionales de Activos Mineros quienes con su nobleza, empatía y apoyo desinteresado facilitaron el desarrollo de esta investigación.

Amparo Robles.

## RESUMEN

Los pasivos ambientales mineros producen los drenajes ácidos de mina (DAM), que son vertimientos con bajo pH, alta concentración de metales y sulfato que son la principal causa de contaminación ambiental.

Esta investigación tuvo como propósito evaluar la estabilidad geoquímica de relaves sulfurados en un sistema piloto de prueba de barril con cobertura biológica y el riego de efluentes domésticos como biotecnología que probablemente reducirá el costo en el cierre del depósito de relaves de Quiulacocha.

En teoría los efluentes domésticos contienen alto contenido de nutrientes orgánicos y distintos tipos de microorganismos, entre ellos las bacterias sulfato reductoras.

En un barril de 1m<sup>3</sup> con una salida de lixiviados, se simuló la zona no saturada del depósito de relaves en una altura de 40 cm, cobertura biológica 30 cm utilizando 5 tipos de especies vegetales de la zona, 2 de cada tipo como *Calamagrostis vicunarum*, *Festuca dolichophylla*, *Stipa ichu* y *Distichia muscoides*. El riego se realizó interdiario con 20 litros de volumen de efluentes domésticos en una proporción de 50%, mezclándolo con agua natural, después de 24 horas del riego se monitorearon los parámetros físicos-químico de campo como pH. Temperatura, CE en  $\mu\text{m/cm}$  y STD en ppm y mensualmente se monitoreo de cambio químico de los lixiviados, comparando los resultados con LMP y ECA vigente en la legislación

peruana, esta actividad se realizó durante un periodo de 6 meses consecutivas.

Los cambios químicos en los lixiviados durante la investigación, tuvieron un rango constante de 5 a 7; la conductividad en el sistema piloto en los últimos meses llega a estabilizarse con ligereza, cumpliendo el ECA establecido, los metales presentes en el lixiviado presentan una rápida precipitación, esto es un indicador de la acción de bacterias sulfato reductoras presentes en los efluentes domésticos. La adaptación y crecimiento mensual de especies biológicas plantadas el barril es positivo y potencial visualmente. En el monitoreo físico-químico del lixiviado del barril nos muestran que cumplen con los LMP y ECA los siguientes análisis: Arsénico, Aluminio Bario, Boro, Cadmio, Cloruro, Cobalto, Cobre, Anión Fluoruro, Litio y Plomo; sin embargo, el Hierro disuelto, Hierro, Manganeso, Solitos Totales en Suspensión, Sulfato y Zinc sobrepasan los LMP y el ECA, aun así, en los últimos meses de monitoreo han disminuido la concentración en el lixiviado.

En conclusión, determinamos que la estabilización química de relaves sulfurados utilizando riego de efluentes domésticos y cobertura biológica, mejora la calidad del lixiviado al no generarse acidez, además en comparación al ECA y LMP se analizó la mejora durante los meses de investigación.

**Palabras clave:** sulfato reducción, precipitación de metales, relaves sulfurados, efluentes domésticos, especies vegetales y estabilización geoquímica.

## ABSTRACT

The mining environmental liabilities produce acid mine drainages (DAM), which are low pH, high metal and sulphate concentrations that are the main cause of environmental contamination.

The purpose of this research was to evaluate the geochemical stability of sulfurized tailings in a pilot system of barrel test with biological coverage and the irrigation of domestic effluents such as biotechnology that will probably reduce the cost of closing the tailings deposit of Quiulacochoa.

In theory, domestic effluents contain a high content of organic nutrients and different types of microorganisms, including sulfate-reducing bacteria.

In a 1m<sup>3</sup> barrel with a leachate outlet, the unsaturated zone of the tailings deposit was simulated in a height of 40 cm, 30 cm biological coverage using 5 types of plant species in the area, 2 of each type such as *Calamagrostis vicunarum*, *Festuca dolichophylla*, *Stipa ichu* and *Distichia muscoides*. Irrigation was carried out interday with 20 liters of domestic effluent volume in a 50% proportion, mixing it with natural water, after 24 hours of irrigation the physical-chemical field parameters were monitored as pH. Temperature, CE in  $\mu\text{m} / \text{cm}$  and STD in ppm and monthly monitoring of chemical change of the leachate, comparing the results with PML and ECA in force in the Peruvian legislation, this activity was carried out during a period of 6 consecutive months.

The chemical changes in the leachates during the investigation had a constant range of 5 to 7; the conductivity in the pilot system in the last few months becomes lightly stabilized, fulfilling the established ECA, the metals present in the leachate present a rapid precipitation, this is an indicator of the action of sulphate reducing bacteria present in domestic effluents. The adaptation and monthly growth of biological species planted in the barrel is positive and potential visually. In the physical-chemical monitoring of the barrel leachate, we show that the following analyzes are in compliance with the LMP and ECA: Arsenic, Aluminum Barium, Boron, Cadmium, Chloride, Cobalt, Copper, Fluoride Anion, Lithium and Lead; however, dissolved iron, iron, manganese, total solids in suspension, sulphate and zinc exceed the LMP and the ECA, even so, in the last months of monitoring have decreased the concentration in the leachate.

In the finally I determined that the chemical stabilization of sulfurized tailings using domestic effluent irrigation and biological coverage, improved the quality of the leachate due to no acidity, in addition to the ECA and LMP, the improvement was analyzed during the months of investigation.

**Keywords:** sulphate reduction, metal precipitation, sulfurized tailings, domestic effluents, plant species and geochemical stabilization.



## INDICE

DEDICATORIA .....	IV
RECONOCIMIENTO.....	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VIII
INDICE.....	X
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	XV
INDICE DE TABLAS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XVIII
CAPÍTULO I.....	21
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	21
1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	21
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	23
1.2.1. PROBLEMA GENERAL .....	23
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS .....	23
1.3. OBJETIVOS.....	24
1.3.1. OBJETIVOS GENERALES.....	24
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	24
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	24
1.5. IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN .....	27
1.6. LIMITACIONES .....	29
CAPÍTULO II.....	30
MARCO TEÓRICO .....	30
2.1. ANTECEDENTES .....	30
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	30
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES .....	36
2.2. BASES TEÓRICO-CIENTÍFICOS .....	38
2.2.1. PROBLEMATICA DE LOS PASIVOS AMBIENTALES) EN EL PERU .....	38
2.2.3. LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS Y SUS EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE.....	39

2.2.4. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE AGUAS ÁCIDAS .....	43
2.2.5. AFECTACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA .....	43
2.2.6. ETAPAS DE FORMACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS.....	43
2.2.7. ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LA RELAVERA QUIULACOCHA .	46
2.2.8. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE FORMACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS .....	47
2.2.9. SISTEMAS DE TRATAMIENTO PASIVO .....	50
2.2.10. BIORREMEDIACIÓN .....	51
2.2.11. BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS. ....	53
2.2.12. MECANISMOS DE BACTERIAS SULFATOREDUCTORAS. ...	54
2.2.13. CICLO DEL AZUFRE .....	55
2.2.14. REDUCCIÓN NATURAL EN EL CICLO DEL AZUFRE.....	55
2.2.15. ESTABILIDAD GEOQUÍMICA (EQ) .....	57
2.2.16. EFLUENTES DOMÉSTICOS .....	57
2.2.17. PARÁMETROS DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS .....	58
2.2.18. LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE ACTIVIDADES MINERO METALÚRGICAS. D.S. N°010-2010-MINAM. ....	61
2.2.19. ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA).....	62
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS .....	63
Agua:.....	63
Drenaje:.....	63
Lixiviación:.....	64
Lixiviado: .....	64
Metales:.....	64
Pasivo Ambiental Minero.....	64
pH:.....	65
2.4. HIPÓTESIS: GENÉRICOS Y ESPECÍFICOS .....	65
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL .....	65
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	65
2.5. IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES .....	66
2.5.1. VARIABLE INDEPENDIENTE .....	66
2.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE .....	66
CAPITULO III.....	67
METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN .....	67

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	67
3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	68
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	69
3.3.1. POBLACIÓN .....	69
3.3.2. MUESTRA.....	69
3.4. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN .....	70
3.4.1. UBICACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO .....	70
3.4.1.1. Clima y meteorología.....	72
3.4.1.2. Biología .....	73
3.4.1.3. Geología local y mineralogía .....	74
3.4.1.4. Hidrología .....	75
3.4.2. DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE LA PRUEBA DE BARRIL ....	75
3.4.3. UBICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE RELAVE, EFLUENTES DOMESTICOS, ESPECIES VEGETALES, TOPSOIL Y AGUA NATURAL. .....	77
3.4.3.1. UBICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE RELAVE.....	77
3.4.3.2. UBICACIÓN DE PUNTOS DE RECOLECCIÓN DE EFLUENTES DOMÉSTICOS .....	79
3.4.3.3. UBICACIÓN DE RECOLECCIÓN DE ESPECIES VEGETALES .....	81
3.4.3.4. RECOLECCIÓN DEL TOPSOIL.....	85
3.4.3.5. UBICACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA NATURAL .....	86
3.4.4. INSTALACIÓN DEL BARRIL DE PRUEBA .....	87
3.4.5. OPERACIÓN DE BARRIL Y RECOLECCIÓN DE EFLUENTES .....	101
3.4.5.1. RECOLECCIÓN Y MEZCLA DE LOS EFLUENTES .....	101
3.4.5.2. APLICACIÓN DEL RIEGO .....	103
3.4.5.3. RECOLECCIÓN DE MUESTRA DE LIXIVIADOS DEL BARRIL DE PRUEBA.....	104
3.4.6. MONITOREO DEL BARRIL .....	105
3.4.6.1. MONITOREO INTERDIARIO .....	105
3.4.6.2. MONITOREO MENSUAL .....	105
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS .....	106
TÉCNICAS .....	107
INSTRUMENTOS.....	107

3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS .....	109
3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS.....	109
CAPÍTULO IV .....	110
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	110
4.1. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO E INTERPRETACIÓN DE CUADRO .....	110
4.1.1. RESULTADOS DE PARÁMETROS DE CAMPO DE INGRESO AL SISTEMA PILOTO .....	110
Fuente: Propias del autor .....	111
4.1.2. ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CAMPO DE INGRESO AL SISTEMA PILOTO .....	112
4.1.3. RESULTADOS DE PARÁMETROS DE CAMPO DEL LIXIVIADO DE SALIDA DEL SISTEMA PILOTO.....	116
4.1.4. ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CAMPO DEL LIXIVIADO DE SALIDA DEL SISTEMA PILOTO.....	117
4.1.3. RESULTADOS DE ANALISIS FÍSICO QUÍMICO DEL LIXIVIADO DE SALIDA DEL SISTEMA PILOTO.....	122
4.1.3.1. Arsénico Total .....	123
4.1.3.2. Aluminio Total.....	123
4.1.3.3. Bario Total .....	124
4.1.3.4. Boro Total.....	125
4.1.3.5. Cadmio Total .....	126
4.1.3.6. Cloruro Total.....	127
4.1.3.7. Cobalto Total .....	128
4.1.3.8. Cobre Total.....	129
4.1.3.9. Anión Fluoruro .....	130
4.1.3.10. Hierro Disuelto.....	131
4.1.3.11. Hierro Total.....	132
4.1.3.12. Litio Total .....	133
4.1.3.13. Manganeso Total.....	134
4.1.3.14. Plomo Total .....	135
4.1.3.15. Sólidos Totales Suspendidos .....	136
4.1.3.16. Anión Sulfato .....	137
4.1.3.17. Zinc Total.....	138
4.2. PRUEBA DE HIPOTESIS.....	139

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	141
CONCLUSIONES .....	143
RECOMENDACIONES.....	145
BIBLIOGRAFÍA.....	146
ANEXOS.....	152

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema de las etapas de formación de aguas ácidas.....	44
Ilustración 2. Ubicación de las pruebas de barril-La Base Militar.....	71
Ilustración 3. Configuración de la prueba de barril.....	76
Ilustración 4. Diseño de distribución de especies en el barril.....	76
Ilustración 5. Recolección de relave en la Zona II de la relavera de Quiulacocha.....	78
Ilustración 6. Ubicación del punto de recolección de relave en la Zona II de la relavera de Quiulacocha.....	78
Ilustración 7. Ubicación de puntos de recolección de efluentes domésticos.....	80
Ilustración 8. Punto 1 del recojo de efluentes ubicado alrededor de la relavera Quiulacocha.....	80
Ilustración 9. Punto 2 del recojo de efluentes ubicado alrededor de la relavera Quiulacocha.....	81
Ilustración 10. Ubicación del sitio de recolección de <i>Scircus californicus</i> (Totorá).....	82
Ilustración 11. Ubicación del sitio de recolección de <i>Scircus californicus</i> (Totorá).....	83
Ilustración 12. Características y lugar de las especies vegetales.....	83
Ilustración 13. Recolección de <i>Scircus californicus</i> .....	84
Ilustración 14. Recolección de <i>Distichia muscoides</i> .....	84
Ilustración 15. Especies vegetal a trasplantar en los barriles.....	85
Ilustración 16. Proceso de elaboración del top soil: mezcla tierra y guano de ovino.....	86
Ilustración 17. Etapa 1: Armado de barril.....	88
Ilustración 18. Armado del niple con la unión rosca.....	90
Ilustración 19. Instalación de válvula lateral de drenaje.....	91
Ilustración 20. Llenado del barril con relave.....	92
Ilustración 21. Saturación con agua del relave.....	93

Ilustración 22. Protección del tubo PVC durante el llenado de barril .....	93
Ilustración 23. Instalación del tubo de drenaje .....	95
Ilustración 24. Limpieza de las paredes del barril .....	96
Ilustración 25. Llenado del barril con materia orgánica.....	97
Ilustración 26. Distribución de especies utilizando la malla metálica. ....	98
Ilustración 27. Trasplante de plantas .....	100
Ilustración 28. Distribución especial de las especies en el barril.....	101
Ilustración 29. Galoneras habilitadas para la recolección de efluentes y realización de mezcla. ....	102
Ilustración 30. Envase de medición de lluvia .....	103

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de identificación de impactos de pasivos ambientales mineros .....	42
Tabla 2 LMP D.S N°010-2010-MINAM .....	61
Tabla 3. ECA AGUA . D.S. N°010-2010-MINAM. ....	62
Tabla 4. Coordenadas UTM referencial de la ubicación del área del piloto de pruebas de barril .....	72
Tabla 5. Listado de las especies de flora y su consumo local .....	73
Tabla 6. Ubicación de efluentes.....	79
Tabla 7. Ubicación de la fuente de agua natural.....	87
Tabla 8. Cantidades de efluentes y agua natural requeridas para la mezcla de riego.....	102
Tabla 9. Parámetros de campo de la mezcla de efluentes de ingreso al sistema piloto.....	110
Tabla 10. Parámetros de campo del lixiviado de salida del sistema piloto. ....	116
Tabla 11. Resultado de análisis físico químico del lixiviado de salida ...	122



## INTRODUCCIÓN

La presencia de aguas ácidas en el medio ambiente está vinculada a los procesos de actividades en explotación minera y por la acción de los pasivos ambientales en abandono, los que forman escorrentías superficiales ácidas, produciendo alteración en el ciclo hidrológico, en la calidad del agua superficial y subterránea y en la vida de especies acuáticas (flora y fauna).

El depósito de relaves Quiulacocha (DR Quiulacocha) es un pasivo ambiental minero situado a una altitud promedio de 4 300 msnm en el departamento de Pasco, provincia de Pasco y distrito de Simón Bolívar. Se ubica a una distancia aproximada de 130 km al norte de La Oroya y a 310 km de la capital del Perú, Lima. Pasivo que se encuentran bajo responsabilidad del Estado a través de Activos Mineros S.A.C (en adelante, AMSAC).

La instalación del barril se llevó a cabo durante la primera semana del mes de abril. La primera fase de estudio consiste en una fase de adaptación de las especies vegetales a las condiciones del trasplante. La cual fue por 2 meses. Durante este periodo se realizó riego de los barriles con agua natural cercano a la zona de instalación de los barriles (local frente al DR, de propiedad de AMSAC).

El 25 de junio se inició la operación de las pruebas de barril conjuntamente con el primer riego con efluentes en el Barril 1. Durante el primer mes de operación se ha aplicado las pautas y consideraciones del

informe final de adaptación de las especies vegetales y del manual de operación.

El objetivo de la presente investigación es evaluar la estabilidad geoquímica de los relaves sulfurado de Quiulacocha combinándolas con cobertura biológica y riego de efluentes domésticos. El objetivo se fundamenta en determinar la viabilidad de la biotecnología de bajo costo operativo, comparando los resultados físico-químicos del lixiviados con los LMP y ECA agua vigente en la legislación peruana.

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA**

La remediación de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) es una problemática mundial en todos los países donde se ha desarrollado la minería, puesto que la falta de tecnología ambiental, inadecuado manejo operativo y débil normativa ambiental en el pasado, han generado por muchos años repercusiones que afectan el ecosistema y la salud de las poblaciones.

Las toneladas de relaves depositados en la (antes) laguna de Las Gaviotas “Quiulacocha”, son producto de las operaciones desde los primeros años del siglo pasado. Relaves acumulados del tratamiento de minerales de cobre de la Planta Concentradora de Quiulacocha ubicada en el borde Sur-Este de la laguna Quiulacocha. Posteriormente en el periodo de 1943 a 1992 recibió los relaves del procesamiento del mineral de plomo,

zinc y plata procesados en la Planta Concentradora Paragsha y a partir de 1979 recibió relaves de la Concentradora San Expedito. La concentración más importante de mineral se centraliza en su orden por, el zinc, plomo y plata.

Ante esta situación, como parte de su responsabilidad, el Estado peruano ha venido realizando diversos esfuerzos desde el año 1995, lográndose identificar al año 2018 un total de 8,794 pasivos en todo el país según consta en la R.M. N° 224-2018-MEM-DM, de los cuales a la fecha se ha priorizado para su remediación un total de 1,067 PAM mediante la empresa estatal de derecho privado Activos Mineros S.A.C (AMSAC).

Como se sabe, la remediación de un pasivo ambiental se basa principalmente en lograr la estabilidad física, geoquímica e hidrológica. En el caso de los residuos mineros (relaves y depósito de desmontes), la remediación se torna complicada cuando no se logra controlar mediante técnicas convencionales la estabilidad hidrológica y geoquímica debido a las condiciones altamente generadores de acidez de los materiales y condiciones hidrogeológicas e hidrológicas del entorno.

Dicho aspecto es el caso de la relavera de Quiulacocha en Cerro de Pasco la cual se encuentra afectada por aportes superficiales y subterráneos, la cual en contacto con los relaves altamente sulfurados de Quiulacocha (más 50 % de contenidos de sulfuros), generan la producción continua de aguas acidas en orden de magnitud de 2 a 3 de pH.

Ante dicha problemática, AMSAC con el convenio a través de la Universidad Nacional Alcides Carrión, viene investigando la posibilidad de estabilizar geoquímicamente dichos relaves mediante la instalación de una cobertura vegetal y utilizar las aguas residuales provenientes de la Ciudad de Cerro de Pasco mediante su riego, con el fin de disminuir los costos operativos de la operación y generar un valor agregado a las aguas domésticas que viene siendo descargadas al río Ragra sin medidas de control eficiente. (AMSAC, 2018).

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. PROBLEMA GENERAL**

¿Será posible la estabilización geoquímica de relaves sulfurados mediante el uso de cobertura biológica no saturadas, combinándolas con el riego de efluentes domésticos de la ciudad de Cerro de Pasco a escala piloto?

### **1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS**

- ✓ ¿En qué medida la calidad de lixiviados mejorará con el riego de efluentes domésticos?
- ✓ ¿El tipo de suelo y evolución de incorporación de materia orgánica mediante el uso de efluentes domésticos mejorará las condiciones de estabilización geoquímica de los relaves?

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVOS GENERALES**

Determinar en qué medida la estabilización geoquímica de relaves sulfurados mejorará mediante el uso de coberturas biológicas no saturadas combinándolas con el riego de efluentes domésticos de la ciudad de Cerro de Pasco.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Analizar la calidad de lixiviados de la prueba de barril con riego de efluentes domésticos
- ✓ Determinar el nivel de mejoramiento de la estabilidad química de los relaves en el tipo de suelo y evolución de incorporación de materia orgánica mediante el uso de afluentes domésticos.

### **1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

El depósito de relaves Quiulacocha recibió los relaves desde la planta concentradora Paragsha desde 1943 hasta 1992, acumulando aproximadamente 78 millones de toneladas de relaves en un área de 110 hectáreas. El depósito de desmontes Excélsior, ubicado inmediatamente aguas arriba de Quiulacocha, ha recibido los desmontes provenientes del tajo abierto Raúl Rojas desde 1956 hasta el 2000; y, contiene cerca de 50 millones de toneladas de desmontes en una superficie de aproximadamente 72 hectáreas. Los stockpiles de mineral, el botadero Miraflores, el tajo abierto, así como otras instalaciones mineras, se ubican al norte y nor-este del depósito de desmontes Excélsior, los cuales tienen

influencia en la relavera de Quiulacocha. Activos Mineros es responsable del cierre de los depósitos de Quiulacocha y Excélsior, los cuales a la fecha se encuentran inactivos. Un canal revestido de concreto deriva las aguas superficiales por la margen derecha y bordea los depósitos de Quiulacocha y Excélsior. Asimismo, filtraciones desde las áreas sur y oeste del botadero Excélsior fluyen hacia el límite sur del depósito de desmontes Excélsior donde son conducidas por un canal a través de la superficie del depósito de Quiulacocha hacia el borde inferior de este depósito. Desde aquí, el agua es actualmente bombeada hacia el depósito de relaves Ocroyoc, las cuales son previamente tratadas.

Según las investigaciones realizadas se sabe que parte de las filtraciones o aportes de agua subterránea provienen de las siguientes fuentes: a) ingreso de aguas subterráneas desde las áreas alrededor del depósito Excélsior, así como de la infiltración directa a través de la superficie del depósito de desmonte; b) Filtraciones de los Stock Piles de Pampa seca; c) Filtraciones subterráneas de la quebrada el Golf.

Producto de filtraciones subterráneas descritas, toda el agua es embalsada en el extremo inferior de la relavera de Quiulacocha, constituyendo un caudal permanente, de un promedio de 16 l/s de aguas ácidas (pH de 2.8) y elevados contenidos de metales pesados en solución, principalmente Fe (4 800 mg/l) y Zn (625 mg/l), a fin de evitar que las aguas ácidas sean vertidas a los cuerpos de agua, desde 1995, Centromín Perú

instaló y operó un Sistema de Bombeo de las aguas, hacia el Depósito de Relaves Ocroyoc para su Neutralización y tratamiento.

Desde que AMSAC recibió el encargo en el 2006 se opera un sistema de captación de infiltraciones, que se ubica al pie del dique, las cuales luego son bombeadas a la relavera; asimismo, a partir del 2013, mediante un convenio con Volcan Compañía Minera S.A.A. y Administradora Cerro S.A.C. se realizaron las gestiones para la implementación de una Planta de neutralización temporal para captar las aguas ácidas de la relavera Quiulacocha, neutralizarlas y posteriormente bombearlas a la relavera Ocroyoc; dicha Planta de neutralización temporal ha iniciado su puesta en marcha en el 2016. Dicha operación viene generando costos de tratamiento para AMSAC, debido a que no se puede controlar a la fecha las fuentes de ingreso de aguas subterráneas y superficiales hacia la relavera de Quiulacocha.

En función a toda la problemática expuesta, AMSAC ha tomado la iniciativa de ver la posibilidad de probar nuevas tecnologías de tratamiento tipo pasivo que puedan estabilizar geoquímicamente los relaves con el fin de disminuir los costos de tratamiento de las aguas acidas y generar un posible valor agregado incorporando las aguas residuales de la Ciudad de Cerro Pasco como parte de la medida de remediación ambiental.

En tal sentido, para poder materializar dicha intención se viene realizando pruebas cinéticas mediante la instalación de pruebas geoquímica tipo barril, con el fin de simular las condiciones de la relavera



de Quiulacocha y probar a nivel experimental como el uso coberturas vegetales combinadas con riego de efluentes domésticos en medios saturados y no saturados influye en la estabilización química de relaves altamente sulfurados.

Asimismo, dicha investigación permitirá contribuir científicamente a la solución de este problema desarrollado, además se realiza con la finalidad de aportar conocimiento tanto a la población de Pasco como a los profesionales dedicados el cierre de pasivos ambientales y al cuidado del medio ambiente, de poder recomendar esta tecnología de riego con efluentes domésticos en la estabilización geoquímica de relaves sulfurados. (AMSAC, 2018).

## **1.5. IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN**

El contexto en que se desarrolla esta investigación, surge debido a que en la actualidad para el cierre de un pasivo ambiental en el Perú en un enfoque económico se busca disminuir costos en el método que se aplicará ya sea en el cierre o en el tratamiento.

Esta investigación pretende sustentar el posible aprovechamiento de las aguas residuales que actualmente no está siendo tratada en la ciudad de Cerro de Pasco y que podría usar como aditivo a la estabilización química de relaves minero. Así mismo los resultados de este trabajo permitirá a la comunidad científica, empresas y a la población, considerar los resultados como un recurso de aprendizaje y posible aplicación

asimilando esta información de manera activa, crítica y enfrentar los retos ambientales actuales que nos rodea.

En síntesis, el estudio es importante porque tiene relevancia:

Científica: Permite actualizar saberes, lograr nuevos conocimientos, teórico-prácticos, acerca de una posible alternativa de solución a cierre de relaves en la región Pasco y a nivel del país.

Investigativa: Pretende servir como referente para que otros investigadores asuman la responsabilidad de profundizar, complementar y mejorar, con rigor científico el tema tratado. Además, a nivel teórico, provee a la comunidad científico-ecológica, en particular y a la comunidad de Pasco en general, de una información actualizada y sistemática.

Formativa: El proceso de investigación implicó manejo de múltiples capacidades cognoscitivas, procedimentales y actitudinales en un contexto eminentemente ético, las que en su conjunto contribuyeron con la formación integral del sustentante.

Práctica: Las conclusiones a las que se llega y las recomendaciones que se plantean pueden sustentar la toma de decisiones en futuros planes de cierres de relave y la alternativa de tratamiento de aprovechamiento de aguas residuales. Además, posibilita el establecimiento de algunas líneas de investigación prioritarias en el mundo minero que linda con el mejoramiento del hábitat

Funcional: Los resultados obtenidos de la investigación son de gran utilidad. Permitirán elevar el nivel económico de las familias y/o

comunidades, el mejoramiento de la calidad de vida, del medio ambiente físico y cultural.

## **1.6. LIMITACIONES**

La presente investigación tiene las limitaciones de no encontrar bibliografía detallada del tema similar aplicados en el país, por ese motivo es difícil elaborar un buen marco de antecedentes, además de no contar con equipo que me proporcione medir el oxígeno disuelto ya que este dato será absuelto en la investigación, a pesar de estas dificultades, es un reto presentar esta investigación ya que será de beneficio para la población y para la comunidad científica.

Se ha visitado repositorios universitarios, constatándose que hay poca bibliografía especializada, relacionados a la tesis, debido a que el tema investigado es original. Esta limitación se superó.

## **CAPÍTULO II.**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES**

##### **2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES**

**EL USO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PASIVO PARA LA MITIGACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO EN LA MINA WILLIAMS BROTHERS MINE (CALIFORNIA): ESTUDIO A ESCALA PILOTO. Erin J. Clyde, Pascale Champagne, Heather E. Jamieson, Caitlin Gorman John Sourial (2009).**

Se realizó un estudio a escala piloto para evaluar la viabilidad de usar un sistema de tratamiento pasivo para mitigar el drenaje ácido de la mina en el sitio abandonado de la Mina Williams Brothers, un sitio remoto ubicado en el Bosque Nacional Sierra (California). Las ventajas de

implementar sistemas de tratamiento pasivo en minas remotas o abandonadas son sus bajos requisitos de energía y mantenimiento en comparación con los sistemas convencionales. Se diseñó e implementó un sistema a escala piloto en el sitio, que consistía en: (1) un canal de roca de aireación para facilitar la oxidación del hierro ferroso al hierro férrico; (2) un tanque de sedimentación para recoger precipitados de oxihidróxido de hierro que podrían provocar la obstrucción del sistema; (3) un biofiltro de turba para la eliminación de hierro y cobre disueltos; (4) un reactor de bacterias reductoras de sulfato para la generación de alcalinidad y el consiguiente aumento del pH, y la eliminación de níquel disuelto, zinc y hierro y cobre disueltos residuales; y, (5) un canal de piedra caliza de re-aireación para agregar alcalinidad antes de la descarga del efluente en el ambiente natural de recepción. El sistema a escala piloto se monitorizó durante un período de 17 meses (500 días desde julio de 2007 hasta noviembre de 2008) y el rendimiento se determinó mediante el monitoreo del pH, sulfato y metal disuelto en el drenaje de la mina de ácido influyente y los efluentes del biofiltro de turba. y reactor reductor de bacterias sulfato. Se observó una disminución en la concentración de sulfato en el reactor de bacterias reductoras de sulfato, lo que sugiere la actividad de las bacterias reductoras de sulfato y la generación de alcalinidad. El pH del efluente del sistema aumentó tan bajo como 4.5 a más de 6.0, pero se mantuvo por debajo de los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río San Joaquín. La eliminación del cobre disuelto, níquel y zinc a los

objetivos de calidad de agua inferior se observó en el biofiltro de turba a los objetivos de calidad de agua inferior. La eliminación de hierro disuelto y manganeso también se observó en el reactor de bacterias reductoras de sulfato. La viabilidad de emplear este sistema como una alternativa de tratamiento sostenible de bajo costo y bajo mantenimiento en la mina abandonada de Williams Brothers para garantizar que los efluentes de drenaje cumplan con los objetivos de calidad del agua que se muestran prometedores. Sin embargo, se requeriría un monitoreo a largo plazo para demostrar y garantizar su efectividad a largo plazo. La eliminación de níquel y zinc a los objetivos de calidad de agua inferior.

**TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINAS: ESTUDIO DE REDUCCIÓN DE SULFATO EN MEZCLAS ORGÁNICAS Pérez, N., Schwarz, A., & Urrutia, H. (2017). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 53-64.**

Las barreras permeables reactivas (BPR) son un sistema de tratamiento de aguas subterráneas usado en la descontaminación del drenaje ácido de minas. En esta tecnología, el material reactivo se dispone como barrera en el subsuelo, y el sulfato, los metales y la acidez son removidos por la actividad metabólica de los microorganismos reductores de sulfato (MRS). Los sustratos de las BPR deben ser económicos y proporcionar materia orgánica que favorezca el crecimiento de microorganismos. En esta investigación, usando reactores de operación discontinua, se evaluó la actividad de los MRS en 10 mezclas orgánicas con distintas proporciones de biosólidos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales, tejido óseo de peces, compost de corteza y hierro cero valente. Las mezclas se incubaron a  $30 \pm 2$  °C durante 47 días. Como indicación de la reducción de sulfato se determinó pH, H<sub>2</sub>S, SO<sub>4</sub>, potencial redox y alcalinidad. La cuantificación de los microorganismos totales se realizó por epifluorescencia usando DAPI y los MRS fueron cuantificados por NMP. Los resultados químicos y microbiológicos indicaron que las mezclas con mayor proporción de compost y con presencia de biosólidos y de hierro cero valente presentaron mayor

actividad de los MRS. Los reactores con una sola fuente de materia orgánica mostraron los menores efectos en el tratamiento del drenaje ácido.

**PREVENCIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINA UTILIZANDO COMPOST DE CHAMPIÑÓN COMO ENMIENDA ORGÁNICA. Diana Forigua Quicasan, Nidia Fonseca Forero, Yaneth Vásquez, (2017), Colombia.**

Los drenajes ácidos de mina (DAM) son vertimientos con bajo pH, alta concentración de metales y sulfato. Son considerados el mayor problema ambiental de la industria minera y prevenir su formación es la mejor alternativa ambiental y económica. En este estudio, se evaluó el compost de champiñón como enmienda de carbono orgánico para prevenir la formación de DAM. Se construyeron tres

Celdas en tubos de PVC (2,4 L), llenas con 300 g de mezcla de compost de champiñón y estéril de carbón en diferentes proporciones (40:60, 25:75, 60:40) y 400 mL de agua (18,5). Los cambios químicos en el lixiviado, así como la actividad microbiana en las mezclas fueron monitoreados durante 6 semanas. En los lixiviados el oxígeno disuelto ( $< 2,0 \text{ mg L}^{-1}$ ) y potencial de óxido reducción ( $< - 100 \text{ mV}$ ) disminuyeron, mientras el pH ( $> 6,5$ ) y la alcalinidad ( $> 1.500 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ ) incrementaron. Además, todas las mezclas fueron eficientes en precipitar los metales ( $\text{Fe}^{2+} > 95\%$ ;  $\text{Mn}^{2+} > 96\%$ ;  $\text{Zn}^{2+} > 52\%$ ) y remover sulfato ( $>50\%$ ). Sin embargo, en la celda que contenía una proporción de compost y estéril de 25:75 se observó una producción significativa de sulfuro y una



mayor actividad microbiana, indicando la presencia de bacterias sulfato-reductoras. Los resultados muestran que el compost de champiñón puede ser utilizado como enmienda orgánica de carbón para contrarrestar la formación de DAM y que la mezcla 25:75 puede ser una opción promisoría para usar en campo en el Distrito minero de Zipaquirá (Colombia).

**AISLAMIENTO Y CULTIVO DE BACTERIAS SULFATO REDUCTORAS ACIDÓFILAS PARA LA PRODUCCIÓN DE SULFURO BIOGÉNICO PARA LA PRECIPITACIÓN DE METALES PESADOS. Gutiérrez R. Álvaro Víctor, Terrazas S. Luis Enrique, Álvarez A. María Teresa. Universidad Mayor de San Andrés La Paz Bolivia (2007).**

Los drenajes ácidos de mina (DAM) están caracterizados por acidez extrema y altas concentraciones de metales pesados y sulfatos. Las bacterias sulfato reductoras (BSR) reducen sulfatos oxidando la materia orgánica para la producción de sulfuro de hidrogeno y bicarbonato. La biorremediación consiste en la precipitación insoluble del sulfuro con los metales pesados y la alcalinización del medio por el bicarbonato.

Se estudiaron muestras de lodo en condiciones acidas provenientes de la región altiplánica a través del establecimiento de columnas Winogradsky. La zona sulfato reductora fue inoculada en condiciones anaerobias y pH 4 con distintas fuentes de carbono, entre ellas residuos agrícolas. Se establecieron 2 consorcios sulfato reductoras acidófilos, capaces de ser aplicados a biorreactores para la producción de sulfuro de hidrogeno en condiciones acidas. El establecimiento de sistemas de

biorremediación en dichas condiciones acidas. El establecimiento de sistemas de biorremediación en dichas condiciones permitirá el tratamiento directo de drenajes ácidos de mina utilizando residuos agrícolas como materia oxidante.

## **2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES**

### **INVESTIGACIÓN EN CIERRE DE MINAS EN BUENAVENTURA – UNIDAD MINERA LA ZANJA (Carrasco, 2010)**

En su investigación en cierre de minas para la minera Buenaventura, unidad minera La Zanja ubicado en Cajamarca se realizó trabajos de investigación con el objetivo de inhibir la oxidación microbiana de los minerales sulfurados del depósito de material estéril generador de acidez y el tipo de cobertura que presente la capacidad de prevenir la generación de drenajes ácidos y tenga el menor porcentaje de infiltración, para el material estéril generador de acidez, el primero utilizando un diseño experimental donde tuvo resultados de que la mejor solución para inhibir la generación microbiana de drenajes ácidos son las aguas residuales domésticas tratadas y sin tratar, y que el tratamiento más conveniente sería el T3 (agua residual doméstica tratada) para evitar problemas en la descarga final, por la elevada concentración de coliformes; en el segundo diseño experimental se concluyó que los residuos tales como los lodos de tratamiento de aguas residuales, domésticas, lodos de tratamiento de aguas acidas, residuos orgánicos domésticos y materiales inadecuados de la construcción tienen un alto potencial de uso para la cobertura de componentes mineros, debido

a que tienen la capacidad de evitar la generación de drenajes ácidos de mina. Finalmente se tuvo una conclusión de que es posible inhibir la generación de drenajes ácidos con los residuos líquidos tratados, los residuos líquidos y sólidos de las operaciones mineral se convierten en una oportunidad para el cierre de minas.

## **2.2. BASES TEÓRICO-CIENTÍFICOS**

### **2.2.1. PROBLEMATICA DE LOS PASIVOS AMBIENTALES) EN EL PERU**

*Nina (2008:14-15)* señala lo siguiente:

Como en la mayoría de países, no todas las minas en el Perú producen ácido. Existen factores principales que tienden a contribuir al potencial de generación de ácido y a la calidad del drenaje ácido de las minas en el Perú.

- La compleja configuración geológica, principalmente, en lo referente a vetas.

- La variada mineralogía con potencial para contribuir con diferentes contaminantes en el tiempo, y en diferentes lugares.

Según *MINSA (2017)*. En nuestro país entre los principales agentes contaminantes identificados tenemos: el plomo, mercurio, aluminio, arsénico, magnesio, manganeso, hierro, cobre, cianuro. Agregándose a estos metales pesados el dióxido de azufre, y el ácido sulfúrico (R.M. N° R.M. N° 525-2005/MINSA).

Adicionalmente a ello tenemos la presencia cada vez mayor de las poblaciones ubicadas dentro del área de influencia de las actividades productivas entre ellas la minería y el mayor conocimiento sobre el impacto ambiental y los riesgos a la salud ocasionados por los diferentes metales pesados y otras sustancias químicas (*MINSA 2017*).

Para mejorar el impacto ambiental causado por los drenajes ácidos de las minas de nuestro país se han desarrollado programas ambientales

en los cuales se invierten grandes cantidades de dinero, pero la mayoría de estos tratamientos son químicos, sin desmerecer el efecto positivo del mismo, sin embargo se puede tener significativos ahorros con la implantación de sistemas biotecnológicos tanto de fitorremediación como de biorremediación adaptadas a las situaciones específicas de cada drenaje ácido (*Nina 2008: 15*).

### **2.2.3. LOS PASIVOS AMBIENTALES MINEROS Y SUS EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE**

De acuerdo con la Ley N°28271 y el D.S. 059-2005-EM, se consideran pasivos ambientales mineros a aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, que hayan sido abandonadas o permanezcan inactivas y constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, seguridad, el ecosistema y la propiedad; desde su generación y permanencia en el tiempo, estos pasivos no han sido incluidos en ningún estudio ambiental como es el caso del Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA); en la actualidad es obligatorio considerar el estudio de impacto ambiental para el desarrollo de cualquier proyecto minero incluyendo el cierre de minas.

Las actividades minera metalúrgicas, a través del tiempo, dieron origen a la formación de los pasivos mineros, cuyos componentes son: labores subterráneas de la mina, labores de tajo abierto, depósitos de desmontes (botaderos), depósitos de relaves, pilas de lixiviación,

generación de aguas ácidas, descarga de sedimentos, residuos metalúrgicos, instalaciones de planta concentradora, instalaciones de talleres de mantenimiento, subestaciones eléctricas, estaciones de combustible, instalaciones de campamentos y oficinas, rellenos sanitarios, alteración del paisaje y deforestación.

En la tabla 1, se aprecia una matriz de relación de los componentes de las actividades mineras y sus posibles impactos. A través del tiempo, estos han ocasionado daño al medio ambiente, por ello la identificación y evaluación de los pasivos mineros es muy importante, principalmente teniendo en cuenta los criterios de priorización de los impactos a la salud humana y calidad de vida de las poblaciones aledañas, al tamaño de la población e infraestructura expuesta a los riesgos, posibles fallas catastróficas, nivel de contaminación de suelo y agua, a la flora, fauna y al factor socioeconómico.

En conclusión, los efectos de pasivos mineros huérfanos y abandonados significan un riesgo potencial permanente para la salud humana, el ecosistema y la propiedad; los riesgos potenciales dependerán de las características de los pasivos mineros, de su magnitud e intensidad, de las concentraciones de metales pesados, cuyos efectos al tener contacto con el cuerpo receptor provocan un daño irreversible.

Evaluar los riesgos ambientales en forma cuantitativa no es fácil, por ello usualmente se realiza mediante una descripción cualitativa utilizando criterios técnicos de priorización según el nivel de impacto ocasionado. Los

estudios realizados por MINEM, según el proyecto PERCAN, consideran tres criterios básicos de evaluación de pasivos mineros para la priorización de cuencas, tales como:

- Las implicancias sociales: consiste en incorporar un amplio número de personas con el fin de proteger su salud y desarrollo económico;

- La sensibilidad ambiental: trata de cubrir al máximo la protección de las áreas de terrenos agrícolas y rurales para garantizar la salud tanto humana como ecológica

- Potencial de impactos existentes que afecten a la calidad del agua: orienta de manera prioritaria los esfuerzos en la protección de las cuencas contaminadas por las actividades mineras históricas y futuras.

En el país, existen pasivos mineros huérfanos y abandonados que no reciben ningún tipo de control de sus fuentes reales de potencial contaminación a la salud humana y al ecosistema; no son monitoreados y tampoco se realizan trabajos de remediación ni por parte del Estado ni por los titulares de las concesiones existentes; ello afecta la imagen de la minería peruana y por ende la región donde se encuentran localizados los pasivos, comprometiendo su desarrollo socioeconómico presente y futuro; como parte de la política de Estado, se debe establecer aportes deducibles para fines tributarios, a un fondo que permita desarrollar un plan de garantía para los gastos de remediación de pasivos y cierre de minas (*Sotomayor 2015:84*).

Tabla 1. Matriz de identificación de impactos de pasivos ambientales mineros

COMP IMPC.	Y	Inestabilidad geotécnica	Drenaje ácido	Erosión de suelo	Emisión de polvos	Descarga de sedimentos	Riesgo de accidentes	Alteración de paisajes	Efectos a la comunidad
Botaderos de desmontes		X	X	X	X	X		X	X
Depósitos de relves		X	X	X	X	X	X	X	X
Pilas de lixiviación		X	X	X				X	X
Labores subterráneas		X	X				X		
Labores de tajo abierto		X	X	X	X	X	X	X	
Residuos industriales		X	X	X	X	X		X	X
Instalaciones de plantas abandonadas			X					X	
Instalaciones de campamento y oficinas								X	
Chatarra de equipo y maquinaria			X					X	

Fuente: Medina, F. (2008) *Inventario de pasivos ambientales*



#### **2.2.4. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DE AGUAS ÁCIDAS**

La presencia de aguas ácidas en el medio ambiente está vinculada a los procesos de actividades en explotación minera y por la acción de los pasivos ambientales en abandono, los que forman escorrentías superficiales ácidas, produciendo alteración en el ciclo hidrológico, en la calidad del agua superficial y subterránea y en la vida de especies acuáticas (flora y fauna).

Además, un ecosistema alterado en su calidad biótica representando un impacto paisajístico y mostrando un comportamiento fisiológico como: la inexistencia de vida acuática, el color y la toxicidad de las aguas (*Sotomayor 2015:84*).

#### **2.2.5. AFECTACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA**

Las alteraciones físicas corresponden a variaciones de la calidad natural de las aguas (color, olor, sabor y temperatura). Además, las alteraciones químicas del agua suelen presentar metales pesados que pueden ser de origen orgánico e inorgánico y las alteraciones biológicas se ocasionan por la presencia de microorganismos patógenos (*Medina y Peralta 2015: 25*).

#### **2.2.6. ETAPAS DE FORMACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS**

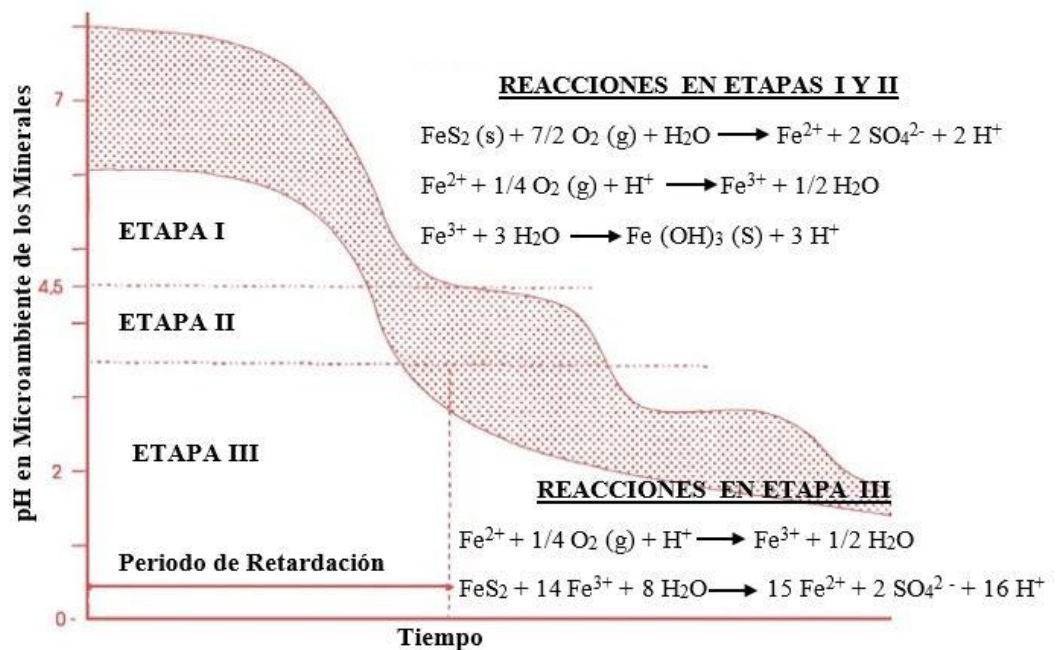
*Según Chaparro (2015)*, señala que el proceso de formación del agua ácida de mina se origina cuando los minerales sulfurados como la pirita se exponen a los efectos del oxígeno y el agua. Esto sucede cuando se hace remoción de material como apertura de tajos, túneles, se acopian

estériles de mina, se disponen los relaves sin ningún tipo de control de ingeniería.

Según Aduvire (2006), El proceso de formación de aguas ácidas, en su conjunto, se puede explicar en tres etapas:

Ilustración 1. Esquema de las etapas de formación de aguas ácidas

Ilustración 1. Esquema de las etapas de formación de aguas ácidas



Fuente: (Aduvire, 2006).

1ª etapa. La oxidación de minerales sulfurosos libera hierro ferroso que bajo condiciones neutras se oxida químicamente y se transforma a hierro férrico que precipita como hidróxido y aporta acidez al medio. En esta etapa del proceso la velocidad de oxidación es baja en los dos mecanismos de generación ácida (directa e indirecta) y la formación de aguas ácidas por oxidación debida al aire y a las bacterias (fundamentalmente Thiobacillus ferrooxidans) se producen a un ritmo semejante. Por lo general, la

alcalinidad disponible en el medio es suficiente para neutralizar parcialmente la acidez que se ha producido lentamente (*Aduvire 2006:9*).

2ª etapa. La acidez acumulada supera la capacidad de neutralización del medio y el pH desciende y predomina la oxidación de la pirita por la acción bacteriana. En la reacción se produce el sulfato ferroso que al ser oxidado nuevamente se transforma en sulfato férrico, y éste a su vez en contacto con el agua da lugar al ácido sulfúrico y al hidróxido férrico, que es insoluble y es el que provoca la coloración amarilla de las aguas. En esta etapa disminuye la eficacia del mecanismo directo (oxidación por el aire) y aumenta mucho la del indirecto (*Aduvire 2006:10*).

3ª etapa. Cuando el pH desciende por debajo de 3 en la proximidad de los granos de pirita (aproximadamente 4,5 en el agua), el ion férrico se ve afectado por las reacciones de oxidación – reducción y la acción bacteriana puede lixiviar el sulfuro de hierro directamente a sulfato. En esta etapa varía la generación de ácido al aumentar la solubilidad del hierro y disminuye la precipitación de hidróxido férrico. En resumen el *Thiobacillus ferrooxidans* oxida el ion ferroso a férrico que a su vez oxida a los sulfuros (pirita) produciendo más ácido (*Aduvire 2006*).

Según *Aduvire (2006:11)*, el mecanismo más importante es el indirecto, ya que es el que se autocataliza (si se inhibe la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* la producción de ácido se reduce al menos en un 75%).

- Si el pH del agua sube por encima de 5, igualmente se inhibe la oxidación (p. 11).

- Si el pH del agua desciende por debajo de 4,5 debe esperarse que todo el sulfuro de hierro termine oxidándose (p. 11).

- Si el pH desciende por debajo de 2,5 se establece un equilibrio en el que la actividad bacteriana se estabiliza, ya que habrá alcanzado su óptimo de desarrollo (la velocidad de reacción se habrá incrementado entre  $10^5$  y  $10^6$  veces respecto al mecanismo directo). (p. 11)

### **2.2.7. ESTUDIO GEOQUÍMICO DE LA RELAVERA QUIULACOCHA**

En las conclusiones del estudio geoquímico realizado en relación a los metales, de acuerdo al estudio de Dold et al. (2008) se observó una tendencia de disminución de porcentaje en peso de metales de Fe, Pb y Zn a mayor profundidad en el sector 2. Esto estaría asociado al arrastre del material del sector 1 hacia el sector 2, debido a que el sector 2 recibe las filtraciones provenientes del DDM Excélsior y del sector 1, a través del canal de tierra superficial. Los resultados del análisis mineralógico indican un mayor porcentaje de los minerales de pirita ( $\text{Fe S}_2$ ) siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y en menor porcentaje marcasita ( $\text{FeS}_2$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) y yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ) en las muestras de los dos (02) sectores evaluados.

Los resultados de pH en pasta de casi la mayoría de las muestras de los puntos tomados, son menores de 5,5 indicando que actualmente existe una contribución de acidez generados por la oxidación del contenido

de sulfuro. La especie predominante de azufre es el azufre como sulfuro ( $S^{2-}$ ) en todas las muestras analizadas, con valores de relación del azufre como sulfuro y azufre total de 0,76 y 0,96. En relación al análisis ABA, todas las muestras en los tres (03) sectores (sector 1, sector 2 y la zona de transporte de relaves) evaluados han catalogado a las muestras como potenciales generadores de acidez (PAG). Consorcio WSP, 2018

De acuerdo a los resultados de pH NAG, todos fueron menores de 4,5 caracterizando las muestras como PAG; así mismo, la muestra del sector 2 mostró mayores valores de acidez en comparación con la muestra del sector 1.

De acuerdo a los resultados de NAG, se han reportado parámetros de pH, conductividad y sulfatos fuera de los rangos/ valores establecidos por ECA. En relación a los metales se han registrado valores de concentración de Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn por encima de los ECA y LMP para el sector 1 y sector 2, encontrándose valores de concentración de Al, Cd y Pb mayores en el sector 1 y valores de concentración de As, Cu y Fe más elevados en el sector 2; esto asociado al material de relave dispuesto en el DR (Consorcio WSP, 2018).

## **2.2.8. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE FORMACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS**

Aduvire (2006) señala lo siguiente:

La cantidad y calidad del drenaje ácido depende de las características fisicoquímicas de los materiales que entran en contacto con

los flujos de agua. La movilización de los metales pesados y la clase de productos generados en las reacciones están controladas. Principalmente por la geoquímica de los residuos y el agua intersticial.

Cuando baja el pH la cantidad de metales disueltos suele aumentar. Sin embargo, en determinadas condiciones químicas los metales también pueden mobilizarse en pH neutros o alcalinos. Por tanto, durante la neutralización de efluentes con pH bajos se produce la precipitación de muchos de los metales solubles, pero el drenaje resultante sigue conteniendo metales residuales y productos de reacciones secundarias.

El estado de las aguas ácidas puede cambiar con el tiempo, sobre todo si la capacidad de neutralización del medio se agota. Si se activa la formación de aguas ácidas conviene tomar ciertas medidas preventivas y de control para que los efluentes contaminantes que se generen estén por debajo de los niveles que pueda asimilar el medio natural, sin que se produzcan impactos significativos.

Los fenómenos y parámetros que afectan a la geoquímica de aguas ácidas de mina son:

Velocidad de reacción de la pirita y otros sulfuros, oxidación e hidrólisis de Fe disuelto y otros elementos, capacidad de neutralización de los mineral y materiales, capacidad de neutralización de las aguas carbonatadas, transporte de oxígeno, movilidad de agua y vapor, permeabilidad del medio, clima y temperatura, evaporación e infiltración, acción. Catalítica de las bacterias, adsorción microbiana de metales,

precipitación y disolución de los metales durante el transporte, complejos orgánicos y procesos microambientales (p.11).

Por lo tanto para que se formen aguas ácidas deben existir ciertas condiciones mínimas, como:

- Presencia de agua, oxígeno y hierro en cantidad suficiente.
- Presencia de cierto tipo de bacterias.
- Tiempo.

Según *Aduvire (2006)*, Si se dan las condiciones anteriores, el resultado final va a depender de una serie de factores que son los que condicionan la cinética y el desarrollo de los procesos químicos y biológicos. Estos factores que determinan la velocidad de la generación ácida, son:

- pH
- Temperatura
- Cantidad y tamaño de los granos del mineral
- Contenido y presión parcial de oxígeno
- Composición y mineralogía del medio (actividad química del ion férrico)
- Concentración de bacterias
- Contenido de nutrientes
- Contenido tóxico y grado de saturación del agua
- Área de la superficie expuesta de los sulfuros metálicos.

- Energía de activación química requerida para iniciar la generación ácida.

### **2.2.9. SISTEMAS DE TRATAMIENTO PASIVO**

Definición Acorde a lo establecido en la Guía Global de Drenaje Ácido de Roca (Guía GARD por sus siglas en inglés), se define como tratamiento pasivo a los procesos de limpieza o remediación de un contaminante que no requieren de la intervención humana regular para realizar actividades rutinarias de operación y/o mantenimiento. Normalmente en estos sistemas se emplean materiales de construcción naturales (suelos, arcillas y rocas calizas), materiales orgánicos (residuos vegetales como la paja, virutas de madera, estiércol y el compost) y se promueve el crecimiento de la vegetación natural. Los sistemas de tratamiento pasivo de efluentes utilizan flujos por gravedad para el movimiento del agua. En algunos climas áridos, el concepto de tratamiento pasivo puede incluir el uso de la evaporación o infiltración de pequeños volúmenes de drenaje ácido. Gusek (2002) define tratamiento pasivo de drenajes ácidos como: "...Un proceso de eliminación secuencial de metales y/o acidez en un biosistema hecho por el hombre de aspecto natural que capitaliza reacciones ecológicas y geoquímicas. El proceso no requiere de energía o productos químicos después de la construcción y tiene una duración de décadas con ayuda humana mínima". Pulles et al. (2004) define un sistema de tratamiento pasivo como: " Un sistema de tratamiento de agua que utiliza fuentes de energía natural disponibles, tales como el



gradiente topográfico, energía metabólica microbiana, la fotosíntesis y la energía química, además de un mantenimiento poco frecuente para operar con éxito durante su vida de diseño." Un sistema verdaderamente pasivo además debe funcionar durante varios años sin una modificación importante para reponer materiales, y debe ser capaz de funcionar sin utilizar energía eléctrica. Asimismo, se pueden clasificar los sistemas de tratamiento pasivos en tres tipos: abióticos, semi-biológicos y biológicos.

### **2.2.10. BIORREMEDIACIÓN**

El término biorremediación fue acuñado a principios de la década de los '80. Se trata fundamentalmente de la aplicación de estrategias de remediación biológicas, basadas en la capacidad de los microorganismos de interaccionar en forma directa con contaminantes. Los microorganismos pueden degradar los desechos en productos menos tóxicos, concentrar e inmovilizar sustancias tóxicas tales como metales pesados; minimizar desechos industriales y rehabilitar áreas afectadas con diversos contaminantes. De este modo la biorremediación permite mejorar los ecosistemas dañados, acelerando algunos procesos naturales. (Whiteley y Lee, 2006).

El tratamiento biológico de residuos tiene algunas ventajas, cuando es comparado con técnicas tradicionales utilizadas con este fin, entre dichas ventajas se encuentran (Whiteley y Lee, 2006).

Bajo costo del tratamiento.

Tratamiento in situ, no hay gastos de transporte.

## Reducción y eliminación de subproductos finales

. Eliminación de un costoso equipamiento y atención frecuente del operador.

Eliminación de un seguimiento a perpetuidad.

A diferencia de lo que puede ocurrir con compuestos orgánicos contaminantes, los metales pesados no pueden ser degradados. Las posibilidades para el tratamiento de contaminaciones producidas por ellos se reducen a inmovilizarlos (si se encuentran en una fase líquida o gaseosa) o movilizarlos (para extraerlos desde matrices sólidas) de forma tal de reducir su biodisponibilidad o su toxicidad. (Whiteley y Lee, 2006).

Una de las alternativas aplicables al tratamiento de metales presentes principalmente en efluentes líquidos, corresponde a la inmovilización del metal, es decir, al pasaje de un estado soluble inicial, a uno insoluble final. (Whiteley y Lee, 2006).

La inmovilización con bacterias es una alternativa a los métodos fisicoquímicos tradicionales. Entre ellos, el más relevante para la eliminación de metales pesados que se encuentran en solución, es la alcalinización del efluente (comúnmente con carbonato o soda cáustica). El aumento de pH provoca la precipitación de los metales pesados como hidróxidos. Estos últimos suelen ser precipitados coloidales, por lo que ocupan grandes volúmenes y, además, coprecipitan con otros elementos. (Whiteley y Lee, 2006).

### **2.2.11. BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS.**

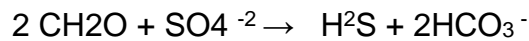
Las Bacterias Sulfato-Reductoras (BSR) son microorganismos anaerobios obligados, metabólicamente versátiles provenientes de varias familias y diferentes géneros. Utilizan sulfato u otros compuestos oxidados de azufre como aceptor final de electrones (agente oxidante) para la producción de H<sub>2</sub>S. Pueden crecer de forma heterotrófica usando moléculas orgánicas de bajo peso molecular y de manera autotrófica usando hidrógeno y dióxido de carbono (Nagpal et al., 2000; Lens & Kuenen, 2001).

Las BSR son notablemente adaptables y pueden ser encontradas en numerosos ambientes terrestres y acuáticos en los que se ha agotado el oxígeno debido a la descomposición aeróbica de la materia orgánica. Se encuentran principalmente en ambientes anóxicos ricos en sulfatos. Han sido descubiertas en suelos, lodos de estuarios, en aguas dulces, de alcantarillado, marinas, salobres, termales y áreas geotermales, depósitos de sulfuro, en pozos petroleros y de gas, y en el intestino de mamíferos e insectos (Postgate, 1984).

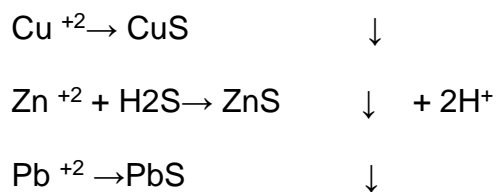
La mayoría de las bacterias sulfato-reductoras conocidas son inhibidas en valores de pH por debajo de 6 y por encima de 9. Sin embargo, la sulfato-reducción ha sido comprobada en ecosistemas naturales o artificiales en valores de pH inferiores en el rango de 3 a 3.8 (Nagpal et al., 2000; Lens & Kuenen, 2001).

## 2.2.12. MECANISMOS DE BACTERIAS SULFATOREDUCTORAS.

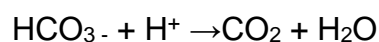
Este tipo de materia reduce el sulfato en el agua de mina, para producir sulfuro de hidrógeno y bicarbonatos.



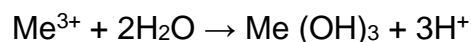
El sulfuro de hidrógeno resultante ( $\text{H}_2\text{S}$ ) reacciona con los metales pesados en el agua de mina, produciéndose la precipitación de ellos como sulfuros:



A pesar de que la reacción antes descrita produce acidez, la reacción reductora de sulfato produce más alcalinidad (un mol en exceso sobre la acidez producida) y así prevalecen las condiciones alcalinas.



Al elevarse el pH del efluente, algunos metales forman hidróxidos u óxido y precipitan.

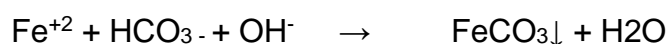


Donde Me = metal.

Las variaciones de los contenidos de hierro en solución; se debe a movimientos del ión hierro en las botellas de biodegradación.



Finalmente, se estabiliza precipitando como carbonato de hierro.



### **2.2.13. CICLO DEL AZUFRE**

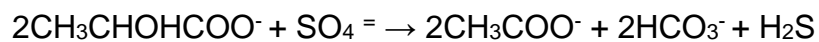
El rol de los microorganismos en el ciclo del azufre Microorganismos (mayor y frecuentemente bacterias) son a menudo integrantes involucrados en la alteración química de minerales. Minerales o productos intermedios de su descomposición, pueden ser directamente o indirectamente necesarios para su metabolismo. La disolución de sulfuros minerales bajo condiciones ácidas (Drenaje Ácido de Mina), la precipitación de minerales bajo condiciones anaeróbicas, la adsorción de metales por las bacterias o algas y la formación y destrucción de complejos metálicos son ejemplos de precipitación indirecta de microorganismos. Donde los minerales están disponibles como elementos de traza solubles, sirviendo también como específicos sustratos oxidantes o también como electrones dadores y/o aceptores en reacciones de oxidación – reducción, ellos tal vez estén directamente involucrados en la actividad metabólica celular. (Nagpal et al., 2000; Lens & Kuenen, 2001).

### **2.2.14. REDUCCIÓN NATURAL EN EL CICLO DEL AZUFRE**

La reducción directa de iones sulfato a sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) es efectuada naturalmente por bacterias anaeróbicas de los géneros *Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum*. Las citadas bacterias reductoras de sulfatos (SRB) son heterotróficas (obtienen el carbono celular a partir de compuestos orgánicos), dichos organismos utilizan sulfatos, tiosulfatos,  $S_2O_3^{2-}$ , sulfitos  $SO_3^{2-}$  y otros azufres reducibles en su metabolismo

respiratorio. En el proceso estos compuestos de azufre conteniendo iones son reducidos a sulfuros de hidrógeno.

La bacteria requiere un substrato orgánico, que usualmente es un ácido de cadena corta como el ácido láctico o el ácido pirúvico. Tales substratos son generados naturalmente por actividades de fermentación de otras bacterias anaeróbicas sobre substratos orgánicos significativamente más complejos. De esta manera en un sistema natural los requerimientos específicos para un ácido de cadena corta por parte de la bacteria reductora de sulfatos (SBR) es la disponibilidad de fuentes orgánicas complejas y de un sistema bacteriano mixto. El lactato es usado por la bacteria (SRB) durante la respiración anaeróbica para producir acetato según la siguiente reacción:



De esta manera el sistema Wetland es el mejor proceso natural para la destrucción y/o conversión del ión sulfato. La cantidad de bacteria (SBR) en un Wetland natural es capaz de efectuar la precipitación de los sulfuros metálicos a partir del drenaje ácido de mina, como resultado de la reducción del ión sulfato a sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y este concepto es claramente definido durante el diseño construcción de un Wetland. (Nagpal et al., 2000; Lens & Kuenen, 2001).

### **2.2.15. ESTABILIDAD GEOQUÍMICA (EQ)**

Se entenderá que una instalación minera se encuentra estable geoquímicamente cuando su interacción con los factores ambientales, no genera impactos que impliquen un riesgo significativo para la salud de las personas y/o para el medio ambiente. (INAP, 2012)

### **2.2.16. EFLUENTES DOMÉSTICOS**

Los efluentes domésticos provienen de áreas residenciales (incluyen residuos provenientes de cocinas, baños, lavado de ropa y drenaje de pisos) y comerciales, incluidas las instituciones y zonas recreativas. Estas normalmente se recogen en un sistema de alcantarillado público. La cantidad de aguas residuales domiciliarias (sanitarias) por lo común se determina a partir del uso del agua y se conoce que sólo el 70% al 90% del agua suministrada llega a las alcantarillas.

Debido a que en las ciudades se aglutinan diversas actividades comerciales e industriales, además de las viviendas, como así también edificios públicos, tales como escuelas, hospitales, etc., la composición de los efluentes domiciliarios son muy variable y en general está constituida por:

- Aguas domiciliarias
- Aguas comerciales: restaurantes, garajes, supermercados, etc.
- Aguas industriales: siempre que no sean tóxicas o necesiten

tratamiento previo al volcado

- Aguas de infiltración, percolado, lluvia Hay que considerar que alrededor del 85 al 90 % del agua provista como consumo domiciliario, llega a las redes de desagües cloacales. Si bien el volumen es variable y depende de las características de la región, hábitos y costumbres de la población, cultura, industrialización, clima y características de la urbanización entre otras. Los constituyentes de los efluentes cloacales son sólidos, líquidos y gases. En general los efluentes cloacales contienen una proporción inferior al 0,1 % o 1.000 ppm. de sólidos totales, correspondientes a las sales originalmente presentes en el agua, más las sustancias orgánicas e inorgánicas derivadas del uso de ella y de los residuos comerciales e industriales. Los gases tienen el mismo origen, pero se incrementan apreciablemente por la descomposición anaerobia de los efluentes domiciliarios. La arena, el cascajo y otros componentes sólidos provienen del lavado de vegetales, calles, patios, etc. La mayor parte de estas sustancias son de origen inorgánico, pero incluyen además algunas sustancias orgánicas, tales como granos de café, semillas de frutas, etc. (Jorge. A, 2005).

### **2.2.17. PARÁMETROS DE LOS EFLUENTES DOMÉSTICOS**

Normalmente para conocer mejor las características de los efluentes domiciliarios se hacen análisis de laboratorio y se toman en el sitio parámetros tales como la temperatura, color y olor. En esos análisis se determinan los siguientes datos:



- Temperatura: si bien el líquido cloacal doméstico tiene una temperatura un poco más elevada que el agua suministrada, encontrar líquidos con temperaturas muy elevadas nos indica que se está produciendo una descarga industrial o comercial. El líquido en tales condiciones produce el deterioro de la red cloacal y en caso de llegar sin modificación al sitio de disposición final, provocaría alteraciones en el medio ambiente.

- Color y olor: los efluentes domiciliarios tienen color gris cuando es fresco y al envejecer toman un color negro brillante. Cualquier variante indica la presencia de residuos industriales y su color nos puede indicar de qué producto se trata. El color interfiere con la transmisión de la luz, por lo que de volcarse a un curso de agua disminuirá la acción fotosintética. El olor de un efluente doméstico es indicativo de su vejez, pues cuando es fresco es ligeramente pútrido, pero cuando es viejo se septiza y produce hidrógeno sulfurado que le confiere un olor fuertemente pútrido.

- pH: en un efluente doméstico alcanza un valor aproximado de 7 u 8. Cuando es más bajo indica la existencia de volcamientos ácidos y si es alto, estos son alcalinos y ambos provienen de comercios o industrias. En cualquier caso, son perjudiciales para las cañerías, equipos de bombeo e impactan en los sitios de disposición final.

- Alcalinidad: normalmente los efluentes son alcalinos y esto favorece, dentro de ciertos límites, los procesos bacterianos.

- Cloruros: la cantidad de cloruros por habitante es constante y aproximadamente de 15 gr./día, por lo que son un indicio de la concentración del efluente. Cuando encontramos mayores concentraciones en el efluente, esto puede deberse a volcados no domiciliarios y si esta es mucho menos, es indicativo de infiltraciones provenientes de la capa freática.

- Sulfuros totales: pueden encontrarse disueltos, en estado coloidal o en suspensión, en un estado de equilibrio dinámico que dependerá del valor del pH. Un efluente doméstico fresco no lo contiene, apareciendo al envejecer y septizarse.

- Oxígeno disuelto: en un efluente doméstico fresco existe una pequeña cantidad de oxígeno disuelto, el que desaparece rápidamente cuando comienza a septizarse.

- Residuos sólidos: es el residuo total por evaporación, sólidos fijos y volátiles. Se mide la suma de las sustancias que existen en el líquido cloacal, en suspensión y en solución, estables a 100 °C.

- Demanda Bioquímica de Oxígeno: se define como la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar por acción bacteriana aeróbica, la materia orgánica degradable en un lapso de 5 días, a la temperatura de 20 °C (Jorge. A, 2005).

**2.2.18. LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LA DESCARGA DE  
EFLUENTES LÍQUIDOS DE ACTIVIDADES MINERO  
METALÚRGICAS. D.S. N°010-2010-MINAM.**

*Tabla 2 LMP D.S N°010-2010-MINAM*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>LIMITE EN CUALQUIER MOMENTO</b>	<b>LIMITE PARA EL PROMEDIO ANUAL</b>
<i>pH</i>		6-9	6-9
<i>Sólidos totales en suspensión</i>	<i>mg/l</i>	50	25
<i>Aceites y grasas</i>	<i>mg/l</i>	20	16
<i>Cianuro total</i>	<i>mg/l</i>	1	0.8
<i>Arsénico total</i>	<i>mg/l</i>	0.1	0.08
<i>Cadmio total</i>	<i>mg/l</i>	0.05	0.04
<i>Cromo hexavalente</i>	<i>mg/l</i>	0.1	0.08
<i>Cobre total</i>	<i>mg/l</i>	0.5	0.4
<i>Hierro disuelto</i>	<i>mg/l</i>	2	1.6
<i>Plomo total</i>	<i>mg/l</i>	0.2	0.16
<i>Mercurio total</i>	<i>mg/l</i>	0.002	0.0016
<i>Zinc total</i>	<i>mg/l</i>	1.5	1.2

FUENTE: MINAM, 2010.

## 2.2.19. ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA)

Tabla 3. ECA AGUA. D.S. N°004-2017-MINAM.

Parámetros	Unidad	ECA Categoría 3		
		D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego restringido	Agua para riego no restringido	Bebida de animales
<i>Parámetros de campo</i>				
Conductividad eléctrica	uS/cm	2500		5000
Oxígeno disuelto	mg/L	≥ 4		≥ 5
pH	Unidad de pH	6.5 – 8.5		6.5 – 8.5
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3
<i>Parámetros fisicoquímicos</i>				
Cloruro	mg/L	500	500	
Fluoruro	mg/L	1	1	
Nitrógeno Nitrito	mg/L	10	10	
Sulfato	mg/L	1000	1000	1000
Li (Tot)	mg/L	2,5	2,5	
B (Tot)	mg/L	1	5	
Be (Tot)	mg/L	0,1	0,1	
Al (Tot)	mg/L	5		5
Cr (Tot)	mg/L	0,1		1
Mn (Tot)	mg/L	0,2		0,2
Co (Tot)	mg/L	0,05		1
Ni (Tot)	mg/L	0,2	1	
Cu (Tot)	mg/L	0,2	0,5	

Zn (Tot)	mg/L	2	24
As (Tot)	mg/L	0,1	0,2
Se (Tot)	mg/L	0,02	0,05
Cd (Tot)	mg/L	0,01	0,05
Ba (Tot)	mg/L	0,7	-
Hg (Tot)	mg/L	0,001	0,01
Pb (Tot)	mg/L	0,05	0,05
Fe (Tot)	mg/L	5	

Fuente: DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM.

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

**Agua:** Es un líquido inodoro e insípido, en pequeña cantidad es incoloro, y verdoso o azul en grandes masas; que refracta la luz, disuelve muchas sustancias, se solidifica por el frío, siendo el único elemento en la tierra que, tanto al congelarse o al calentarse se dilata; se evapora por el calor y, más o menos puro, forma la lluvia, los manantiales, los ríos y los mares.

**Drenaje:** Es la manera en que las aguas de un área existen y se mueven, incluyendo corrientes superficiales y subterráneas. Un término global para todos los flujos de agua, ya sea concentrados y/o difusos.

**Embalse de relaves:** Aquel depósito de relaves donde el muro de contención está construido con material de empréstito y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. La impermeabilización puede estar realizada con un material natural de baja permeabilidad o de material sintética como geomembrana de alta densidad.

También se llama Embalses de relaves aquellos depósitos ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere la construcción de un muro de contención

**Lixiviación:** Es la extracción de constituyentes solubles por percolación a través de un solvente. Puede ser un proceso natural o inducido.

**Lixiviado:** solución obtenida desde el proceso de lixiviación. También corresponde a un líquido que ha percolado o drenado a través de un residuo y que contiene componentes solubles de éste.

**Metales:** Es un grupo de elementos químicos que se caracterizan por presentar las siguientes propiedades físicas: ductilidad, maleabilidad, brillo, alta densidad, ser sólidos a temperatura ambiente (excepto el mercurio (Hg)), tener estructura cristalina en su estado sólido y ser buenos conductores del calor y la electricidad. Químicamente son aquellos elementos en el que existe solapamiento entre la banda de valencia y la conducción en su estructura electrónica (enlace metálico), lo cual le brinda las propiedades físicas ya indicadas. En este grupo se encuentran los elementos alcalinos, alcalinotérreos, metales pesados y preciosos.

### **Pasivo Ambiental Minero**

Son aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonada o inactiva y que constituyen un riesgo permanente y potencial

para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad (*Decreto Supremo N° 059-2005-EM*).

**pH:** corresponde al logaritmo negativo en base 10 de la actividad del ión hidrógeno en solución ( $-\log[H^+]$ ).

**Sólidos disueltos totales, o TDS:** Corresponde a la medida de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas que se encuentran en una solución, ya sea en sus formas moleculares, ionizadas o como coloides. Estas sustancias se caracterizan por ser lo suficientemente pequeñas, para pasar por un filtro de dos  $\mu\text{m}$ .

## **2.4. HIPÓTESIS: GENÉRICOS Y ESPECÍFICOS**

### **2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL**

La estabilización geoquímica de relaves sulfurados mejorará mediante el uso de coberturas biológicas no saturadas combinándolas con el riego de efluentes domésticos de la ciudad de Cerro de Pasco.

### **2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**

- ✓ La calidad de efluentes de los lixiviados mejora con el riego de efluentes domésticos.
- ✓ El tipo de suelo y evolución de incorporación de materia orgánica mediante el uso de efluentes domésticos mejora las condiciones de estabilización geoquímica de los relaves.

## **2.5. IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES**

### **2.5.1. VARIABLE INDEPENDIENTE**

Uso de cobertura biológica en medios no saturados.

### **2.5.2. VARIABLE DEPENDIENTE**

Evaluación de la estabilidad geoquímica de relaves sulfurados de Quiulacochoa.



## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El tipo de investigación que se utilizará en el presente estudio es de tipo experimental cuantitativa con intervención, aplicativo y observacional; que es la que utiliza para encontrar el comportamiento de una variable a partir de diferentes combinaciones de factores o variables de entrada de un proceso, que al cambiar afectan la respuesta.

Este tipo de investigación se enfocará en emplear un proceso de estabilización química para el tratamiento de drenaje de agua acida generada por los pasivos ambientales mineros donde se realizará el monitoreo de parámetros de campo del lixiviado de la prueba de barril, efluentes y mezcla de riego, además mensualmente se realizará un análisis fisicoquímico de las muestras.

### 3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de diseño cuasiexperimental-prospectivo y con intervención. Los datos se recolectarán del análisis fisicoquímico de aguas y medición de parámetros de campo, finalmente será comparado referencialmente con los límites máximos permisibles (DS N° 010-2010-MINAM) y estándares de calidad ambiental para agua (DS-004-2017-MINAM) categoría 3: Riego de vegetes y bebida de animales.

Teniendo en cuenta el siguiente esquema:

Se describe la relación  $X - Y \begin{cases} O_1 \\ O_2 \end{cases}$

Donde:

X = VD : Evaluación de la estabilidad geoquímica de relaves sulfurados de Quiulacocha.

Y = DI : Uso de cobertura biológica en medios no saturado con riego de efluentes domésticos a escala piloto

O<sub>1</sub> = Sin uso de cobertura

O<sub>2</sub> = Con uso de cobertura

### **3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA**

(Vara, 2012), el muestreo consiste simplemente en el proceso de extraer una muestra a partir de una población (p. 221). Se pueden emplear dos clases de métodos de muestreo: los probabilísticos y no probabilísticos.

Para el presente estudio se utilizará el muestreo no probabilístico y tipo de muestreo aleatorio simple

#### **3.3.1. POBLACIÓN**

La investigación se realizará en el depósito de relaves de Quiulacocha zona no saturada que corresponde al Sector 1- Relaves aguas arriba del dique flotante. El depósito de Relaves de Quiulacocha contiene aproximadamente 78 millones de toneladas (Mt) de relave en un área de 116 Ha.

#### **3.3.2. MUESTRA**

La muestra estará representada por 0.396 m<sup>3</sup> (110cm ancho x 90cm largo x 40cm altura) de la relavera, en base a la Guía de Muestreo para Suelos Contaminados 2014 MINAM de uso agrícola donde se realizará la excavación de 30-60cm de profundidad para tomar una muestra representativa para la prueba de barril. Se considerará el relave del Sector 1 del depósito de relaves (zona no saturada, relaves de Pb-Zn) y se procederá a realizar una mezcla del material de la superficie con el material de las capas inferiores hacia 40cm de profundidad.

### **3.4. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN**

Para esta investigación se hará uso de método analítico.

El método que se empleará consta de la ubicación de la zona de estudio experimental, ubicación de los puntos de muestra de relave, especies vegetales y topsoil, diseño de la prueba de barril, realización de la prueba de barril, adaptación de especies, operación de la prueba de barril que incluye datos de campo complementarios como el análisis de efluentes, análisis de agua natural de riego, datos de crecimiento de las especies vegetales, cálculo de aplicación de fórmulas y posteriormente se realizó la interpretación con la cual se determina la calidad de efluente lixiviado del barril con riego de efluentes domésticos.

#### **3.4.1. UBICACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO**

El depósito de relaves de Quiulacocha se ubica en la microcuenca Quiulacocha, en la sierra central del Perú, a una altura promedio de 4 265 msnm, dentro del departamento de Pasco, provincia de Pasco y Distrito de Simón Bolívar, entre las coordenadas UTM WGS84 8 816 500 N – 8 818 500 N y 359 000 E – 361 000 E. El depósito de relaves Quiulacocha se orienta de suroeste a noreste y se encuentra limitado por el noreste con el depósito de desmonte (DDM) Excélsior, por el noroeste (NO) con cerro Shuco (4 400 msnm) y por el sureste por la pampa Jogoj (4 370 msnm).

Las pruebas de barril se instalaron en el predio denominado “Ex Base Militar de Quiulacocha”, que se encuentra bajo la administración de Activos Mineros SAC, en el centro poblado Quiulacocha, cuya ubicación es:

Sector : La Base Militar  
Centro poblado : Quiulacocho  
Distrito : Simón Bolívar  
Provincia : Pasco  
Departamento : Pasco

*Ilustración 2. Ubicación de las pruebas de barril-La Base Militar*



*Fuente: Google Earth*

El área donde se implementó el piloto de prueba de barril, se encuentra ubicada alrededor de las coordenadas UTM que se indican en la tabla 4. Cabe indicar, que la ubicación de la parcela piloto es referencial.

*Tabla 4. Coordenadas UTM referencial de la ubicación del área del piloto de pruebas de barril*

Ubicación	Coordenadas UTM		Altitud
	Norte	Este	4294
La Base Militar	8816513	360131	msnm

Fuente: AMSAC 2018

### **3.4.1.1. Clima y meteorología**

Para el análisis de clima y meteorología se ha tomado los registros de la estación meteorológica Cerro de Pasco (estación más cercana y de mayor registro).

La temperatura máxima media anual registrada en el AE es de 12,1 °C y la mínima media anual es de 2,5 °C. Las mayores temperaturas corresponden al mes de noviembre y las menores al mes de julio.

La precipitación media anual del AE es de 1 153,9 mm. Las mayores precipitaciones ocurren entre los meses de octubre-abril y las menores se presentan entre mayo-setiembre. La precipitación máxima en 24 horas es de 72,4 mm (para un periodo de retorno de 500 años) y la estimación de la precipitación máxima probable (PMP) es de 178,4 mm.

La humedad promedio mensual varía entre 80,2% y 84,3% y la estación local varía entre los 63,5% y 80,3%. La presencia del mayor valor promedio mensual de humedad se da en el mes de marzo y la de menor valor en el mes de julio.

### 3.4.1.2. Biología

El área de estudio se ubica en la ecorregión Puna, en la zona de vida páramo muy húmedo – Sub Alpino Tropical.

Los resultados a nivel de la composición y abundancia de la flora terrestre muestran que las plantas se pueden adaptar a las condiciones del ambiente en los bordes del DR Quiulacocha, pero no han prosperado al interior del mismo depósito.

Los índices bióticos analizados, la condición de calidad de agua es mala en el total de estaciones evaluadas, siendo clasificada como moderadamente contaminada (índice de Shannon), de calidad mala (índice EPT) y crítica y muy crítica (índice BWMP).

Según los trabajos de campo de WSP, se registraron 11 especies de plantas con usos locales, según la referencia de pobladores del centro poblado Quiulacocha, tales como uso para forraje y medicinal.

Tabla 5. Listado de las especies de flora y su consumo local

Familia	Especie	Nombre común	Uso
Fabaceae	<i>Trifolium amabile</i> Kunth	-	Forraje
Poaceae	<i>Calamagrostis</i> sp.	Pasto	Forraje
Poaceae	<i>Calamagrostis chrysantha</i> (J. Presl) Steud.	Pasto	Forraje
Poaceae	<i>Calamagrostis eminens</i> (J. Presl) Steud.	Pasto	Forraje
Poaceae	<i>Calamagrostis rigescens</i> (J. Presl) Scribn.	Pasto	Forraje
Poaceae	<i>Calamagrostis rigida</i> (Kunth) Trin. ex Steud.	Pasto	Forraje
Poaceae	<i>Calamagrostis vicunarum</i> (Wedd.) Pilg.	Pasto	Forraje
Poaceae	<i>Festuca humilior</i> Nees & Meyen	Chillihua	Forraje
Poaceae	<i>Jarava ichu</i> Ruiz & Pav.	Pasto	Forraje
Poaceae	<i>Nassella brachyphylla</i> (Hitchc.) Barkworth	Pasto	Forraje
Ephedraceae	<i>Ephedra americana</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.	Pinco pinco	Medicinal

Fuente: Consorcio WSP, 2018.

### 3.4.1.3. Geología local y mineralogía

De acuerdo con la geología local (WSP, 2018), las rocas más antiguas observadas en el AE pertenecen al Grupo Excélsior, constituidas fundamentalmente por pizarras y filitas devónicas, prosigue en disconformidad la Formación Casapalca del Cretácico Superior, representada por conglomerados y brechas calcáreas. Finalmente, se observan diferentes depósitos de suelos de edad Cuaternaria y depósitos antrópicos de diferente naturaleza (DR Quiulacocha y el área dique). Alrededor del DR e inmediatamente después del DR se tiene depósitos lacustres formados por arcillas oscuras orgánicas, plásticas, en ocasiones con presencia de gravas polimícticas redondeadas.

El material del DR, así como el material del depósito de desmonte (DDM) Excélsior, tiene sus orígenes en el depósito polimetálico Zn–Pb–(Ag–Bi–Cu) de Cerro de Pasco. El mineral del depósito polimetálico se caracteriza por ser rico en pirita (FeS) y los sulfuros son el principal soporte del cobre (Cu). Durante las primeras décadas del siglo XX se extrajeron recursos de cobre (Cu) cuya mineralogía estaba dominada por calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) asociada a enargita (Cu<sub>3</sub>AsS<sub>4</sub>), posteriormente desde 1947 la explotación de los cuerpos Pb-Zn (galena-PbS y esfalerita-ZnS) reemplazaron a los carbonatos (principalmente dolomita, CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y siderita, FeCO<sub>3</sub>) del grupo Pucará (Dold et al., 2008).



#### **3.4.1.4. Hidrología**

De acuerdo al estudio Hidrológico (WSP, 2018), en esta sección se destaca el balance hídrico del DR, siendo las principales fuentes de ingreso y salida las siguientes:

Las fuentes de los flujos de entrada al DR Quiulacocha:

- ✓ Flujo de entrada aguas arriba proveniente del DDM Excélsior: filtraciones de agua subterránea (vertederos) y escorrentía del área de aporte aguas arriba del DR.
- ✓ Infiltración y escorrentía de la precipitación proveniente del DR Quiulacocha.

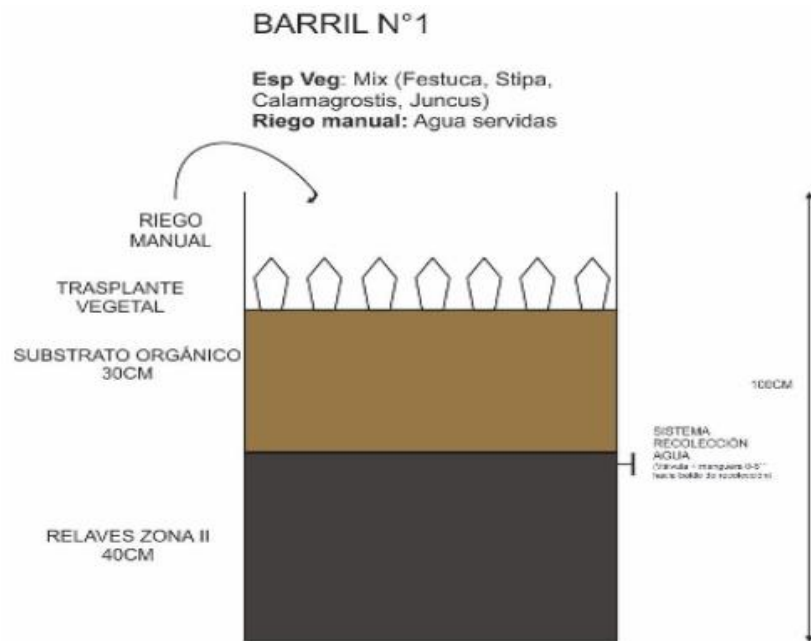
Los flujos de salida del sistema son:

- ✓ El agua recolectada en el borde aguas abajo del DR Quiulacocha y bombeada al depósito de relaves Ocroyoc.
- ✓ El flujo de agua recolectada en la poza de filtraciones del DR Quiulacocha.
- ✓ El flujo de salida de agua subterránea (pie del dique principal).

#### **3.4.2. DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE LA PRUEBA DE BARRIL**

El diseño y configuración lo realizó un equipo especializado de ingenieros liderado por Ph. Jochen Smuda, Senior de consorcio WSP, encargado de la supervisión del proyecto, el barril es la simulación de la zona no saturada del depósito de relaves de Quiulacocha, en un barril de dimensiones: 0.9m x 1m x 1m y se detalla en los 2 siguientes gráficos.

Ilustración 3. Configuración de la prueba de barril



Fuente: WSP, 2018.

Ilustración 4. Diseño de distribución de especies en el barril

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2		Ca						Fe	
3					Sc				
4									
5		St						Di	
6					Fe				
7									
8		Sc						Ca	
9									
10			Di			St			
11									

- Scirpus californicus*
- Calamagrostis vicunarium*
- Festuca dolichophylla*
- Distichia muscoides*
- Stipa lchu*

Fuente: WSP, 2018

### **3.4.3. UBICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE RELAVE, EFLUENTES DOMESTICOS, ESPECIES VEGETALES, TOPSOIL Y AGUA NATURAL.**

#### **3.4.3.1. UBICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE RELAVE**

Para el relave que se utilizó en la prueba de barril se tomaron las cantidades necesarias del sector 2 (zona aguas abajo del dique flotante) del DR Quiulacocha en las coordenadas 359956 E y 8816460 S, donde se realizó la excavación de 30-60cm de profundidad para tomar una muestra representativa para la prueba de barril, se realizó una mezcla del material de la superficie con el material de las capas inferiores hacia 40cm de profundidad. Muestreo de suelo

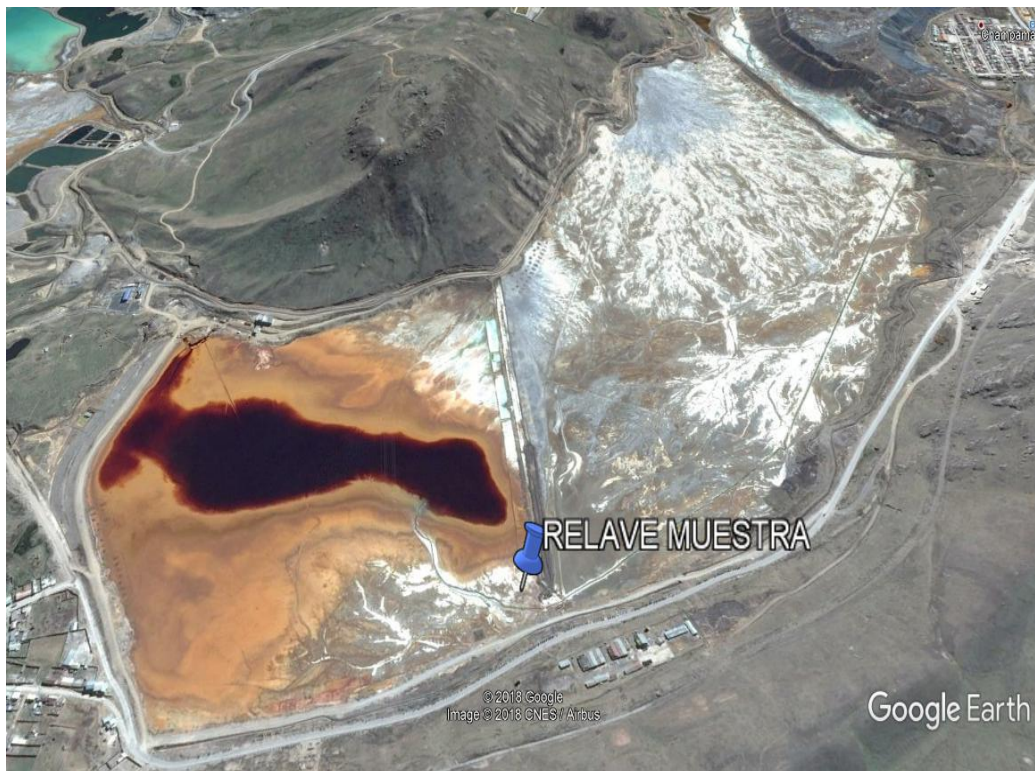
La recolección se realizó llenando baldes de plástico (Ilustración 5 ) y realizando transporte de la zona de recolección hacia la base militar con camioneta. En la siguiente ilustración se aprecia el registro fotográfico de la recolección de relave ejecutado previo al proceso de llenado de los barriles.

*Ilustración 5. Recolección de relave en la Zona II de la relavera de Quiulacocha*



Fuente: WSP, 2018

*Ilustración 6. Ubicación del punto de recolección de relave en la Zona II de la relavera de Quiulacocha*



Fuente: Google Earth

### 3.4.3.2. UBICACIÓN DE PUNTOS DE RECOLECCIÓN DE EFLUENTES DOMÉSTICOS

Durante la visita de campo del día 04 de junio se evaluó diferentes puntos potenciales para recolectar los efluentes domésticos provenientes de la ciudad de Cerro de Pasco. Según la profundidad de los canales perimetrales del DR Quiulacocha y las facilidades de acceso, se decidió con WSP y Activos Mineros recolectar los efluentes en los puntos indicados en el Mapa.

Tabla 6. Ubicación de efluentes

Estación	Descripción	Coordenadas UTM WGS 84 (Zona 18S)		Altitud (msnm)	Tipo
		Este (m)	Norte (m)		
EFL-01	Ubicado en el canal de la margen derecha del DR Quiulacocha*	359 527	8 816 465	4270	Efluente doméstico
EFL-02	Ubicado en el canal de la margen izquierda del DR Quiulacocha.	360 284	8 817 917	4287	Efluente doméstico

Fuente: Consorcio WSP, 2018

\*En su recorrido recibiría aportes de la zona de operaciones de cerro SAC y de la ciudad de Pasco.

*Ilustración 7. Ubicación de puntos de recolección de efluentes domésticos*



Fuente: Google Earth Pro

*Ilustración 8. Punto 1 del recojo de efluentes ubicado en el margen izquierdo de la relavera Quiulacocha*



Fuente: Consorcio WSP, 2018

Ilustración 9. Punto 2 del recojo de efluentes ubicado en el margen derecho de la relavera Quiulacocha.



Fuente: Propia del autor

### 3.4.3.3. UBICACIÓN DE RECOLECCIÓN DE ESPECIES VEGETALES

Las especies locales son las que se identificaron alrededor de la laguna de Quiulacocha (*Stipa Ichu*, *Calamagrostis vicunarum*, *Festuca dolichophylla*, *Distichia muscoides*) y la especie foránea es la que se identificó en los alrededores de la Provincia de Pasco, la *Scircus californicus* y que fue seleccionada por su potencial de remoción de metales. Además, son las especies características del ambiente que proporcionan riqueza y/o complejidad estructural y funcional al ecosistema. En particular, se tuvo en cuenta las plantas que crecen en las parcelas demostrativas sobre el relave, en el borde del DR Quiulacocha.

Las especies locales y foráneas fueron colectadas a una distancia máxima de 50 km de la ciudad de Cerro de Pasco (distancia máxima para la *Scripus*). En el siguiente cuadro se presentan las referencias de los puntos de recolección de cada especie señalada.

*Ilustración 10. Ubicación del sitio de recolección de Scircus californicus (Totora)*



Fuente: Google Earth



Ilustración 11. Ubicación del sitio de recolección de *Scircus californicus* (Totora)



Fuente: WSP, 2018

Ilustración 12. Características y lugar de las especies vegetales

<b>Especies</b>	<b>Número de individuos</b>	<b>Características</b>	<b>Proveniencia: Locales/Foráneas</b>
<i>Scircus californicus</i> (Totora)	2	Porte alto	Foráneas – Centro Poblado de Huayre, Junín – Bordes del lago Chinchaycocha
<i>Calamagrostis vicunarum</i>	2	Porte corto	Local – Huayre, Junín
<i>Festuca dolichophylla</i>	2	Porte alto	Local – Huayre, Junín
<i>Stipa ichu</i>	2	Porte alto	Local – Huayre, Junín
<i>Distichia muscoides</i>	2	Porte corto	Local – Cuchis Chico, cerca de Cuchis Grande.

Fuente: WSP, 2018

*Ilustración 13. Recolección de Scircus californicus*



Fuente: Consorcio WSP, 2018

*Ilustración 14. Recolección de Distichia muscoides*



Fuente: Consorcio WSP, 2018

*Ilustración 15. Especies vegetal a trasplantar en los barriles*



Fuente: WSP, 2018.

#### **3.4.3.4. RECOLECCIÓN DEL TOPSOIL**

La materia orgánica está conformada por una mezcla de material conformado por 95% de tierra de la Comunidad Quiulacocha y un 5% con guano de ovino. Esto se puede conseguir mezclando 1,5 m de tierra con 1,5 saco (60 kg) de guano de ovino de la Comunidad de Quiulacocha.

Se realizó la mezcla de la manera la más homogénea posible se debe primero echar la tierra en el piso, repartir encima uniformemente el guano de isla, y gracias a una pala mezclar los dos insumos.

Luego desplazar la mezcla preliminar gracias a pala, realizando otra fase de mezcla para asegurarse de obtener un top soil muy homogéneo para su uso en los barriles. En la siguiente ilustración se aprecia el registro

fotográfico de la recolección de top soil ejecutado previo al proceso de llenado de los barriles

*Ilustración 16. Proceso de elaboración del top soil: mezcla tierra y guano de ovino.*



Fuente: WSP, 2018

#### **3.4.3.5. UBICACIÓN DE LA FUENTE DE AGUA NATURAL**

La fuente de agua seleccionada se encuentra a unos 300 m de la base militar y la salida de la captación es a través de una tubería de 2" (Ilustración 17) Para un mejor abastecimiento se instaló una reducción de PVC C-10 de 2" a 1/2", además de una manguera de 3/4" de 30 m para poder trasladar el agua y así facilitar el llenado de las galoneras que se usarán para el riego.

Tabla 7. Ubicación de la fuente de agua natural

Estación	Descripción	Coordenadas UTM WGS 84 (Zona 18S)		Altitud (msnm)
		Este (m)	Norte (m)	
ASUP-05	Manantial de agua de consumo doméstico, ubicado a 300 m antes de la entrada a la base militar	369 527	8 816 811	4292

Fuente: Consorcio WSP, 2018

Ilustración 17. Detalle de la fuente de agua que se habilito.



Fuente: Consorcio WSP, 2018

#### 3.4.4. INSTALACIÓN DEL BARRIL DE PRUEBA

Para la instalación de barril de prueba se realizó en 5 etapas:

- Etapa 1: armado de barril
- Etapa 2: instalación de las válvulas laterales de drenaje
- Etapa 3: relleno de barril
- Etapa 4: trasplante vegetal
- Etapa 5: primer riego y homogeneización de la superficie
-

## Etapa 1: Armado de barril

Para el armado de los barriles se desarrolló las siguientes actividades:

- ✓ Corte de fierro. - Se cortó las dos barras metálicas de la jaula de protección que se encuentran en la parte superior del barril.
- ✓ Corte de plástico. - Se cortó la superficie superior de los barriles para poder abrirlos usando arco de sierra.
- ✓ Limpieza. – Se removió todo el aceite y otras sustancias con agua, detergente y soda caustica.
- ✓ Perforación del orificio de válvula: Con un taladro, se realizó una perforación de 1/2" de diámetro y se ubicó a una altura de 38 cm para la instalación posterior de la válvula.
- ✓ En las siguientes ilustraciones se muestra gráficamente el desarrollo de las principales actividades de armado de los barriles

*Ilustración 17. Etapa 1: Armado de barril*



Fuente: WSP, 2018.

## **Etapa 2: Instalación de las válvulas laterales de drenaje**

La instalación de las válvulas laterales de drenaje se realizó en dos (02) etapas: la primera es el armado y la instalación del conjunto niple con la unión con rosca y la segunda es la colocación de la tubería PVC y válvula de drenaje.

En el siguiente cuadro se presenta la descripción y esquema de ejecución de la etapa de armado del niple con la unión rosca.

Ilustración 18. Armado del niple con la unión rosca

Ítem	Secuencia de actividades	Esquema procedimiento
<b>1. Armado de niple con la unión rosca</b>		
1.1	Limpiar con una lija la superficie del contorno del orificio de 1/2". Lijar las partes interior y exterior del barril.	
1.2	Cortar con una tijera cuatro pedazos de jebes de una cámara de llanta en forma circular con un diámetro mayor a la válvula de PVC de 1/2".	
1.3	Colocar tres pedazos de jebes sobre el medio del niple de PVC roscado de 1/2".	
1.4	Colocar cinta de teflón a un costado del niple y luego colocar una unión con rosca.	
1.5	Añadir pegamento Oetay color azul en la superficie lijada del orificio del interior y exterior del barril.	
<b>2. Instalación del sellado a presión</b>		
2.1	Colocar un pedazo de jebes sobre el niple con el fin de sellar el flujo de agua.	
2.2	Luego colocar la unión rosca al niple el cual presiona a los jebes evitando el pase de un flujo de agua.	
2.3	Dejar secar el pegamento por 45 minutos mínimo.	
<b>3. Colocación de la tubería PVC de drenaje y válvula</b>		
3.1	Cortar con un arco con sierra un pedazo de tubería PVC de 1/2" de 5 cm, y añadir pegamento Oetay color azul a ambos lados.	
3.2	Introducir un lado de la tubería en la unión rosca del exterior del barril y el otro lado introducirlo en la válvula de PVC de 1/2".	
3.3	Cortar con un arco con sierra 10cm de tubería, añadir pegamento Oetay color azul en un lado e introducirlo a la válvula de PVC de 1/2".	
<b>4. Instalación del tubo ranurado</b>		
4.1	Cortar con un arco con sierra un pedazo de tubo de 20 cm y a cada 1 cm cortar transversales hasta la mitad del tubo.	
4.2	Añadir pegamento Oetay color azul a un costado del tubo ranurado, e introducirlo en la unión rosca de 1/2" del interior del barril	

Fuente: WSP, 2018



En la siguiente ilustración se presenta el registro fotográfico de las actividades de instalación de válvulas laterales de drenaje llevadas a cabo durante la instalación del barril bajo supervisión de WSP.

*Ilustración 19. Instalación de válvula lateral de drenaje.*



Fuente: WSP, 2018

### **Etapas 3: Relleno de barril**

Antes de iniciar el llenado de barril, se usó un marcador indeleble, y se marcó las medidas correspondientes a los diferentes insumos del relleno de acuerdo al diseño.

El procedimiento de relleno de barril se realizó en 2 fases:

### ***Primera fase de relleno de barril***

Haciendo uso de baldes de plástico con relave, se rellenó los barriles hasta la marca definida de 40 cm, se uniformizó la altura del relave regularmente. Una vez alcanzada la marca del barril, se añadió agua hasta la saturación de relave. Luego de saturar el relave se dejó el relave con agua por 8 horas.

Para no malograr el tubo de PVC de drenaje interno y la válvula, se usó una protección de plástico alrededor del tubo de PVC, de manera que evite golpear el tubo durante el relleno. Ver ilustraciones a continuación.

*Ilustración 20. Llenado del barril con relave*



Fuente: WSP, 2018

*Ilustración 21. Saturación con agua del relave.*



Fuente: WSP, 2018

*Ilustración 22. Protección del tubo PVC durante el llenado de barril*



Fuente: WSP, 2018

### ***Instalación del tubo de drenaje***

El tubo PVC de drenaje, se encuentra a la interfaz entre el relave y la materia orgánica.

Para evitar que partículas gruesas de relave o de materia orgánica entren en el tubo y lo obstruyan, se trabajó con tres (03) filtros alrededor del tubo, permitiendo solamente la escorrentía del agua del barril. Los filtros usados son malla de plástico, arena gruesa y piedra de ¼" de diámetro.

- ✓ Primero se colocó la malla de plástico alrededor del tubo, cuidando mucho la manipulación para no dejar de ingresar rocas o arena por las ranuras del tubo. Realizar tres (03) vueltas con la malla alrededor del tubo.
- ✓ Luego se colocó arena gruesa con un espesor de 10 cm, y por último la piedra de ¼" de diámetro colocándose alrededor de la tubería con un espesor de 5 cm.

*Ilustración 23. Instalación del tubo de drenaje*



Notas: a. Malla plástica; b. tubo PVC de ½" ranurado; c. y d. Instalación de la piedra y arena gruesa.  
Fuente: WSP, 2018

### **Segunda fase de relleno de barril**

Antes de proceder a la segunda fase de llenado de barril se limpió las paredes del barril de las salpicaduras de relaves, asegurando que la reacciones entre los microorganismos contenidos en la materia orgánica se realizarán solamente en la parte de interfaz relave-top soil. De esta manera se prevenimos el efecto negativo de partículas de relave en el crecimiento de las plantas.

Para esto, primero, rascar los depósitos de relaves o salpicadura gracias a espátulas y luego terminar la limpieza con un guaipe húmedo. Ver la siguiente ilustración.

*Ilustración 24. Limpieza de las paredes del barril*



Fuente: WSP, 2018

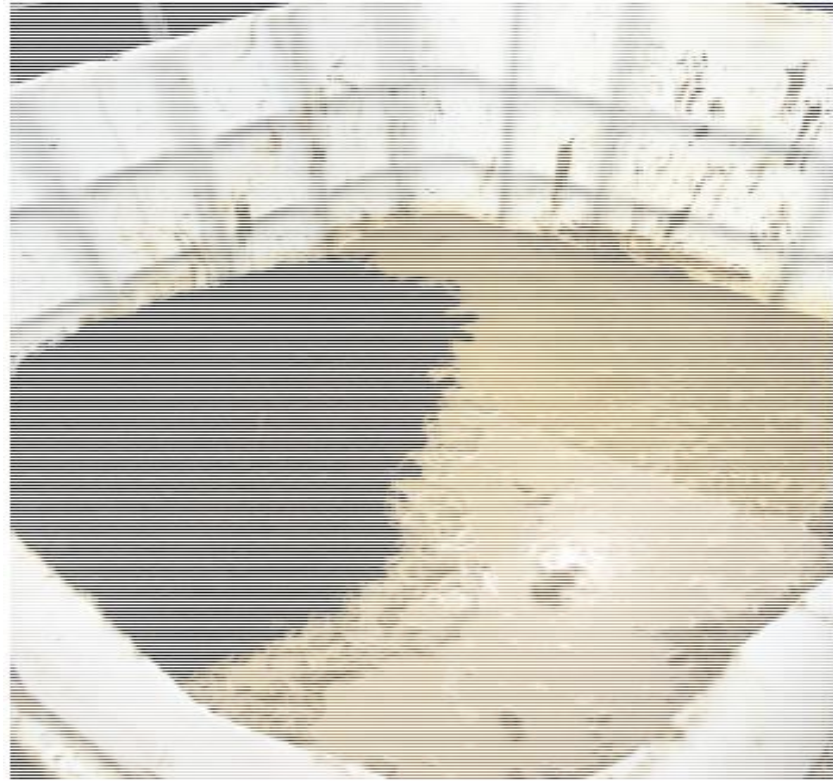
Luego de haber llenado el barril con relave, de la instalación del tubo de drenaje, y limpieza de las paredes; se terminó de llenar el barril con la materia orgánica preparada previamente.

Esta segunda fase se realizó con mucho cuidado, para no mezclar tierra orgánica y relave, y conservar una superficie de interfaz relave-top soil plana, además de no generar nuevas salpicaduras en las paredes del barril.

Se llenó hasta 2 cm – 3 cm arriba de la marca prevista, previniendo una futura compactación del suelo luego del riego.

Finalmente, se aseguró un nivel regular y superficie homogénea de tierra en el barril, facilitando el proceso de los primeros riegos.

*Ilustración 25. Llenado del barril con materia orgánica*



Fuente: WSP, 2018

#### **Etapa 4: Trasplante vegetal**

El trasplante se realizó en dos etapas: la distribución de las especies según el diseño establecido y el trasplante en sí mismo.

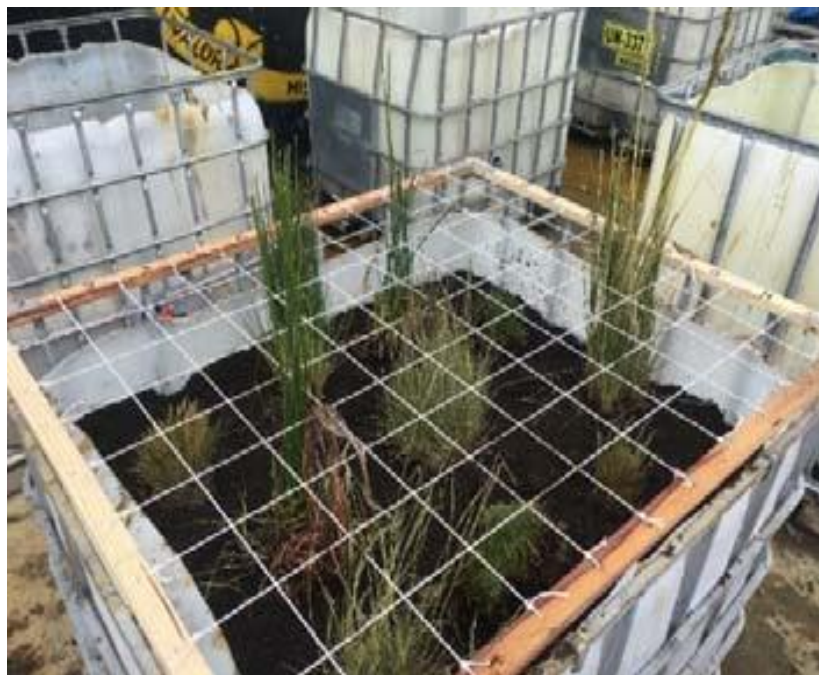
Esta etapa se debe realizó de manera continua; es decir, las plantas luego de ser ubicadas en la superficie del barril se trasplantaron sin espera.

#### **Distribución de las especies en la superficie del top soil**

Al interior de una malla metálica de 1m<sup>2</sup> (0,90 m x 1,10 m), se distribuyeron todas las especies vegetales en la superficie del top soil según lo indicado en el diseño presentado en el gráfico y de acuerdo a la siguiente secuencia de pasos:

- Superponer el cuadrante arriba del barril, en una posición estable. Considerar la misma orientación del cuadrante por todos los barriles, para facilitar las comparaciones ulteriores entre barriles.
- Posicionar cada planta gracias a su código, según el gráfico 24. Por ejemplo, en la posición B2 del cuadrante (posicionado sobre el barril) se debe ubicar una *Calamagrostis vicunarium*.
- Luego de posicionar todas las plantas y verificar que cada una esté presente (10 individuos en total), se puede retirar el cuadrante.

*Ilustración 26. Distribución de especies utilizando la malla metálica.*



Fuente: WSP, 2018



## **Trasplante de las especies**

Las especies vegetales se trasplantaron una por una de acuerdo con la siguiente secuencia de pasos.

Se levantó la especie a trasplantar y abajo con el apoyo de una pala chica se realizó un hueco dentro la tierra orgánica. El hueco tuvo un diámetro más grande que el de la circunferencia de las raíces de la planta, por lo menos de 5 cm.

La profundidad se consideró de acuerdo a la raíz de cada especie de planta considerando 2 cm de profundidad que la altura de las raíces. La materia orgánica que se encuentra al fondo del hueco, y que va a estar en contacto no debe ser compactada para permitir el mejor enraizamiento de las plantas.

Se procedió con la inserción de las plantas en el hueco y se llenaron los espacios vacíos con más topsoil. Con los dedos se compactó un poco el suelo añadido alrededor de la planta. Con un suelo no demasiado compactado, la planta debe mantenerse bien recta y no caer.

*Ilustración 27. Trasplante de plantas*



Fuente: WSP, 2018

#### **Etapas 5: primer riego y homogeneización de la superficie**

El primer riego se realizó en seguida a cada trasplante. Con la ayuda de una regadera se realizó un riego de 20 L, 5 L a la vez, y esperar 5 a 10 minutos entre cada riego.

*Ilustración 28. Distribución especial de las especies en el barril*



Fuente: WPS, 2018

### **3.4.5. OPERACIÓN DE BARRIL Y RECOLECCIÓN DE EFLUENTES**

#### **3.4.5.1. RECOLECCIÓN Y MEZCLA DE LOS EFLUENTES**

Para facilitar el proceso de recolección de los efluentes, y debido a la profundidad de los canales, se utilizaron un balde y una soga, y el volumen recolectado fueron llenados en las galoneras respectivas para los efluentes Efl-01 y Efl-02. La mezcla de efluentes se realizó interdiario en la Base Militar, lugar donde se encuentra el barril de prueba.

*Ilustración 29. Galoneras habilitadas para la recolección de efluentes y realización de mezcla.*



*Fuente: Consorcio WSP, 2018*

Antes de realizar la mezcla de efluentes para el riego se midió los parámetros de campo de los efluentes 1 y 2. Se explica el proceso en la siguiente sección.

La mezcla agua-efluente fue compuesta de 50% de efluentes y 50% de agua natural, o sea 25% de Efl-01, 25 % de Efl-02 y 50% de agua natural. La dilución de los efluentes permitirá aliviar cualquier aumento brusco y excesivo de componentes nocivos para las especies vegetales.

*Tabla 8. Cantidades de efluentes y agua natural requeridas para la mezcla de riego.*

<b>Efl-01 + Efl-02 (25%) + (25%)</b>	<b>Agua natural (50%)</b>	<b>Volumen total para riego</b>
5L + 5L	10 L	20 L

Fuente: Consorcio WSP, 2018

La válvula de drenaje fue cerrada antes del riego (día sábado) hasta la finalización del riego, y la toma de muestra de agua puntual.

### 3.4.5.2. APLICACIÓN DEL RIEGO

En base a las pruebas realizadas durante la fase de adaptación de las especies vegetales, se pudo mejorar las pautas de riego preestablecidas. El equipo de especialistas de WSP y AMSAC, ha validado de manera consensuada el régimen de riego interdiario del barril y el manejo correspondiente de las válvulas laterales de drenaje.

En caso de precipitaciones continuas el régimen de adaptó según la cantidad de lluvia recolectada en el pluviómetro (o envase graduado). El procedimiento de evaluación en caso de lluvia notable fue lo siguiente:

- ✓ Se observó la lámina de agua presente en el pluviómetro (o envase graduado).
- Si la lámina fue superior a 2 cm, no se regó
- Si la lámina fue inferior a 2 cm, se regó la mezcla de 20 L.

*Ilustración 30. Envase de medición de lluvia*



Fuente: Consorcio WSP, 2018

Como se ha indicado el riego se realizó inter-diario, por ello, durante las semanas 1 y 3 del mes se aplicará 4 días de riego y durante las semanas 2 y 4 se aplicará 3 días de riego. Considerando la semana 1 del mes como la primera semana de puesta en operación de las pruebas de barril. Asimismo, el riego y toma de datos debe ser a la misma hora para asegurar un tiempo de retención de agua en los barriles uniforme de 24 h.

El barril de prueba funcionó como un sistema abierto, debido a que el sistema real tendrá ingresos continuos de escorrentías y salidas rápidas de efluentes, tratando de aproximar las condiciones que se desarrollarán en un cierre seco (considerando relave, topsoil y especies vegetales) del DR Quiulacocha. De esta manera se podrá analizar como varía la calidad de los lixiviados en el tiempo.

Se resumen las actividades de riego y medición de parámetros de campo (pH, conductividad eléctrica, temperatura, TDS y oxígeno disuelto) a ser ejecutado en los barriles 1, 2 y 3.

#### **3.4.5.3. RECOLECCIÓN DE MUESTRA DE LIXIVIADOS DEL BARRIL DE PRUEBA.**

Para la colección de las muestras se tomaron las siguientes consideraciones:

- Cerrar la válvula cuidadosamente, para detener el flujo de filtración.
- Agitar la galonera de recolección para obtener una mezcla homogénea.

- Tomar la muestra necesaria para la medición de los parámetros de campo.

### **3.4.6. MONITOREO DEL BARRIL**

#### **3.4.6.1. MONITOREO INTERDIARIO**

Se llenará la ficha de parámetros de campo con las mediciones se realizaron con el equipo Multiparámetro portátil (pH/CE/TDS/Temp) de Calibración automática (0,00 a 20,00 mS/cm) HI 991300 así mismo se consideraron las características del lixiviado y condiciones de la cobertura biológica del barril.

#### **3.4.6.2. MONITOREO MENSUAL**

Mensualmente se llenaron los envases necesarios para el muestreo de conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos (TDS), sólidos totales suspendidos (TSS), acidez, alcalinidad, sulfatos, aniones (incluyendo sulfuros), metales totales y disueltos (incluyendo mercurio y Cr<sup>6+</sup>), nitratos, nitritos. La toma de muestra mensual se realizará según la metodología de Inspectorate Services Perú S.A.C, y los análisis en laboratorio serán a cargo del mismo laboratorio. Estos análisis constituyen la línea de base del experimento, y permitirán comparaciones con los próximos resultados mensuales durante toda la fase de operación.

### 3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Variables	Técnicas	Instrumentos
Independiente	-Análisis físico químico de entrada	- Muestreo de agua
		- Ficha de campo de parámetros biológicos.
Calidad y cantidad de agua de riego de efluentes	de efluentes domésticos.	- Ficha de parámetros de campo
Comportamiento de cobertura biológica	- Observación cualitativa de cobertura biológica	- Obtención de especies vegetales
Dependiente	- Análisis físico químico.	- Muestreo de agua
Estabilización geoquímica de relaves	- ECAs para agua de categoría 3	- Ficha de parámetro



## TÉCNICAS

**Metodología de colecta:** Consiste en la recolección de datos de parámetros de campo y muestras para su análisis posterior de gabinete.

**Procedimiento analítico:** Se realizará la interpretación de los datos de campo y análisis físico-químico en el laboratorio la cual nos servirá para determinar la estabilidad geoquímica.

## INSTRUMENTOS

✓ **Recursos Tecnológicos:**

- Computadora laptop.
- Aparatos de medición-multiparámetro marca Hanna HI 991300
- Cámara fotográfica.
- Camioneta

✓ **Equipo de seguridad para recojo de efluentes y trabajo en campo como:**

- Tyvek
- Mascarilla
- Guantes
- Zapato de seguridad
- Protector casco

✓ **Herramientas**

- Huincha
- Pala

- Pico
- Arcosierra

✓ **Materiales**

- Relave
- Topsoil
- Especies vegetales
- Balde de 5L de capacidad
- Soga de 2 m de longitud
- Balde de 20 L de capacidad
- Balde de 8 L de capacidad
- Regadera de 8 L de capacidad
- 2 embudo
- 2 galones de 20L de capacidad
- 20 m de manguera
- 1 galonera de 25 L de capacidad
- 3 jarras transparentes
- Papel tisú
- Agua destilada
- Malla metálica
- Tubo PVC
- Malla verde envolvable 20 cm
- Alcohol en gel
- Jabón liquido

- Cinta de seguridad
- Marcador
- Hoja de campo
- Frascos estériles-varios
- Cooler
- Cinta embalaje
- Preservantes-varios

### **3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS**

Se procederá a la siguiente secuencia para el análisis de datos:

- ✓ Revisión de material recolectado
- ✓ Ordenamiento y codificación de datos
- ✓ Tabulación
- ✓ Codificación textual de datos
- ✓ Gráficos
- ✓ Análisis e Interpretación de datos

Descripción de contexto, situaciones y sujetos para explicar sucesos.

### **3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS**

Durante la investigación se utilizará gráficos, tablas, fichas que mostraran el avance del proceso de evaluación, así mismo los datos serán ingresados y procesados por el programa Minitab 18, para el análisis estadístico y la respuesta de los datos sean exactos.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO E INTERPRETACIÓN DE CUADRO

##### 4.1.1. RESULTADOS DE PARAMÉTROS DE CAMPO DE INGRESO AL SISTEMA PILOTO

*Tabla 9. Parámetros de campo de la mezcla de efluentes de ingreso al sistema piloto.*

FECHA	pH	T (°C)	CE (us/cm)	TDS (ppm)	FECHA	Ph	T (°C)	CE (us/cm)	TDS (ppm)
25/06/18	7,90	10,4	749	375	13/09/18	8,04	9,6	810	420
27/06/18	7,80	10,4	661	330	15/09/18	8,53	12,0	830	320
29/06/18	7,86	11,9	742	373	17/09/18	8,65	12,0	630	360
01/07/18	7,80	15,3	354	708	19/09/18	8,53	10,2	720	350
03/07/18	7,39	10,2	346	698	21/09/18	8,62	9,6	710	416
05/07/18	7,53	12,6	1293	647	23/09/18	7,00	14,7	814	380
07/07/18	7,75	9,4	822	409	25/09/18	8,54	10,6	770	396
09/07/18	7,80	10,3	710	355	27/09/18	8,52	11,2	582	414
11/07/18	7,79	7,1	740	371	29/09/18	8,20	9,0	607	456
13/07/18	7,83	6,7	708	354	01/10/18	8,30	10,8	669	382

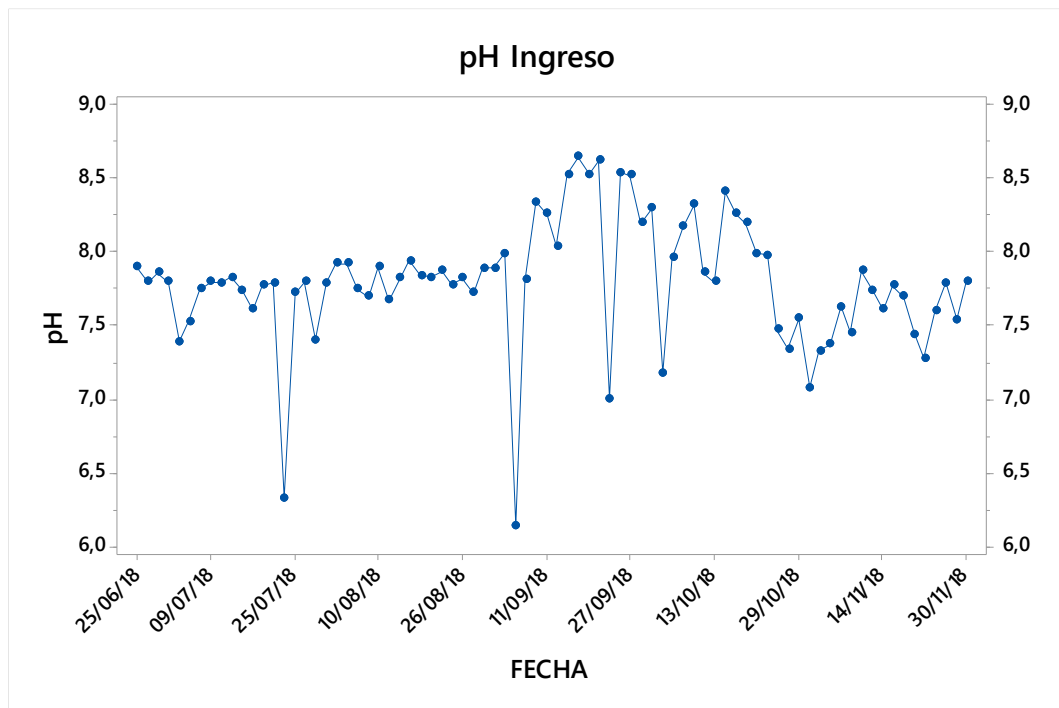
15/07/18	7,74	8,8	735	368	03/10/18	7,18	16,8	710	775
17/07/18	7,61	12,0	670	334	05/10/18	7,96	13,1	488	436
19/07/18	7,77	10,8	625	313	07/10/18	8,17	14,1	625	407
21/07/18	7,79	7,9	665	333	09/10/18	8,32	10,2	598	383
23/07/18	6,33	4,4	1040	517	11/10/18	7,86	14,6	561	614
25/07/18	7,72	11,0	768	382	13/10/18	7,80	7,8	900	442
27/07/18	7,80	9,2	700	407	15/10/18	8,41	8,1	619	463
29/07/18	7,40	17,1	814	367	17/10/18	8,26	13,0	680	503
31/07/18	7,79	11,0	735	292	19/10/18	8,20	8,9	739	366
02/08/18	7,92	13,7	584	342	21/10/18	7,99	12,5	538	397
04/08/18	7,92	7,7	476	381	23/10/18	7,98	13,0	557	311
06/08/18	7,75	16,3	765	322	25/10/18	7,47	8,1	458	304
08/08/18	7,70	6,9	644	284	27/10/18	7,34	10,2	447	446
10/08/18	7,90	8,9	568	362	29/10/18	7,55	11,6	655	499
12/08/18	7,67	14,6	723	283	31/10/18	7,08	16,2	734	429
14/08/18	7,82	11,7	565	343	02/11/18	7,33	12,7	630	520
16/08/18	7,94	11,0	688	367	04/11/18	7,37	10,3	764	511
18/08/18	7,84	12,3	734	389	06/11/18	7,63	14,3	751	338
20/08/18	7,83	10,6	776	324	08/11/18	7,45	21,3	492	350
22/08/18	7,87	11,4	646	270	10/11/18	7,87	12,3	511	368
24/08/18	7,78	11,9	641	281	12/11/18	7,74	3,4	539	388
26/08/18	7,82	12,2	563	253	14/11/18	7,61	10,5	570	378
28/08/18	7,72	9,9	505	288	16/11/18	7,77	11,3	551	292
30/08/18	7,89	13,8	576	247	18/11/18	7,70	9,7	428	324
01/09/18	7,89	16,4	492	242	20/11/18	7,44	10,5	670	456
03/09/18	7,99	15,5	483	360	22/11/18	7,28	12,8	964	519
05/09/18	6,14	12,6	717	430	24/11/18	7,60	9,0	490	333
07/09/18	7,81	11,9	850	760	26/11/18	7,79	15,0	630	430
09/09/18	8,34	12,6	1540	420	28/11/18	7,54	15,7	541	368
11/09/18	8,26	12,0	840	400	30/11/18	7,80	16,8	681	451

Fuente: Propias del autor

## 4.1.2. ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CAMPO DE INGRESO AL SISTEMA

### PILOTO

Gráfico 1: Análisis de pH de la mezcla de efluentes domésticos

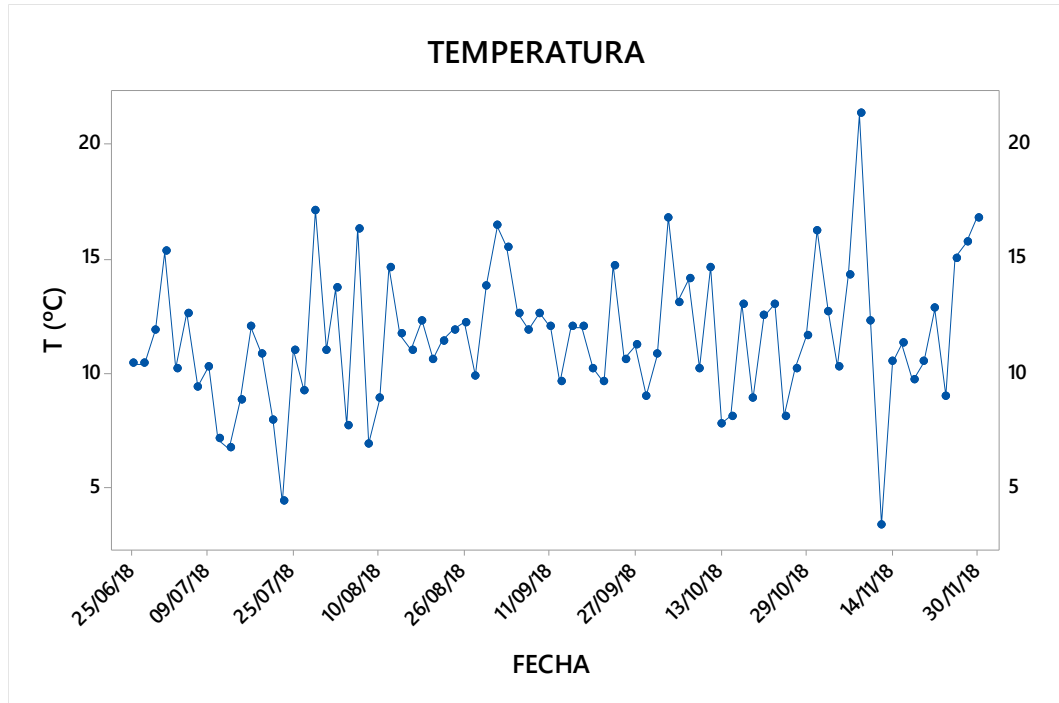


Fuente: Propias de la autora, 2018.

### Interpretación

En el gráfico mostrado se observa que el pH de la mezcla de efluentes domésticos que fueron ingresados al sistema piloto durante los meses de investigación presenta un pH mínimo de 6,14 y máximo de 8,65 en el mes de septiembre.

Gráfico 2: Análisis de temperatura (°C) de la mezcla de efluentes domésticos

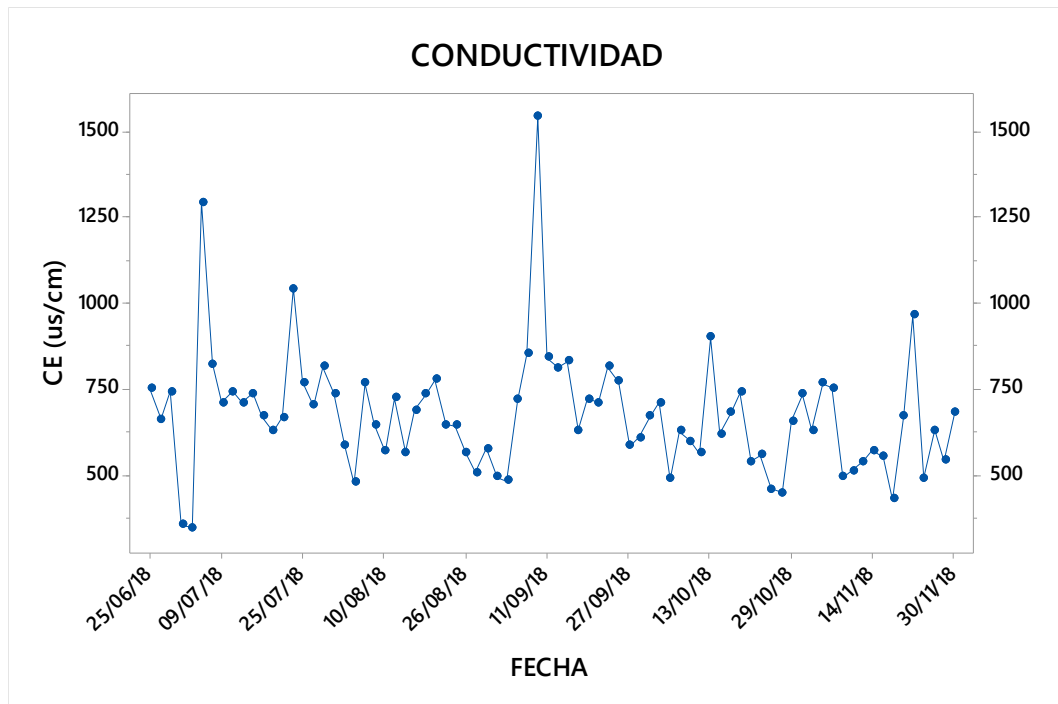


Fuente: Propias de la autora, 2018.

**Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que la temperatura de la mezcla de efluentes domésticos que fueron ingresados al sistema piloto durante los meses de investigación presenta una temperatura mínima de 3,4 y máximo de 22 en el mes de noviembre.

Gráfico 3: Análisis de la conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de la mezcla de efluentes domésticos



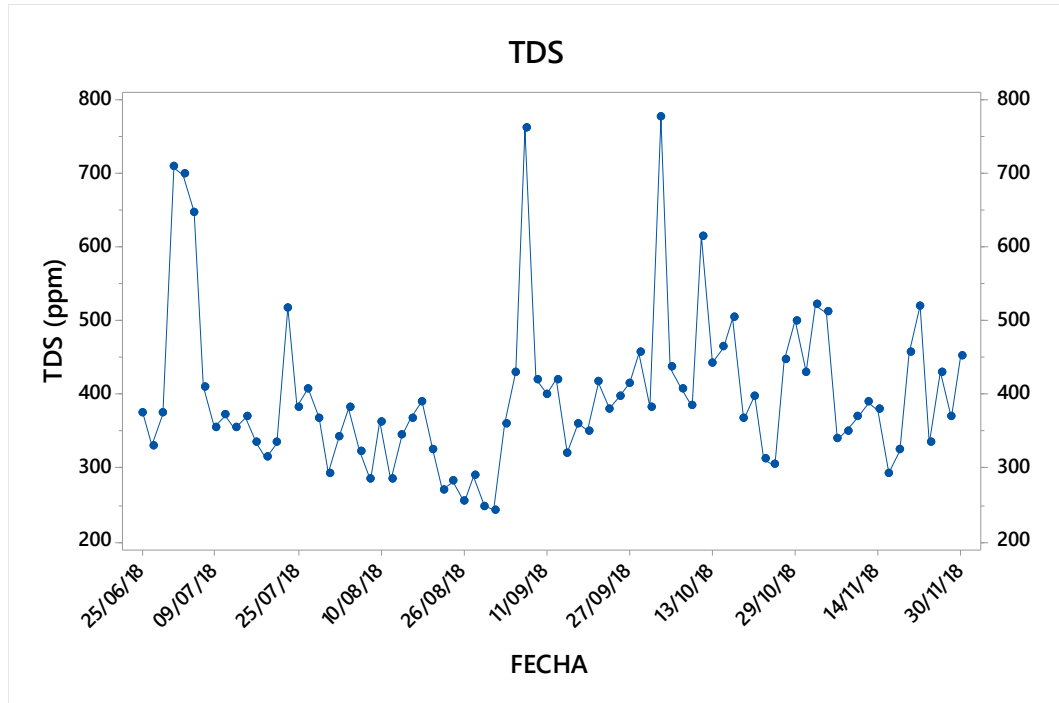
Fuente: Propias de la autora, 2018.

### Interpretación:

En el gráfico mostrado se observa que la conductividad de la mezcla de efluentes domésticos que fueron ingresados al sistema piloto durante los meses de investigación presenta un valor mínimo de 346 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el mes de julio y máximo de 1540 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el mes de septiembre.



Gráfico 4: Análisis de Sólidos totales disueltos (ppm) de la mezcla de efluentes domésticos



Fuente: Propias de la autora, 2018.

### Interpretación:

En el gráfico mostrado se observa que los sólidos totales disueltos de la mezcla de efluentes domésticos que fueron ingresados al sistema piloto durante los meses de investigación presentan un valor mínimo de 242 (ppm) en el mes de septiembre y máximo de 775 (ppm) en el mes de octubre.

### 4.1.3. RESULTADOS DE PARÁMETROS DE CAMPO DEL LIXIVIADO DE SALIDA DEL SISTEMA PILOTO

Tabla 10. Parámetros de campo del lixiviado de salida del sistema piloto.

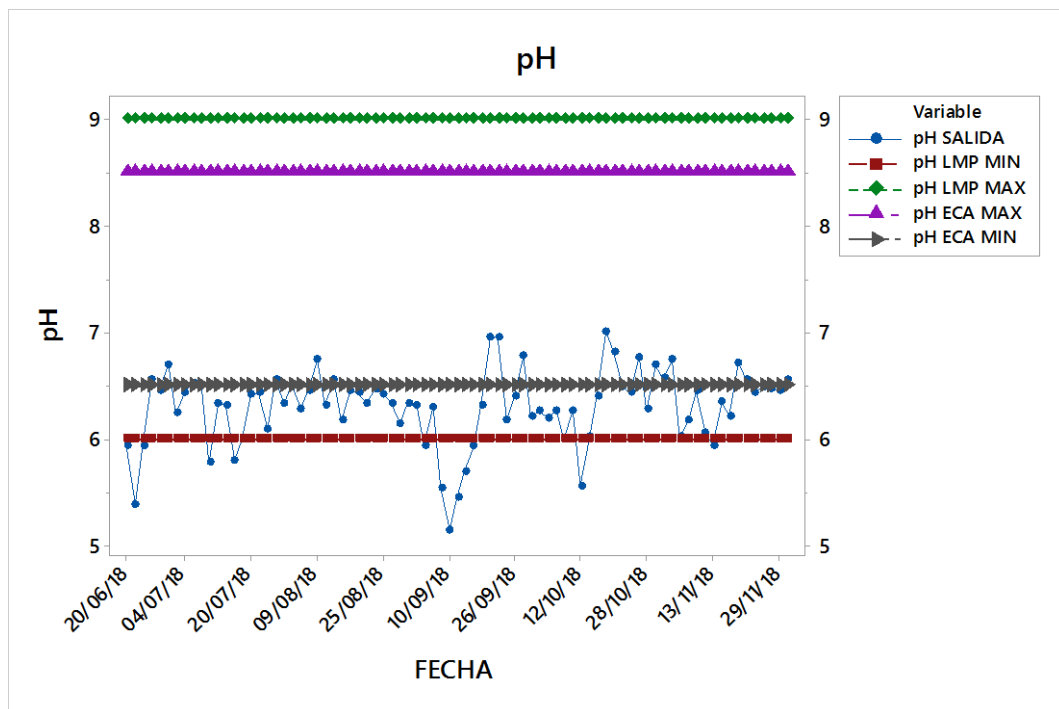
FECHA	pH	T (°C)	CE (us/cm)	TDS (ppm)	FECHA	pH	T (°C)	CE (us/cm)	TDS (ppm)
20/06/18	5,94	13,50	1640	814	12/09/18	5,46	15,80	2780	1390
22/06/18	5,39	12,50	2050	876	14/09/18	5,7	8,80	2990	1510
24/06/18	5,94	9,40	2500	945	16/09/18	5,93	10,50	3020	1510
26/06/18	6,56	10,70	1476	753	18/09/18	6,32	9,00	3280	1640
28/06/18	6,46	10,90	1663	829	20/09/18	6,95	6,10	3140	1570
30/06/18	6,70	10,20	1496	744	22/09/18	6,96	8,30	3300	1650
02/07/18	6,24	6,70	1520	747	24/09/18	6,18	9,80	2259	1255
04/07/18	6,44	5,70	1599	802	26/09/18	6,40	7,00	2284	1552
06/07/18	6,53	15,20	1418	711	28/09/18	6,78	5,70	2122	1488
08/07/18	6,50	9,20	1619	810	30/09/18	6,22	10,20	2095	1431
10/07/18	5,78	9,30	2807	1405	02/10/18	6,26	7,20	2470	1675
12/07/18	6,33	9,30	2026	1016	04/10/18	6,20	7,50	2231	1438
14/07/18	6,32	12,20	2049	1030	06/10/18	6,27	8,40	2251	1534
16/07/18	5,80	4,30	2771	1386	08/10/18	6,00	8,70	2470	1723
18/07/18	6,00	9,40	2997	1501	10/10/18	6,27	12,80	2622	1783
20/07/18	6,42	4,40	2626	1322	12/10/18	5,56	8,50	2546	1736
22/07/18	6,43	9,50	2725	1360	14/10/18	6,02	9,30	2571	1748
24/07/18	6,10	5,10	2882	1441	16/10/18	6,41	13,80	2134	1452
30/07/18	6,55	6,80	3740	1364	18/10/18	7,01	7,09	1988	1354
01/08/18	6,34	8,80	2741	1371	20/10/18	6,82	7,90	2079	1474
03/08/18	6,51	7,50	1346	2693	22/10/18	6,49	7,50	2250	1538
05/08/18	6,29	15,00	2551	1276	24/10/18	6,43	8,80	2050	1395
07/08/18	6,46	7,80	2705	1357	26/10/18	6,77	7,90	1540	1045
09/08/18	6,74	6,50	2595	1297	28/10/18	6,28	15,00	1456	996
11/08/18	6,32	15,10	2342	1172	30/10/18	6,69	9,30	1430	998
13/08/18	6,55	4,40	2485	1243	01/11/18	6,57	10,40	1424	969
15/08/18	6,17	7,20	2717	1372	03/11/18	6,74	9,10	1569	1096
17/08/18	6,46	10,50	2432	1400	05/11/18	6,02	16,30	1368	929
19/08/18	6,43	15,40	2189	1097	07/11/18	6,18	10,60	1828	1242
21/08/18	6,34	10,30	2279	1143	09/11/18	6,45	9,20	1276	870
23/08/18	6,47	7,60	2282	1143	11/11/18	6,06	16,10	1320	898
25/08/18	6,42	5,30	2439	1219	13/11/18	5,94	16,90	1201	817
27/08/18	6,34	6,70	2413	1208	15/11/18	6,35	12,00	1237	842
29/08/18	6,15	9,60	2515	1257	17/11/18	6,22	11,00	1180	804

31/08/18	6,34	6,60	2496	1250	19/11/18	6,72	10,30	1035	703
02/09/18	6,32	9,00	2443	1233	21/11/18	6,56	9,10	901	613
04/09/18	5,94	13,30	2403	1202	23/11/18	6,43	14,00	1490	746
06/09/18	6,30	3,00	2800	1410	25/11/18	6,49	10,70	897	610
08/09/18	5,54	6,80	3270	1650	27/11/18	6,47	16,50	923	629
10/09/18	5,15	10,90	3320	1660	29/11/18	6,46	11,70	1018	684
					01/11/18	6,56	10,30	932	654

Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### 4.1.4. ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE CAMPO DEL LIXIVIADO DE SALIDA DEL SISTEMA PILOTO

Gráfico 5: Análisis de pH del lixiviado de salida

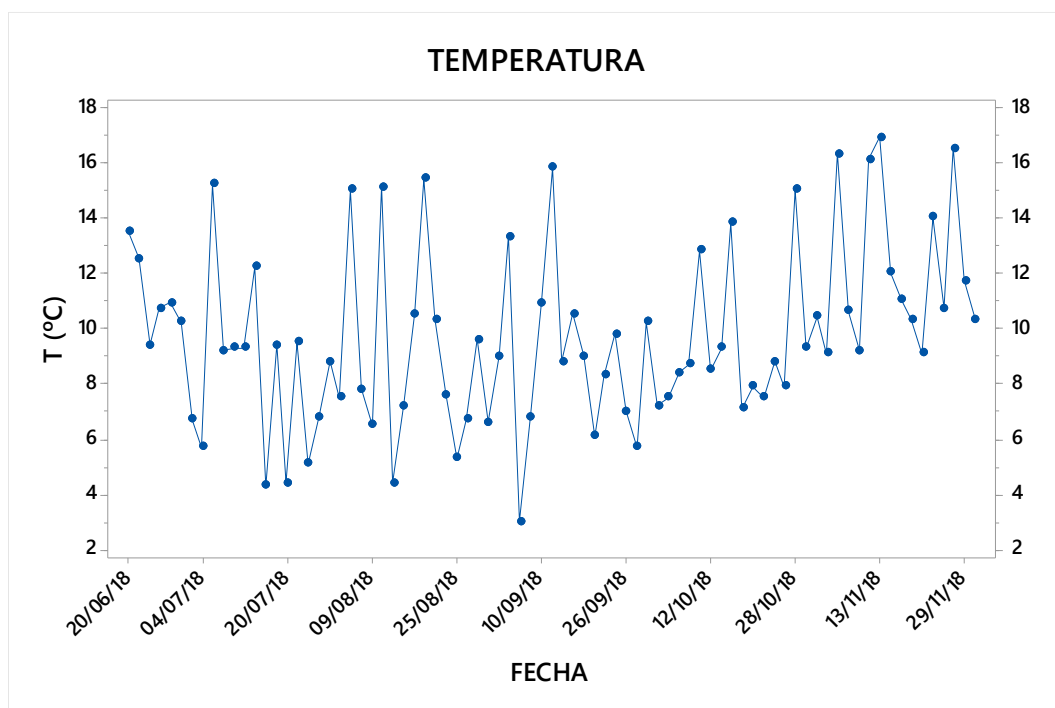


Fuente: Propias de la autora, 2018

### **Interpretación del parámetro pH en comparación al DS N° 010-2010-MINAM y al DS N°004-2017-MINAM**

En gráfico mostrado se observa que el LMP, presenta un valor de 6 y 9 y en el ECA categoría 3 un valor de 6,5 a 8,5 para el parámetro pH, observamos que al inicio de operación del barril esta debajo 6 y en ese mismo mes llega a un valor casi 7, a medida que aumentamos las repeticiones de riego entre julio y a inicios de septiembre se llegó a estabilizar en un rango de 6 a 7, a quincena de septiembre observamos que el pH baja en un rango de 5 a 6 y en los siguientes meses vuelve a estabilizarse, con la mayoría de veces de mediciones en campo del lixiviado del barril observamos que esta investigación está dentro del rango permitido de pH tanto para LMP, sin embargo algunos días de medición no se llegó a cumplir el ECA establecido.

Gráfico 6: Análisis de temperatura del lixiviado de salida



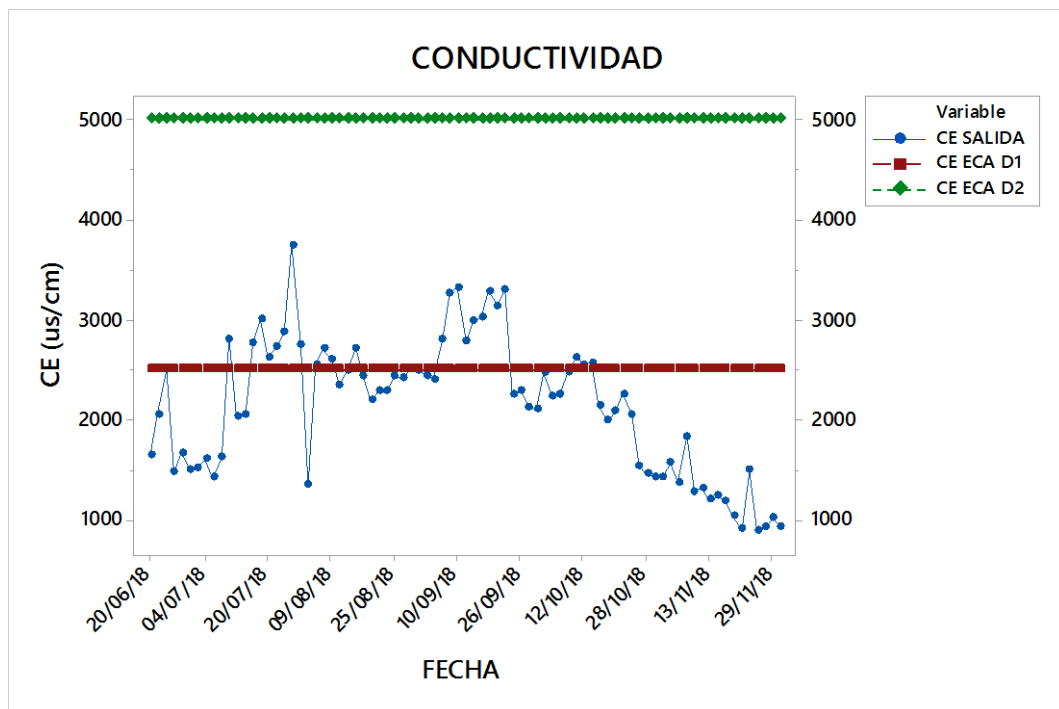
Fuente: Propias de la autora, 2018.

### Interpretación del parámetro temperatura en comparación al DS

#### Nº004-2017-MINAM

En el gráfico mostrado se observa que la temperatura varía considerablemente teniendo un valor mínimo 3 (°C) y máximo de 16 (°C), según el ECA la temperatura debe estar en  $\Delta 3$ , la variación de temperatura de la investigación se debe a que los lixiviados estuvieron expuestos a las condiciones de temperatura ambiente.

Gráfico 7: Análisis de Conductividad del lixiviado de salida

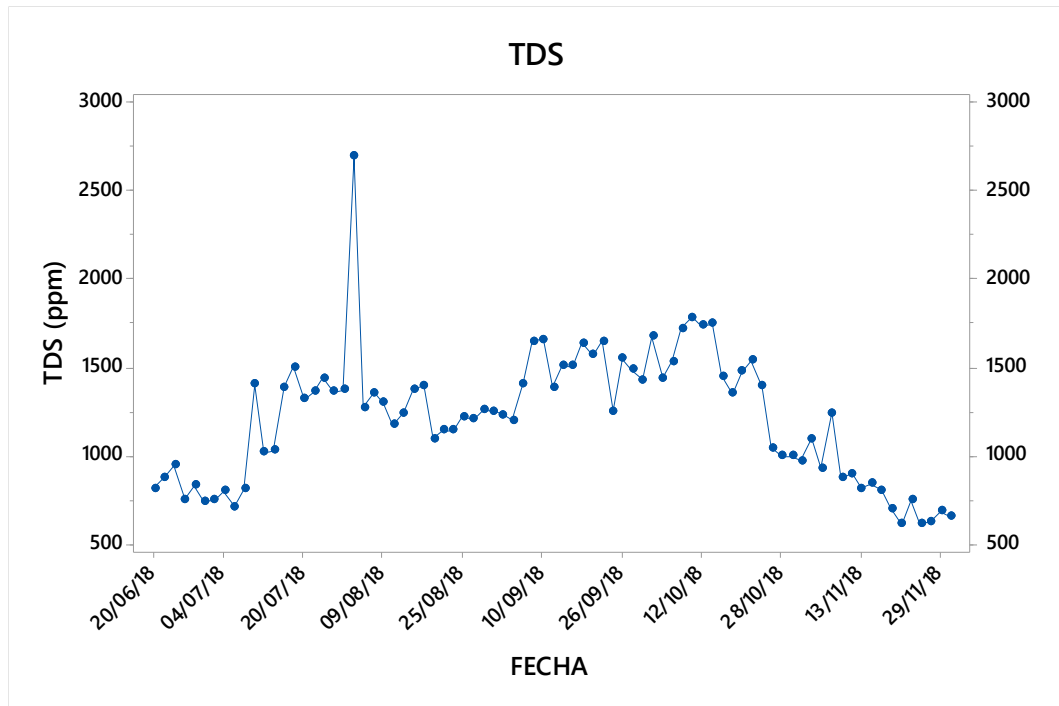


Fuente: Propias de la autora, 2018.

### Interpretación del parámetro conductividad en comparación al DS N°004-2017-MINAM

En el gráfico mostrado observamos que la conductividad en el ECA D1, presenta un valor de 2500 ( $\mu\text{S/cm}$ ) y ECA D2, presenta un valor de 5000 ( $\mu\text{S/cm}$ ), los datos de la conductividad en la investigación tienen un valor mínimo de 897 ( $\mu\text{S/cm}$ ) y máximo de 3740 ( $\mu\text{S/cm}$ ). En los meses junio y julio estuvieron debajo de un valor a 2000 ( $\mu\text{S/cm}$ ), mientras que en los meses de agosto y septiembre estuvieron por encima de 2500 ( $\mu\text{S/cm}$ ); en los meses de octubre y noviembre tuvo un descenso paulatinamente, cumpliendo con el ECA D1 y ECA D2.

Gráfico 8: Análisis de Sólidos Totales Disueltos del lixiviado de salida



Fuente: Propias de la autora, 2018.

### Interpretación

En el gráfico mostrado observamos que los STD tienen un valor mínimo de 610 (ppm) y máximo de 2693 (ppm).

### 4.1.3. RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DEL LIXIVIADO DE SALIDA DEL SISTEMA PILOTO

Tabla 11. Resultado de análisis físico químico del lixiviado de salida

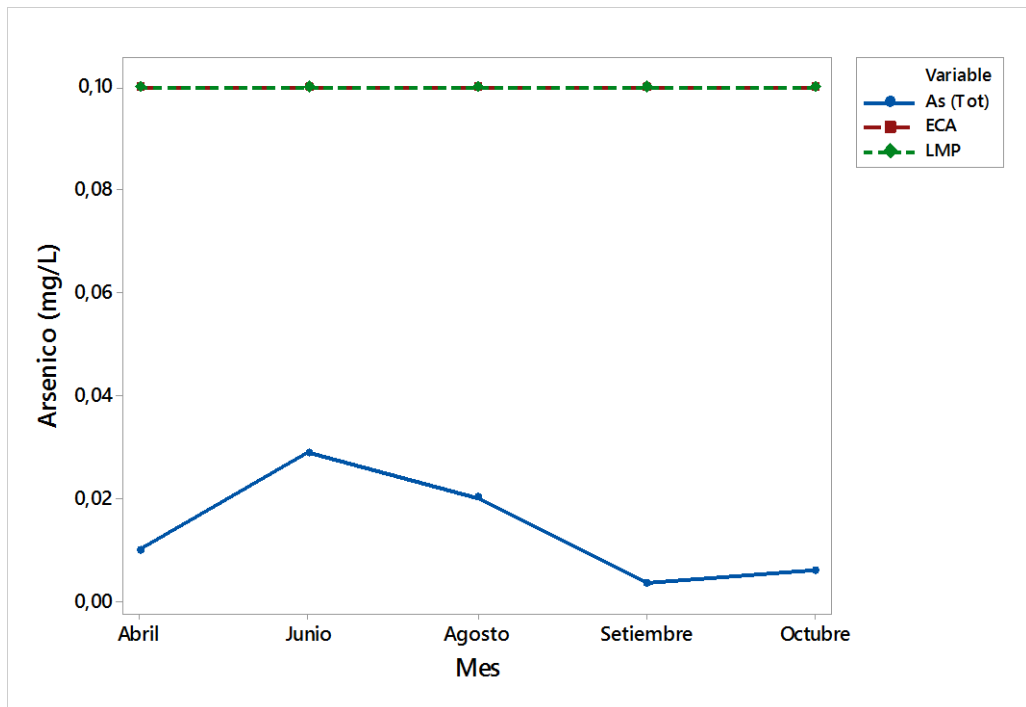
Parámetro	Unidad	LCM	Abril	Junio	Agosto	Setiembre	Octubre
Al (Tot)	mg/L	0.0019	0,3342	1,3530	5,6670	0,9392	1,1745
As (Tot)	mg/L	0.0004	0,0099	0,0289	0,0200	0,0034	0,0059
B (Tot)	mg/L	0.0012	0,0466	0,0189	0,0320		0,0158
Ba (Tot)	mg/L	0.0004	0,0686	0,0635	0,0580		0,0271
Be (Tot)	mg/L	0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006		<0.0006
Cd (Tot)	mg/L	0.0002	0,0184	0,0248	0,0460	0,0244	0,0257
Cloruro	mg/L	0.10	6,50	2,94	14,11		11,1
Co (Tot)	mg/L	0.0002	0,0179	0,0047	0,0120		0,0076
Cr (Tot)	mg/L	0.0005	0,0022	0,0007	0,0010		<0.0005
Cromo VI	mg/L	0.02	<0.010	<0.010	<0.010		<0,02
Cu (Tot)	mg/L	0.0001	0,0725	0,0779	0,2530	0,0364	0,0455
Fe (Dis)	mg/L	1.4	9,0591	220,2529	888,2810	657,2000	
Fe (Tot)	mg/L	0.0031	77,2157	302,5873	987,8390	684,5100	720,77
Fluoruro	mg/L	0.05	0,17	0,12	0,08		0,09
Hg (Tot)	mg/L	0.0001	0,001	0,0049	0,0040	0,0006	<0.0001
Li (Tot)	mg/L	0.0012	0,0060	0,0018	0,0110		0,0097
Mn (Tot)	mg/L	0.0003	42,6933	30,2471	77,5830	46,8000	53,497
Nitrógeno Nitrito	mg/L	0.05	<0.05	<0.015	<0.05		0,07
Ni (Tot)	mg/L	0.0004	<0.0004	0,0010	0,0010		0,0047
Pb (Tot)	mg/L	0.0002	0,0189	0,2232	0,1090	0,0179	0,0215
Se (Tot)	mg/L	0.0002	0,0011	<0.0002	<0.0002		0,0014
STS	mg/L	3.0	128,3	153,0	213,0	100,5	160,5
Sulfato	mg/L	0.10	902,12	1 109.70	2858,73	1815,63	2 170.17



Zn (Tot)	mg/L	0.0002	9,7326	10,8568	23,3520	16,7300	16,274
----------	------	--------	--------	---------	---------	---------	--------

Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### 4.1.3.1. Arsénico Total

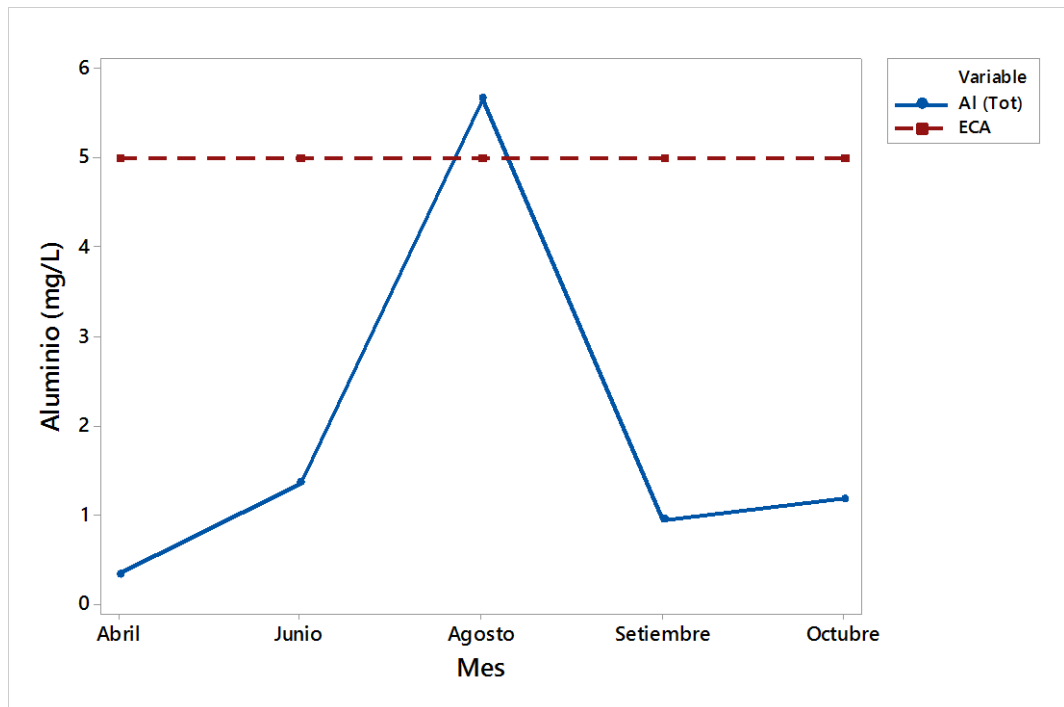


Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### Interpretación:

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 0,10 (mg/L) para el Arsénico; en el mes de abril, tiene una concentración de 0,0099 aun así se encuentra dentro del estándar; sin embargo, de junio se muestra un incremento, desde junio hasta octubre se ve la mejora de la calidad de agua de igual manera cumpliendo en ECA.

#### 4.1.3.2. Aluminio Total

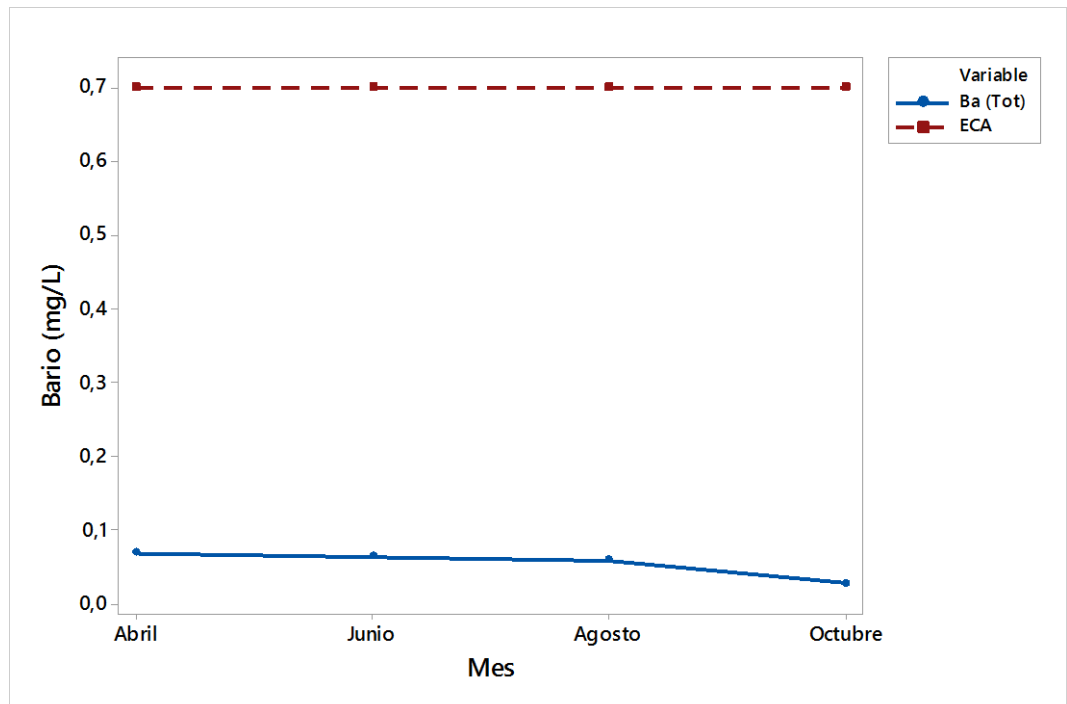


Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 5 (mg/L) para el Aluminio; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 0,33 aun así se encuentra dentro del estándar; sin embargo, en el mes de agosto se muestra un incremento sobrepasando el ECA, de setiembre a octubre observamos que tienen un valor menor a 2 (mg/L) mejorando la calidad de agua y cumpliendo con el ECA.

#### **4.1.3.3. Bario Total**

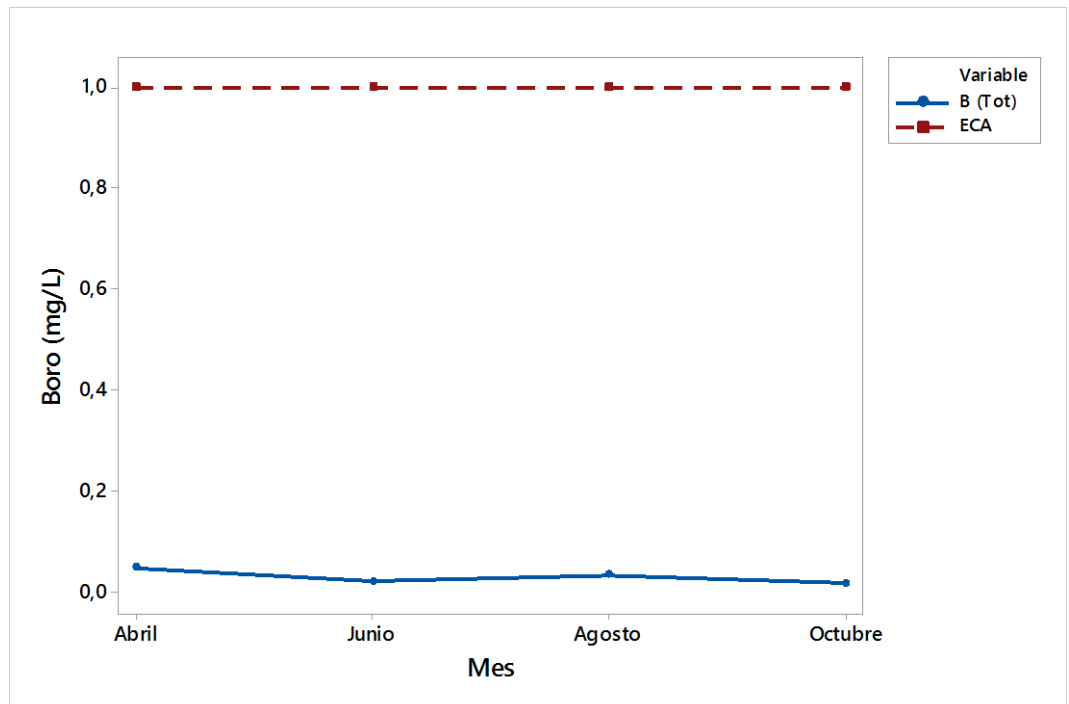


Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 0,7 (mg/L) para el Bario; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 0,06 aun así se encuentra dentro del estándar; sin embargo, en los meses siguientes va mejorando la calidad de agua y cumpliendo con el ECA en todos los meses.

#### **4.1.3.4. Boro Total**

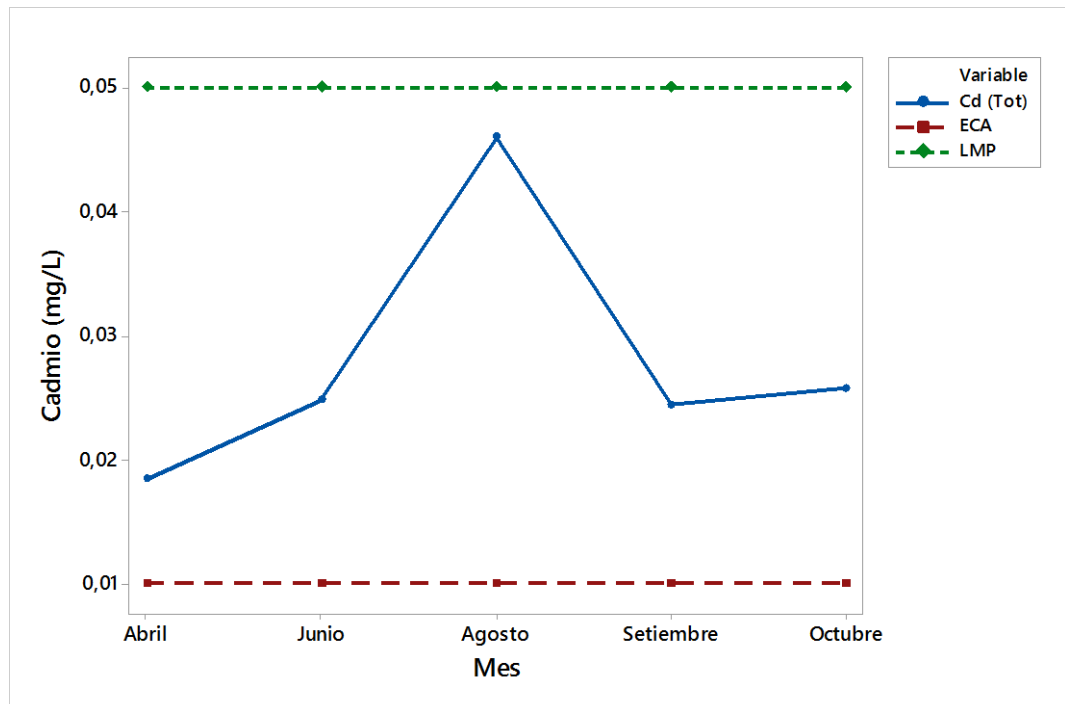


*Fuente: Propias de la autora, 2018.*

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 1,0 (mg/L) para el Boro; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 0,046 aun así se encuentra dentro del estándar; sin embargo, en los meses siguientes va mejorando la calidad de agua llegando en el mes de octubre en 0,015, cumpliendo con el ECA en todos los meses.

#### **4.1.3.5. Cadmio Total**

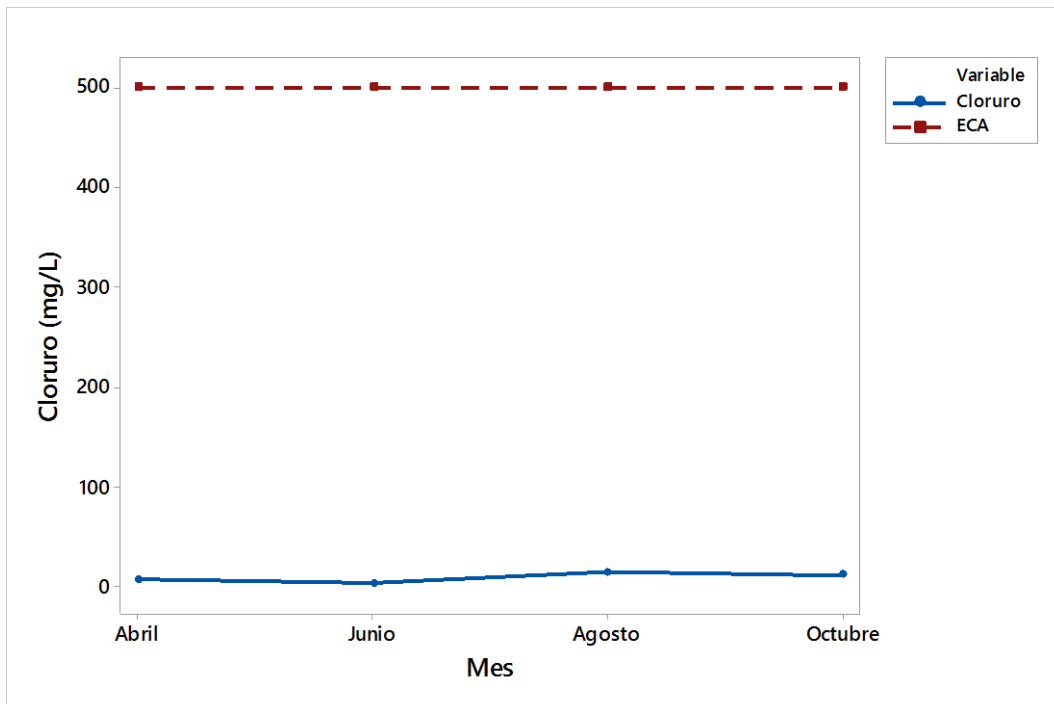


Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 0,01 (mg/L) y el LMP un valor de 0,05 (mg/L) para Cadmio; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 0,018, en agosto tuvo un máximo valor de 0,046 y en los meses restantes existe una mejora de calidad cumpliendo con los LMP, pero en el ECA los valores de todos los meses sobrepasan.

#### **4.1.3.6. Cloruro Total**

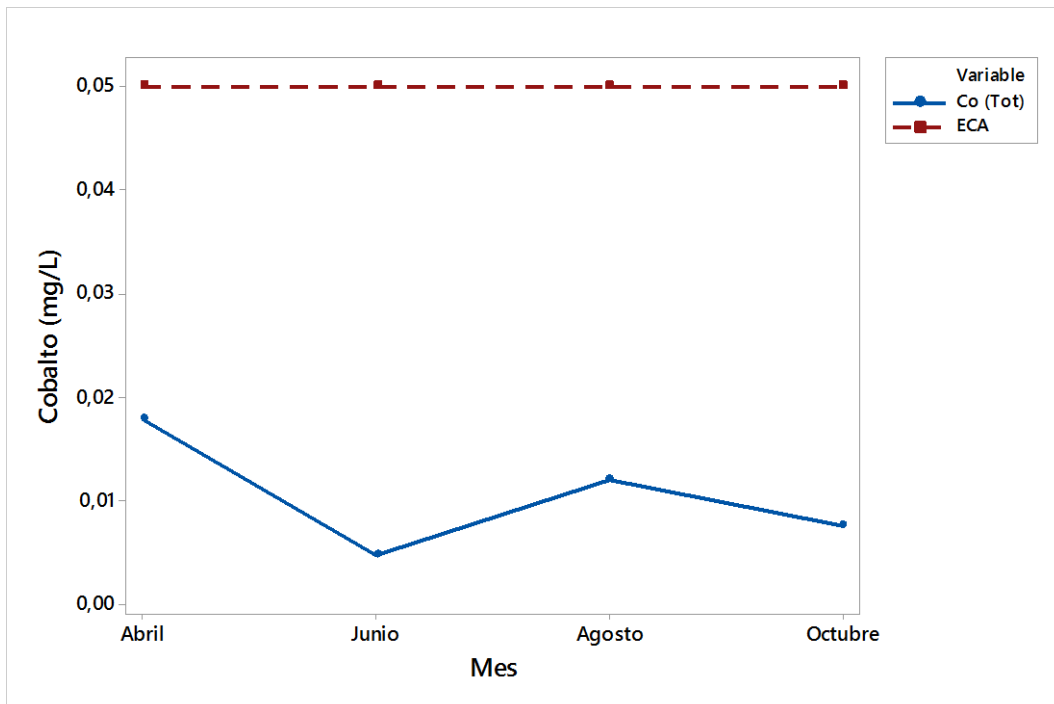


Fuente: Propias de la autora, 2018.

**Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 500 (mg/L) para Cloruro; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 6,50 en agosto tuvo un máximo valor de 14,11 y en los meses restantes existe una mejora de calidad cumpliendo en todos los meses el ECA.

**4.1.3.7. Cobalto Total**

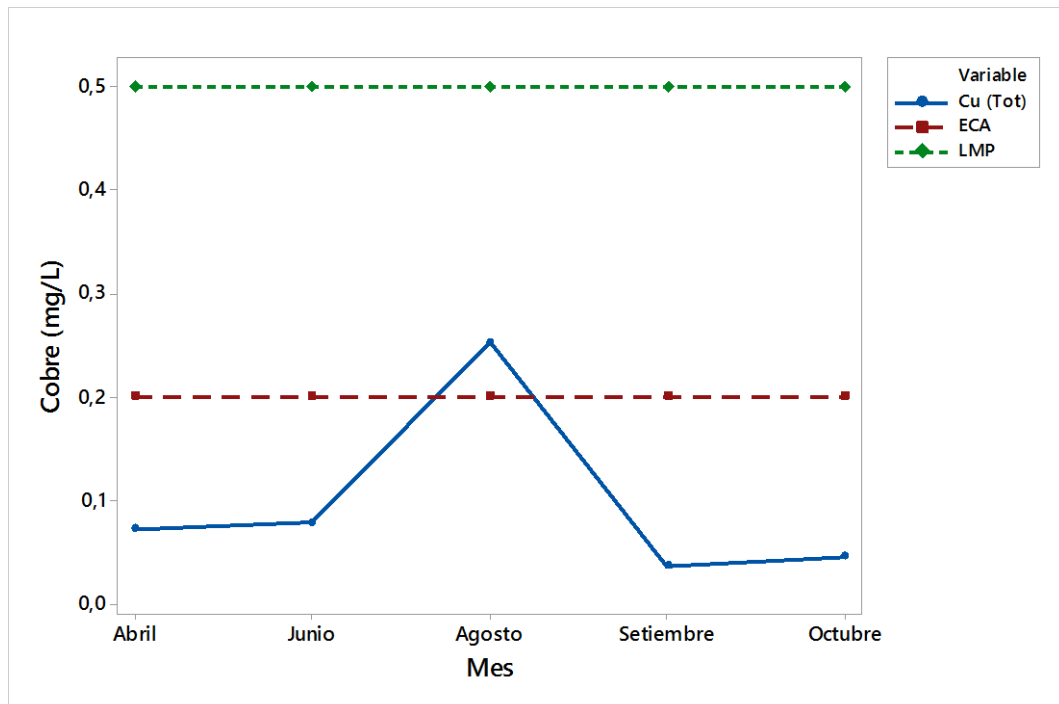


Fuente: Propias de la autora, 2018.

**Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 0,05 (mg/L) para Cobalto; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 0,017, aun este valor está dentro del estándar, sin embargo, en los meses siguiente hubo una mejora de calidad cumpliendo con el ECA.

**4.1.3.8. Cobre Total**



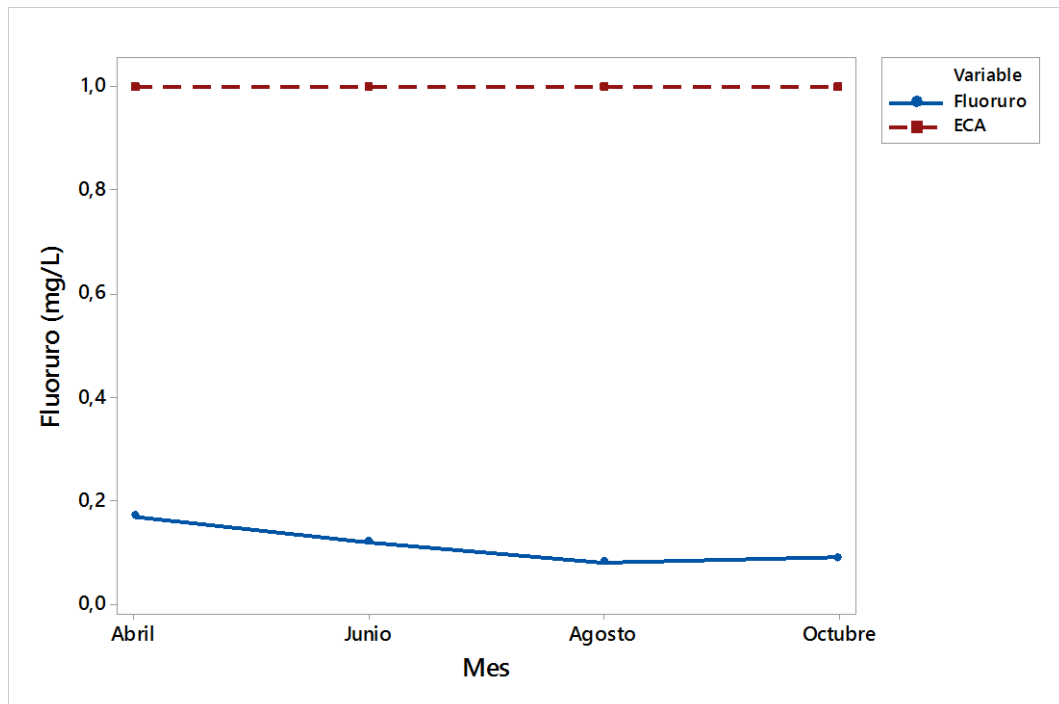
Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 0,2 (mg/L) y el LMP un valor de 0,5 (mg/L) para Cobre; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 0,072, en agosto tuvo un máximo valor de 0,25 y en los meses restantes existe una mejora de calidad cumpliendo con los ECA y LMP.

#### **4.1.3.9. Anión Fluoruro**



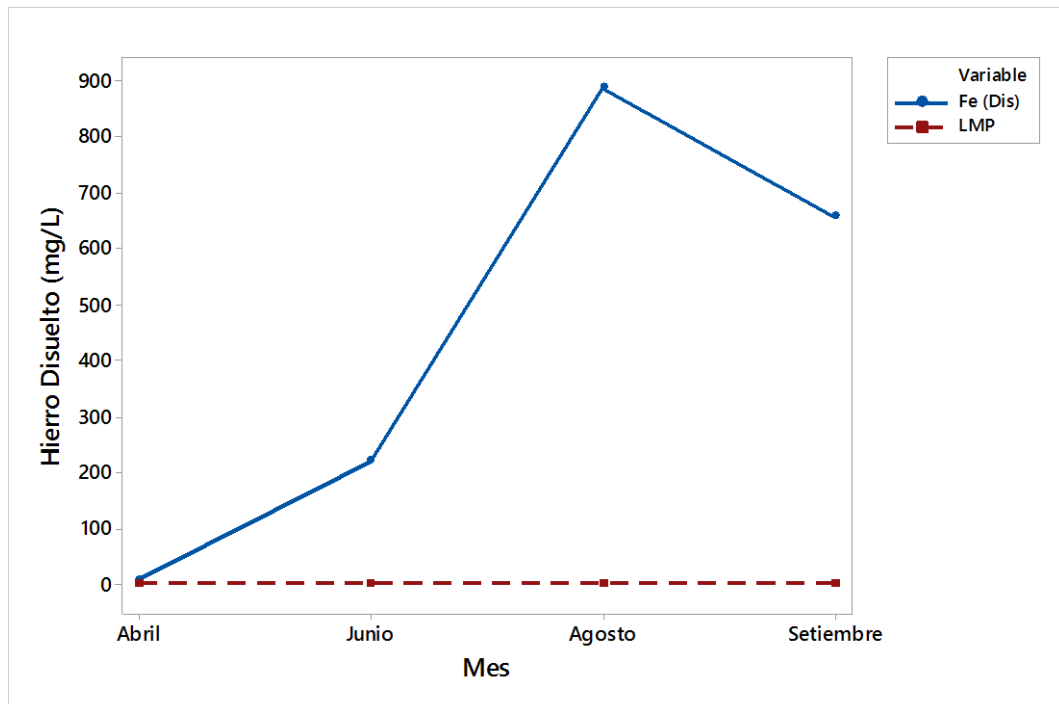


Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 1,0 (mg/L) para Fluoruro; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 0,17, aun este valor está dentro del estándar, sin embargo, en los meses siguiente hubo una mejora de calidad cumpliendo con el ECA.

#### **4.1.3.10. Hierro Disuelto**

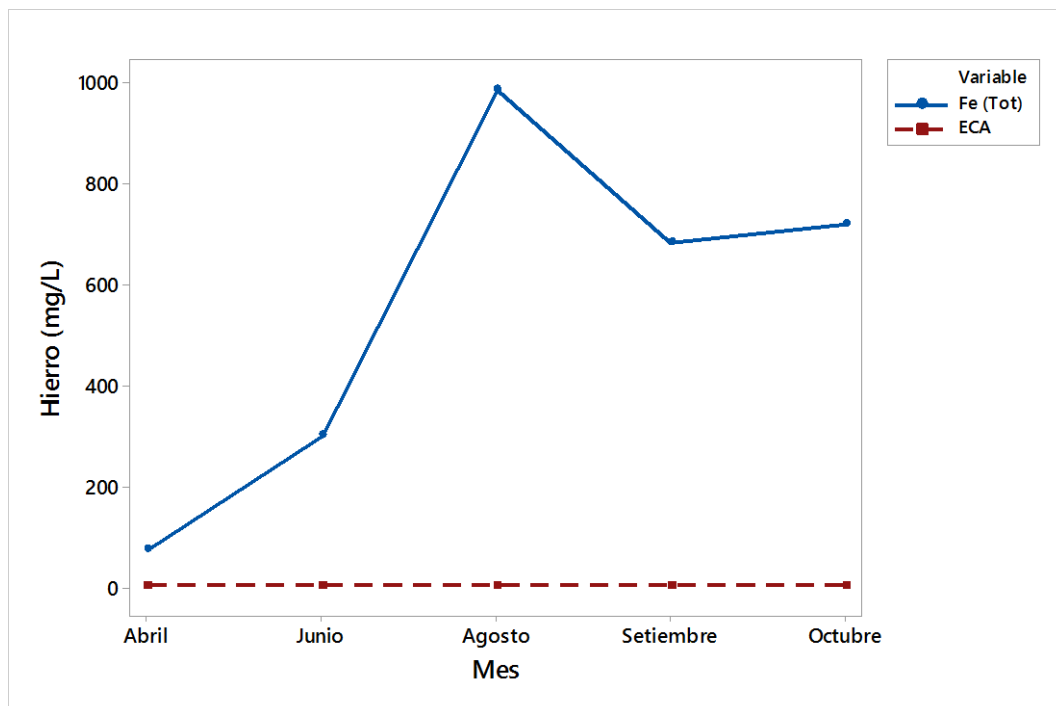


Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el LMP, presenta un valor de 2,0 (mg/L) para Hierro disuelto; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 9,05 y en los meses siguientes la concentración aumenta hasta el mes de agosto tomando un valor máximo y en el mes de septiembre la concentración disminuye, sin embargo, en los meses siguiente hubo una mejora de calidad, pero no cumple con el LMP establecido.

#### **4.1.3.11. Hierro Total**

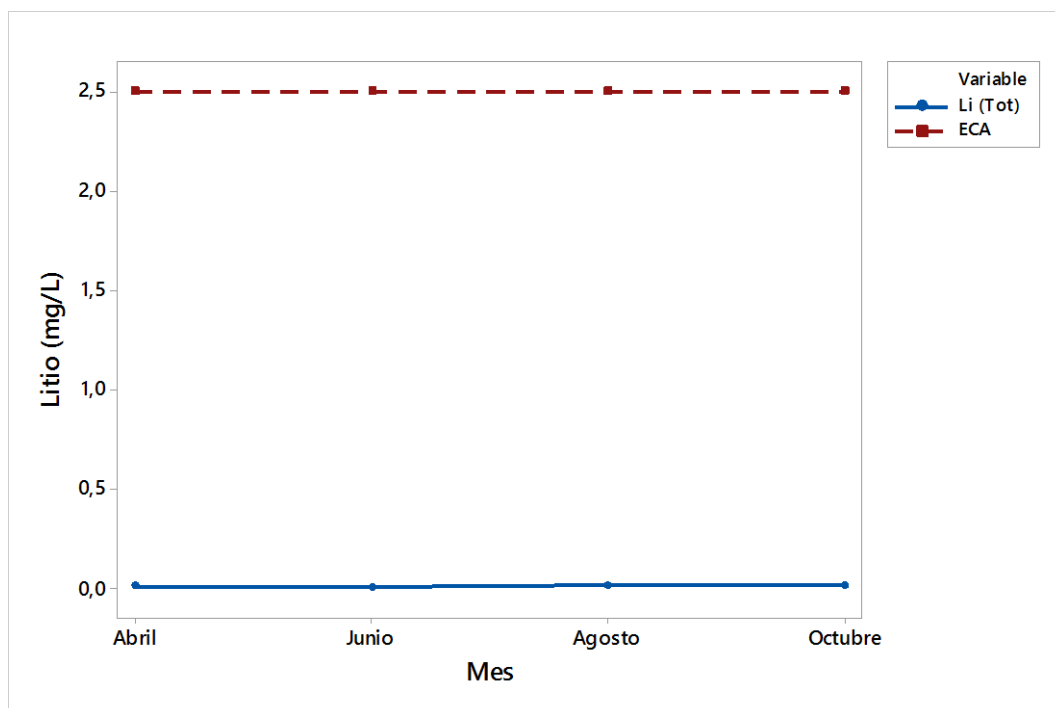


Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 5,0 (mg/L) para Hierro; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 77,21 y en los meses siguientes la concentración aumenta hasta el mes de agosto tomando un valor máximo y en los meses restante la concentración disminuye mejorando la calidad, sin embargo, no cumple con el ECA.

#### **4.1.3.12. Litio Total**

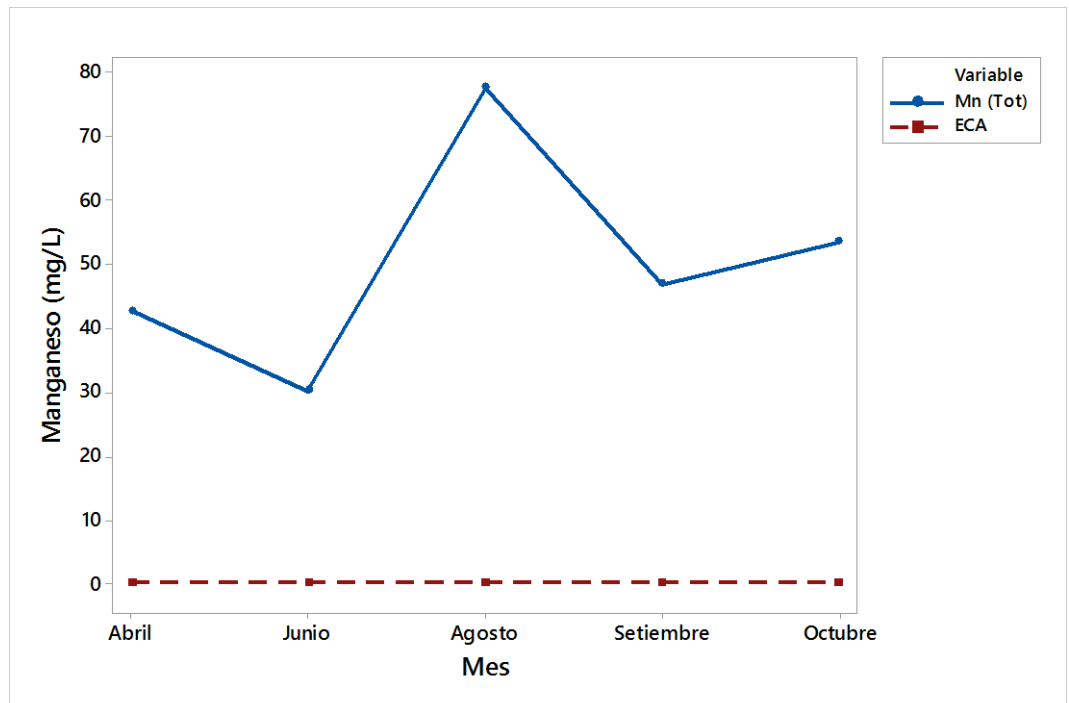


Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 2,5 (mg/L) para Litio; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 0,006 y en los meses siguientes la concentración se mantiene estable, en todos los meses de investigación cumple con el ECA establecido.

#### **4.1.3.13. Manganeso Total**

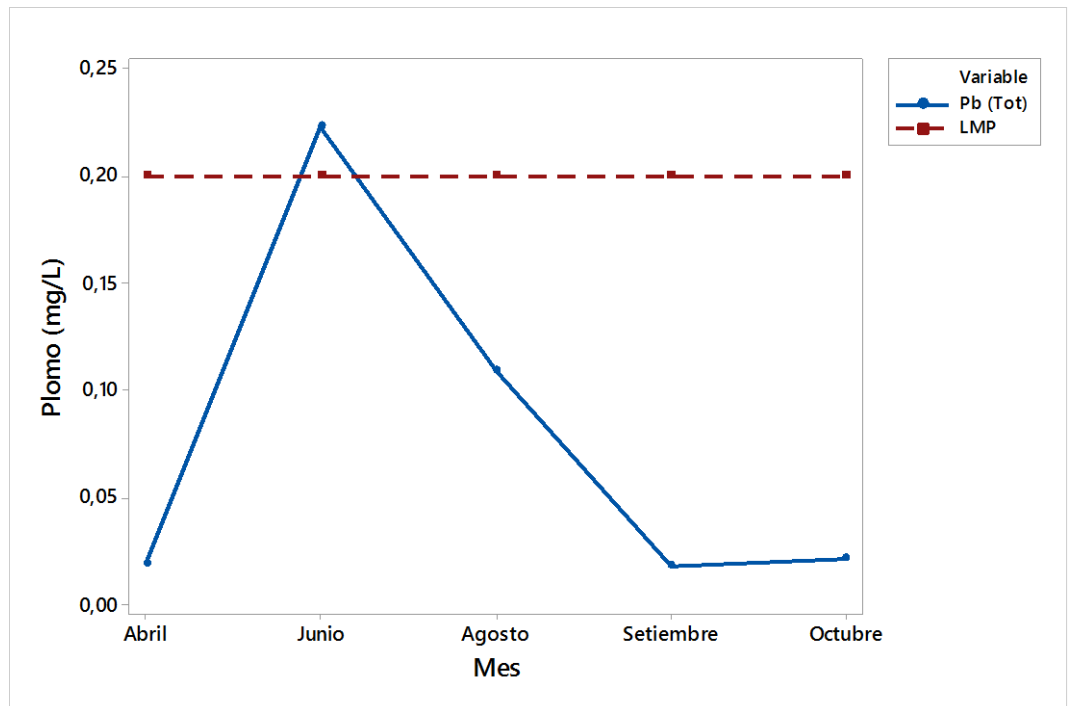


Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 0,2 (mg/L) para Manganese; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 42,69 y en los meses siguientes la concentración aumenta hasta el mes de agosto tomando un valor máximo y en los meses restante la concentración disminuye mejorando la calidad, sin embargo, no cumple con el ECA.

#### **4.1.3.14. Plomo Total**

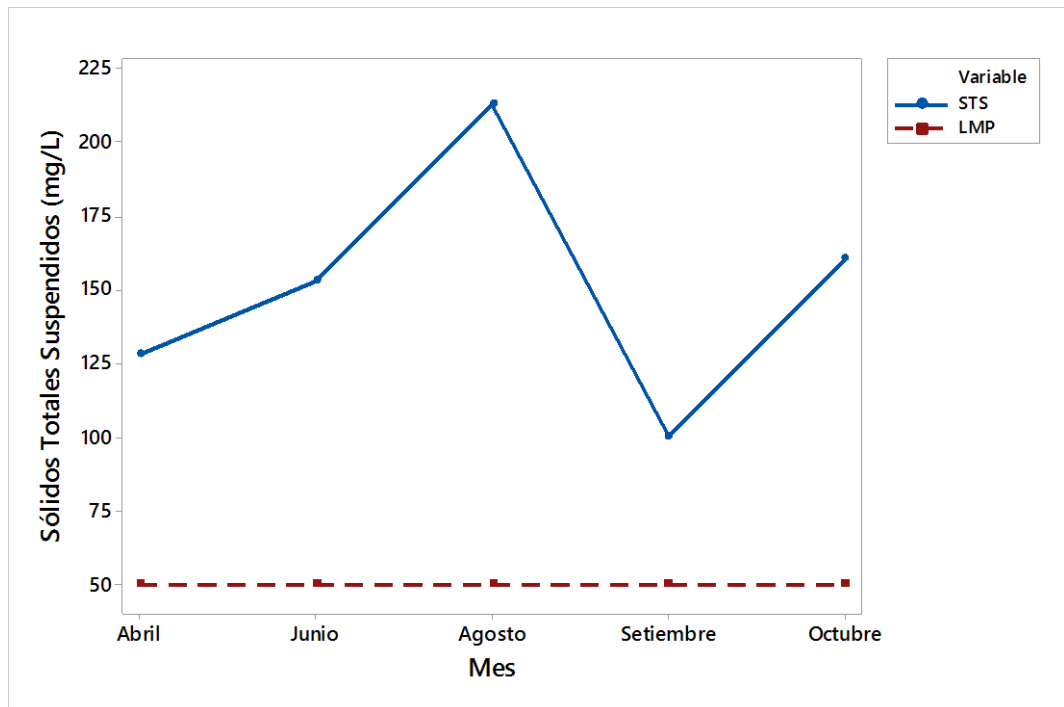


Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### **Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el LMP, presenta un valor de 0,2 (mg/L) para Plomo; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 0,018 y en el siguiente mes de junio la concentración tomando un valor máximo y sobrepasando el LMP; sin embargo, en los meses restante la concentración disminuye mejorando la calidad llegando a cumplir con el ECA.

#### **4.1.3.15. Sólidos Totales Suspendidos**

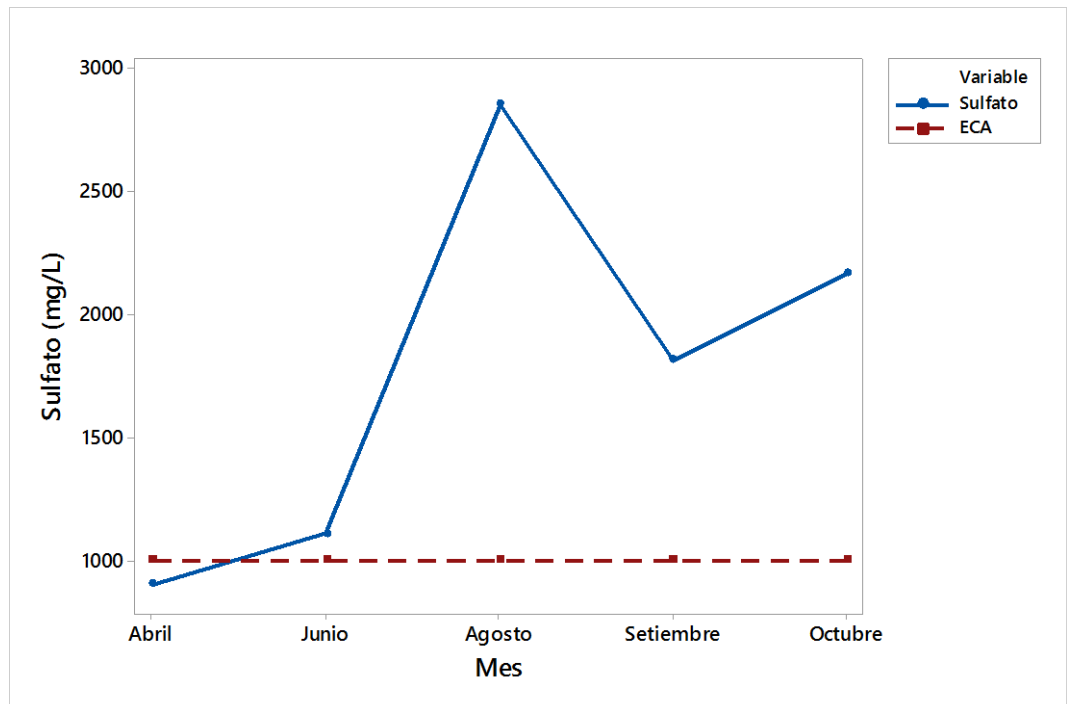


Fuente: Propias de la autora, 2018.

**Interpretación:**

En el gráfico mostrado se observa que el LMP, presenta un valor de 50 (mg/L) para STS; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 128,3 y en los meses siguientes la concentración aumenta hasta el mes de agosto tomando un valor máximo y en los meses restante la concentración disminuye mejorando la calidad, sin embargo, no cumple con el ECA.

**4.1.3.16. Anión Sulfato**



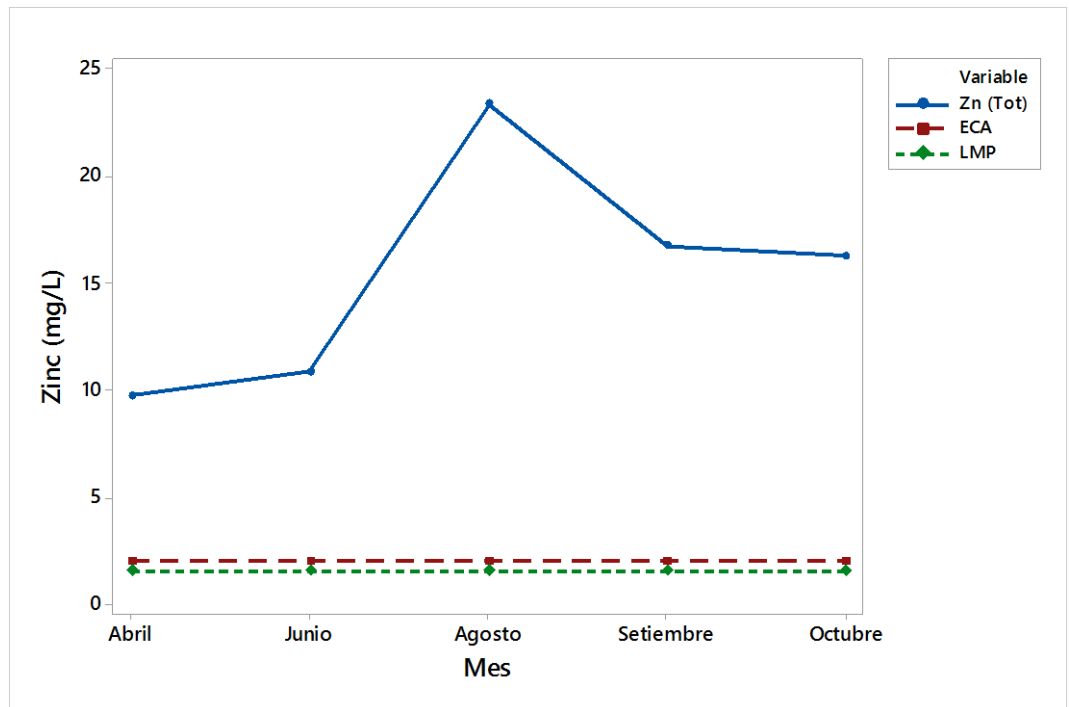
Fuente: Propias de la autora, 2018.

### Interpretación:

En el gráfico mostrado se observa que el ECA presenta un valor de 1000 (mg/L) para Sulfato; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 902,12 y en los meses siguientes la concentración aumenta hasta el mes de agosto tomando un valor máximo y en los meses restante la concentración disminuye mejorando la calidad, sin embargo, no cumple con el ECA.

### 4.1.3.17. Zinc Total





Fuente: Propias de la autora, 2018.

#### Interpretación:

En el gráfico mostrado se observa que el ECA, presenta un valor de 2,0 (mg/L) y el LMP un valor de 1,5 (mg/L) para Zinc; en el mes de adaptación abril, tiene una concentración de 9,73, en agosto tuvo un máximo valor de 23,35 y en los meses restantes existe una mejora de calidad sin embargo no cumple con el ECA y LMP establecido.

## 4.2. PRUEBA DE HIPOTESÍS

En la formulación de la hipótesis fue determinada de la siguiente expresión:

La estabilización geoquímica de relaves sulfurados mejorará mediante el uso de coberturas biológicas no saturadas combinándolas con el riego de efluentes domésticos de la ciudad de Cerro de Pasco.

Analizando nuestras hipótesis determinamos que la estabilización química de relaves sulfurados utilizando riego de efluentes domésticos y cobertura biológica, en la calidad del lixiviado no se genera acidez y para el ECA y LMP mejora la calidad con el paso del tiempo; por ende, la hipótesis formulada es válida.

### 4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Concluida la investigación denominado “EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD GEOQUÍMICA DE RELAVES SULFURADOS DE QUIULACOCHA MEDIANTE EL USO DE COBERTURA BIOLÓGICA EN MEDIOS NO SATURADOS CON RIEGO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS A ESCALA PILOTO EN LA EMPRESA ACTIVOS MINEROS SAC-2018”, los resultados muestran lo siguiente:

Para la presente investigación finalizada se evaluó los parámetros de campo tanto de ingreso y salida del sistema piloto, desde el 26 de junio hasta el 30 de noviembre. Además, desde el mes de adaptación de especies en abril se realizó un monitoreo físico-químico mensualmente comparando los resultados con el DS N° 010-2010-MINAM y DS N° 04-2017-MINAM.

Los resultados obtenidos en el análisis estadístico para los parámetros de campo, el pH de salida cumple con los LMP y ECA eventualmente, teniendo valores constantes ligeramente ácidos a neutro de 5 a 7, esto se debe a la inhibición microbiana que tienen los efluentes domésticos y la cobertura biológica, reduciendo el sulfuro de manera que ayuda a insolubilizar, precipitar los metales pesados y a la no generación de lixiviados ácidos; la temperatura tiene variaciones alta, esto se debe a que los lixiviados del sistema piloto fueron recolectados en un galón a la altura del barril, expuesta a condiciones de ambiente; la conductividad disminuye a lo largo del tiempo de investigación, logrando cumplir con el ECA esto se

debe que con el riego de efluentes domésticos y la cobertura biológica logra crearse con el tiempo una cadena biológica microorganismos sulfato reductoras que atrapan los metales disueltos volviéndolas insolubles para su fácil precipitación disminuyendo la conductividad y los STD.

Con el riego de efluentes domésticos al sistema piloto se pudo observar que la cobertura biológica presenta un crecimiento y adaptación de las especies vegetales trasplantadas, esto se debe al alto porcentaje de fuentes de nutrientes que tienen los efluentes tanto minerales, nitratos, nitritos, carbono, etc.

Los resultados de los parámetros físicos-químicos en el laboratorio tienen una tendencia a disminuir en el último mes de monitoreo, mientras que en el mes de agosto aumenta su concentración esto se debe a que en el mes de agosto.

## CONCLUSIONES

- Según estudios geoquímicos realizados por el consorcio WSP, la relavera Quiulacocha zona no saturada es potencial generador de acidez a un pH <4,5.
- La biotecnología en uso de efluentes domésticos y cobertura biológica, es un mecanismo nuevo no estudiado a profundidad, con esta tecnología sería posible el ahorro de costo en el cierre de una relavera y darle un valor agregado ecológico, según esta investigación queda comprobado la estabilización química al no generar aguas ácidas, puesto que estas se encuentran en un constante valor de 5 a 7; aún se debería seguir con la investigación ya que con el tiempo posiblemente podría llegar a un pH tendiendo al neutro.
- La conductividad en el sistema piloto en los últimos meses llega a estabilizarse con ligereza, cumpliendo el ECA establecido, los metales presentes en el lixiviado presentan una rápida precipitación, esto se debe a la acción de bacterias sulfato reductoras presentes en los efluentes domésticos.
- La adaptación y crecimiento mensual de especies biológicas plantadas el barril es positivo y potencial visualmente.
- El monitoreo físico-químico del lixiviado del barril nos muestran que cumplen con los LMP y ECA los siguientes análisis: Arsénico, Aluminio Bario, Boro, Cadmio, Cloruro,

Cobalto, Cobre, Anión Fluoruro, Litio y Plomo; sin embargo, el Hierro disuelto, Hierro, Manganeso, Solitos Totales en Suspensión, Sulfato y Zinc sobrepasan los LMP y el ECA, aun así, en los últimos meses de monitoreo han disminuido la concentración en el lixiviado.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los investigadores implementar sistemas piloto de comparación, es decir sin la utilización de efluentes domésticos.
- Para el almacenamiento del lixiviado del sistema sugiero que esté protegido para evitar que la temperatura aumente y se pueda producir reacciones químicas, variando así los resultados verdaderos.
- Se recomienda usar los efluentes domésticos al 100% en épocas de lluvia, la escorrentía trae gran cantidad de agua más efluente, no podría ser necesario la mezcla 50% con agua natural.
- Se recomienda cubrir el sistema piloto ya que la precipitación puede influir en las reacciones químicas de las bacterias sulfato reductoras ya que en la mezcla se está simulando 50% de precipitación.
- Se recomienda realizar la investigación con otro tipo de sustrato orgánico para comparación de la eficiencia del sistema.
- Se recomienda el pretratamiento de efluentes domésticos para evitar que algunos microorganismos patógenos puedan ocasionar algún daño a las especies vegetales.

## BIBLIOGRAFÍA

- **Aduvire, O. 2006.** Drenaje Ácido de Mina Generación y Tratamiento. Madrid, España, s.e.
- **Almenara, A., G. Tremblay y M. Rankin, 2007.** Revisión y desarrollo de un procedimiento de priorización para el manejo de pasivos ambientales mineros en el Perú. Definición de una metodología. Proyecto PERCAN. Lima: Consorcio Roche, Golder y ACCC.
- **Arístides S, 2015.** Remediación de pasivos ambientales mineros como estrategia para el cuidado del ambiente, Universidad de Lima.
- **Carrasco, 2010.** Investigación En Cierre De Minas En Buenaventura – Unidad Minera La Zanja.
- **Chaparro, TL. 2015.** Drenajes Ácidos de mina. Formación y manejo. Revista ESAICA, 53-57.
- **Consortio WSP, 2018.** Caracterización Geoquímica del Depósito de Relaves de Quiulacocha. Perú-Lima.



- **Consortio WSP, 2018.** Estudio Biológico del Depósito de Relaves de Quiulacocha. Perú-Lima.
- **Diana, F., Nidia F., Yaneth V, 2017.** Artículo de investigación. Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica.
- **Dold et al., 2008.** Water management for acid mine drainage control at the polymetallic Zn–Pb– (Ag–Bi–Cu) deposit Cerro de Pasco, Peru.
- **Erin J. Clyde, Pascale C, Heather E. Jamieson, Caitlin G, John S., 2016.** Diario de producción más limpia. El uso de un sistema de tratamiento pasivo para la mitigación del drenaje ácido en la mina Williams Brothers Mine (California): estudio a escala piloto <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.145>.
- **Gusek, J.J. and T.R. Wildeman, 1988.** “A New Millennium of Passive Treatment of Acid Rock Drainage. Presented at the 2002 National. Advances in Design and Construction Since

- **Gutierrez R. Álvaro Victor, Terrazas S. Luis E, Álvarez A. María T., 2007.** Aislamiento y cultivo de bacterias sulfato reductoras acidófilas para la producción de sulfuro biogénico para la precipitación de metales pesados. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz -Bolivia.
- **Jorge A. Orellana Versión, 2005.** Características de los líquidos residuales, Ingeniería Sanitaria. Argentina. Pag (1-2).
- **Lens, P.N.L., and Kuenen, J.G. 2001.** The biological sulfur cycle: novel opportunities for environmental biotechnology. WaterSciTechnol, p. 57-66.
- **Medina, JF; Peralta, MO. 2015.** “Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria”. Tesis ing. Cuenca, Ecuador, UPS.
- **Medina, F. 2008.** Inventario de pasivos ambientales mineros. Manual, proyecto PERCAN. Lima: Consorcio Roche, Golder, ACCC.
- **Ministerio de Energía y Minas. 2012.** Plan de manejo de pasivos ambientales. Lima: Dirección General de Minería.

- **Ministerio del Medio Ambiente, 2015.** *Definición de herramientas de gestión de Pasivos Ambientales.* Colombia. Obtenido de: [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Pasivos\\_Ambientales/herramientas\\_pasivos\\_ambientales.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Pasivos_Ambientales/herramientas_pasivos_ambientales.pdf)
- **Nagpal S., Chuichulcherm S., Peeva L., Livingston A. 2000.** Microbial Sulphate Reduction in a Liquid-Solid Fluidised Bed Reactor. *Biotechnology and Bioengineering* 70: 370-380.
- **Nina, M. 2008.** Evaluación de los métodos químicos y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio: Tesis para optar el grado académico de Magíster en Ciencias Ambientales. Tesis Mg.Lima. Perú, UNMSM.
- **Pérez, N., Schwarz, A., & Urrutia, H. (enero-febrero, 2017).** Tratamiento del drenaje ácido de minas: estudio de reducción de sulfato en mezclas orgánicas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Pag. 53-64.
- **Postgate, JR, The Sulfate** - Reducing Bacteria (2da edición), 1982.University Press, Cambridge

- Pulles, W., Coetser, L., Heath, R., and R. Muhlbauer. "Development of high-rate passive sulphate reduction technology for mines waters. In: Proceedings of IMWA Conference, (University of Newcastle 2004 September 19-23), UK, 2004, p. 253-265.
- **Raúl Zornoza, 2011.** Fitoestabilización Asistida. España, Cartagena-La Unión (El Lirio y El Gorguel), Mina Santa Antonieta.
- **Whiteley y Lee, 2006.** A comparison of carbon/energy and complex nitrogen sources for bacterial sulphate-reduction: potential applications to bioprecipitation of toxic metals as sulphides. Journal of Industrial Microbiology. 17:116-123.

### **Sitio Web**

- **MINSA (Ministerio de Salud del Perú). 2017. MINSA:** Contaminación con Metales Pesados (en línea, sitio web). Consultado el 18 feb. 2017. Disponible en:  
[https://www.minsa.gob.pe/portalweb/06prevencion/prevencion\\_2.asp?su b5=3](https://www.minsa.gob.pe/portalweb/06prevencion/prevencion_2.asp?su b5=3).

- **Guía de Muestreo para Suelos Contaminados 2014 MINAM.**

Disponible en: [http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO\\_MINAM1.pdf](http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf)

## **ANEXOS**



Sistema piloto de prueba de barril que contiene relave, cobertura biológica y sistema de drenaje de lixiviados.



Detalle del canal del efluente doméstico para el recojo, al costado la medición instantánea de parámetros de campo.



Detalle del recojo de efluente domésticos del margen izquierdo de la relavera Quiulacocha.



Detalle del llenado de efluentes domésticos a la galonera aproximadamente interdiario se recogía 15 litros.





Realización de la mezcla de efluentes domésticos, de cada galón 5 litros y 10 litros agua natural. La mezcla se realiza en un balde de 2º litros de capacidad.



Detalle del riego interdiario de 20 litros en el barril de prueba a través de una regadera aspersor de capacidad de 8 litros.



Detalle de la mezcla del lixiviado del barril a un balde recolector para la toma de muestra y medición de parámetros de campo.



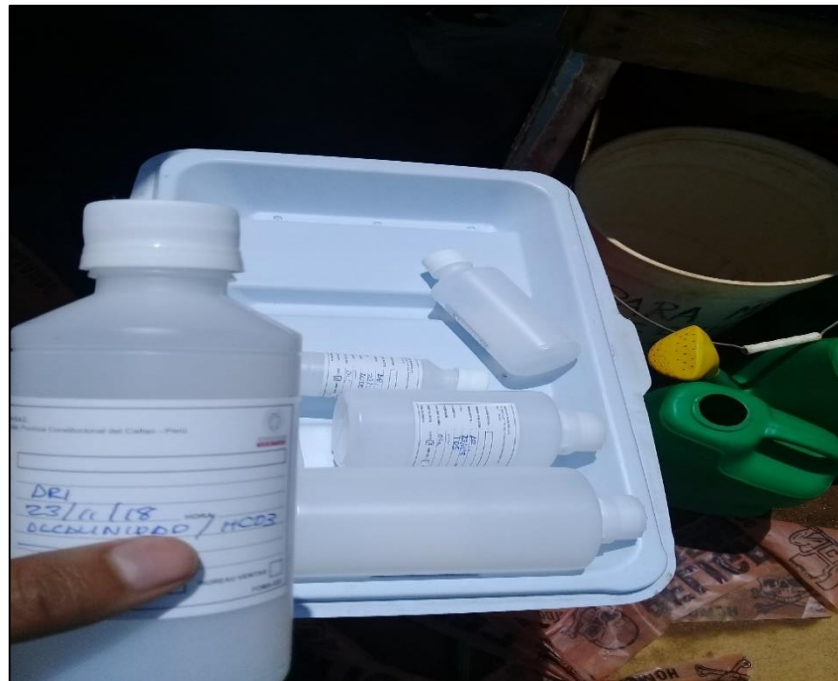
Detalle del color del lixiviado del barril y película grasosa bacteriana, producto del riego con efluentes domésticos y la reacción química de sulfato reducción.



Detalle de calibración del multiparámetro utilizando buffers antes de la medición de parámetros de campo.



Medición de parámetros de campo del lixiviado del barril de prueba, utilizando multiparámetro.



Etiquetado de los frascos de monitoreo mensual, según corresponde el parámetro a enviar.



Toma de muestra del lixiviado del barril para el envío a un laboratorio de ensayo.



Verificación del crecimiento de las especies vegetales del barril de prueba.



FICHA DE SEGUIMIENTO DE CONDICIONES DE CAMPO - PARÁMETROS FÍSICOS

PARÁMETROS	Barril 1	Barril 2	Barril 3	Barril 4	Barril 5	Barril 6
<b>Parámetros de riego (entrada a barril) / Fecha</b>						
Fecha:						
Hora:						
Volumen de riego (L)						
pH						
Conductividad (uS/cm)						
TDS (mg/L)						
O.D. (mg/L)						
Temperatura (°C)						
Observaciones adicionales (color, turbidez)						
<b>Parámetros de lixiviado (salida de barril) / Fecha</b>						
Fecha:						
Hora:						
Volumen de lixiviado (L)						
Volumen de perdida (L)						
pH						
Conductividad (uS/cm)						
TDS (mg/L)						
O.D. (mg/L)						
Temperatura (°C)						
Observaciones adicionales (especies vegetales y otros)						
<b>Parámetros de lámina de agua / Fecha</b>						
Fecha:						
Hora:						
Volumen de lixiviado (L)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica		
pH	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica		
Conductividad (uS/cm)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica		
TDS (mg/L)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica		
O.D. (mg/L)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica		
Temperatura (°C)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica		
Observaciones adicionales (especies vegetales y otros)						
<b>Parámetros Efluentes/Fuente de riego</b>	<b>Efluente -1</b>	<b>Efluente-2</b>	<b>Mezcla de efluentes</b>	<b>Agua natural</b>	<b>Mezcla de B1 +B2 (Lixiviados)</b>	
pH						
Conductividad (uS/cm)						
TDS (mg/L)						
O.D. (mg/L)						
Temperatura (°C)						

Formato de ficha de campo donde se registran el volumen de entrada y de salida, observaciones y los parámetros medidos en campo.