

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**CARACTERIZACIÓN Y TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE
AGUAS ÁCIDAS EN LA MINA LA RINCONADA - PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. WILFREDO MAMANI CHIPANA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO - PERÚ

2018



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

**CARACTERIZACIÓN Y TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE AGUAS ÁCIDAS
EN LA MINA LA RINCONADA - PUNO**

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. WILFREDO MAMANI CHIPANA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 08 DE MARZO DE 2019

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE :
M.Sc. Esteban Marín Paucara

PRIMER MIEMBRO :
Ing. Oswal Alfredo Velásquez Viza

SEGUNDO MIEMBRO :
M.Sc. Fidel Huisa Mamani

DIRECTOR / ASESOR :
Mg. Mario Serafin Cuentas Alvarado

ÁREA : Ingeniería de Minas.

TEMA : Monitoreo y evaluación del impacto ambiental en minería.

DEDICATORIA

Dedico con todo mi amor y cariño a mi amada esposa Yesica Pilar por creer en mí y estar a mi lado hasta en los momentos más difíciles brindándome su apoyo, cariño y amor incondicional en todos los ámbitos de la vida.

A mi madre Edraulina, por darme la vida, amarme, confiar en mí y que desde el cielo me guía por este camino difícil y arduo de la vida.

A mi hermano Franklin por su cariño y apoyo incondicional y que desde el cielo me cuida y guía.

A mis hermanas (os) Maribel, Marisol y Percy por su cariño y apoyo incondicional en todo momento de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por darme la oportunidad de vivir, por los valores y fuerzas para superar todas las dificultades de la vida y en mí formación profesional.

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional del Altiplano, por haberme acogido y contribuido en mi formación profesional.

A la Facultad de Ingeniería de Minas, especialmente a los docentes que contribuyeron las enseñanzas y experiencias en cada etapa de mi formación profesional.

A mi asesor/director, quien encamino en el desarrollo del presente trabajo de investigación, aportando con su conocimiento y experiencia profesional.

A los señores miembros del jurado evaluador cuyos argumentos, críticas y profesionalismo fueron aporte en este trabajo de investigación, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos que ayudaron a formarme como persona e investigador.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema	15
1.2. Formulación del problema.....	16
1.2.1. Pregunta general	16
1.2.2. Preguntas específicas	16
1.3. Justificación del problema	17
1.4. Objetivos de la investigación.....	18
1.4.1. Objetivo general	18
1.4.2. Objetivos específicos	18

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación.....	19
2.1.1. Antecedentes históricos	19
2.1.2. Antecedentes técnicos.....	20
2.2. Fundamento teórico	24
2.2.1. Drenaje ácido de minas (DAM).....	24
2.2.2. Reacciones físicas, químicas y biológicas con la generación ácida	26
2.2.3. Formación del drenaje ácido de minas	28
2.2.4. Etapas de formación del DAM	29
2.2.5. Factores que intervienen en la formación de aguas ácidas	31

2.2.6.	Características físicas, químicas y biológicas del DAM	32
2.2.7.	Caracterización del drenaje ácido de aguas de mina	34
2.2.8.	Control de los drenajes ácidos	35
2.2.9.	Tratamientos del drenaje ácido de minas	37
2.3.	Bases Conceptuales	41
2.4.	Hipótesis	42
2.4.1.	Hipótesis general	42
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	42
2.5.	Operacionalización de variables	43
2.5.1.	Variable independiente (Vi)	43
2.5.2.	Variable dependiente (Vd).....	43
2.5.3.	Variable interviniente (Vint)	43

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Tipo y diseño de investigación	44
3.1.1.	Tipo de investigación.....	44
3.1.2.	Diseño de investigación.....	44
3.2.	Población y muestra de investigación	45
3.2.1.	Población	45
3.2.2.	Muestra	46
3.3.	Ubicación y delimitación del área de estudio	46
3.3.1.	Ubicación política.....	46
3.3.2.	Ubicación geográfica.....	46
3.3.3.	Accesibilidad	47
3.3.4.	Precipitación fluvial.....	47

3.4.	Materiales, equipos y reactivos experimentales	48
3.4.1.	Materiales	48
3.4.2.	Equipos	49
3.4.3.	Reactivos	50
3.5.	Técnicas de recolección de datos.....	51
3.6.	Procedimientos de experimento.....	52
3.7.	Descripción experimental del plan de tratamiento de aguas ácidas	54

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Caracterización de los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada	57
4.1.1.	Análisis de los resultados obtenidos	57
4.1.2.	Análisis del comportamiento del pH de los puntos de muestreo.....	59
4.1.3.	Análisis del comportamiento de la conductividad eléctrica en los puntos de muestreo.....	60
4.1.4.	Análisis del comportamiento de los sólidos totales disueltos en los puntos de muestreo.....	61
4.1.5.	Análisis del comportamiento del caudal en los puntos de muestreo	62
4.1.6.	Resultados de los análisis de la concentración de metales pesados disueltos ..	63
4.1.7.	Análisis de las concentraciones de los metales pesados disueltos de las muestras de aguas ácidas	67
4.1.8.	Pruebas estáticas de neutralización - precipitación	71
4.1.9.	Análisis de los parámetros físicos y químicos del agua ácida tratada	75
4.1.10.	Análisis de las concentraciones de metales pesados en las aguas ácidas ya tratadas.....	76
4.1.11.	Análisis de la solubilidad de los metales pesados disueltos	78

4.1.12.	Análisis de los metales del punto P-04 de muestreo de los efluentes de agua de mina con tratamiento activo químico neutralización – precipitación con cal.....	79
4.2.	Propuesta de diseño de la planta piloto de tratamiento convencional por neutralización secuencial con cal	83
4.2.1.	Tratamiento de aguas ácidas en una planta por neutralización.....	83
4.2.2.	Dimensionamiento de las plantas de neutralización.....	84
4.2.3.	Dosificación de cal	84
4.2.4.	Operaciones unitarias que conforman el sistema de tratamiento por etapas	85
4.3.	Discusión de resultados	86
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES	90
	REFERENCIAS.....	91
	ANEXOS.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Formación de aguas acidas de mina.....	27
Figura 2: Etapas de la formación de aguas acidas.....	30
Figura 3: Solubilidad de hidróxidos metálicos en función al pH.....	39
Figura 4: Fotómetro multiparamétrico de sobre mesa (HI 83 200).....	51
Figura 5: Análisis del pH en los puntos de muestreo.....	59
Figura 6: Análisis de la conductividad eléctrica en los puntos de muestreo.....	60
Figura 7: Análisis de los sólidos totales disueltos en los puntos de muestreo.....	61
Figura 8: Análisis de los caudales en los puntos de muestreo.....	62
Figura 9: Análisis de las concentraciones de Aluminio.....	67
Figura 10: Análisis de las concentraciones de Níquel.....	68
Figura 11: Análisis de las concentraciones de Cobre.....	68
Figura 12: Análisis de las concentraciones de Arsénico.....	69
Figura 13: Análisis de las concentraciones de Manganeso.....	70
Figura 14: Análisis de las concentraciones de Zinc.....	70
Figura 15: Análisis de las concentraciones de Hierro.....	71
Figura 16: Curvas de neutralización.....	75
Figura 17: Solubilidad de los hidróxidos de metales en función del pH.....	78
Figura 18: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Hierro.....	79
Figura 19: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Cobre.....	80
Figura 20: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Aluminio.....	80
Figura 21: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Zinc.....	81
Figura 22: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Níquel.....	82
Figura 23: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Manganeso.....	82
Figura 24: Diseño de una planta piloto de tratamiento convencional por neutralización por etapas.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Concesiones mineras.....	19
Tabla 2: Clasificación de los drenajes ácidos de mina (Bigatel <i>et al.</i> , 1998)	36
Tabla 3: Operacionalización de variables.	43
Tabla 4: Coordenadas UTM de La Rinconada.....	47
Tabla 5: Vías de acceso.....	47
Tabla 6: Coordenadas UTM de los puntos de muestreos.....	52
Tabla 7: Cronograma de toma de muestras.....	53
Tabla 8: Resultados de la primera etapa de muestreo.	57
Tabla 9: Resultados de la segunda etapa de muestreo del agua.	58
Tabla 10: Resultados de la tercera etapa de muestreo del agua.	58
Tabla 11: Resultados de la cuarta etapa de muestreo del agua.	58
Tabla 12: Caudales de los puntos de muestreo.	62
Tabla 13: Resultados del análisis de concentraciones en laboratorio de la muestra P-01.	63
Tabla 14: Resultados del análisis de concentraciones en laboratorio de la muestra P-02.	64
Tabla 15: Resultados del análisis de concentraciones en el laboratorio de la muestra P-03.	65
Tabla 16: Resultados de análisis de concentraciones en el laboratorio de la muestra P-04.	66
Tabla 17: Resultados de la primera prueba estáticas de Neutralización – precipitación con 0,1 g de CaO.....	72

Tabla 18: Resultados de la segunda prueba estáticas de neutralización - precipitación con 0,15g de CaO.....	73
Tabla 19: Resultados de la tercera prueba estáticas de neutralización - Precipitación con 0,2g de CaO.....	74
Tabla 20: Resultados de los análisis de los parámetros físico - químico de las aguas ácidas tratadas.	76
Tabla 21: Resultados del análisis de las concentraciones de metales pesados disueltos tratadas por neutralización directa.	77
Tabla 22: Resultados del análisis de las concentraciones de metales pesados disueltos tratadas por neutralización secuencial.	77

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

C.E.	: Conductividad eléctrica
CECOMIRL	: Central de Cooperativas Mineras Rinconada y Lunar
CMASA	: Corporación Minera Ananea S.A.
DAM	: Drenaje Ácido de Minas
D.S.	: Decreto Supremo
FIM	: Facultad de Ingeniería de Minas
FIQ	: Facultad de Ingeniería Química
GPS	: Sistema de Posicionamiento Global
MINAM	: Ministerio del Ambiente
pH	: Potencial de Hidrogeno
NTU	: Unidades Nefelométricas de Turbiedad
PSAD	: Datum Provisional Sudamericano
STD	: Sólidos totales disueltos
UNAP	: Universidad Nacional del Altiplano – Puno
Q	: Caudal
WGS84	: Sistema Geodésico Mundial 1984

RESUMEN

La presente tesis titulada: *Caracterización y tratamiento de efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada - Puno*, desarrollada en el paraje La Rinconada, Distrito de Ananea, Provincia de San Antonio de Putina y Región Puno. El tiempo de esta investigación es de noviembre del 2017 a septiembre del 2018, donde el principal problema es el vertimiento de los efluentes de aguas de mina que son aguas ácidas generados por la actividad minera y por el drenaje de agua pluviales y del deshielo que están siendo vertidas sin algún tratamiento, así generando la contaminación potencial de los cuerpos hídricos, la flora y la fauna de pastura. El objetivo general es evaluar la caracterización y el diseño de tratamiento de los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada. La investigación es experimental y explicativa empleando la adecuada caracterización físico y química, y para el tratamiento se trabajó con el método activo de neutralización - precipitación con cal como agente neutralizante, en el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de Minas – UNAP. Se realizaron ensayos de neutralización con muestras de 500 ml de agua cuyo valor de pH de 3,38 y con concentraciones de metales pesados disueltos como Cu, Fe, Al, Zn, Ni y Mn; en cuyo resultado final de los ensayos de neutralización para un tiempo de 05 a 10 minutos se obtuvo pH de 6,5 y 8,5 con la aceptable precipitación de los metales pesados disueltos como: hierro en 93,84 %, cobre en 80,95 %, aluminio en 99,37 %, zinc en 86,88 %, níquel en 10,3 % y manganeso en 95,55 %. Donde la dosis optima es de 0,4 g de cal por litro de agua ácida.

Palabras clave: Efluentes de mina, aguas ácidas, concentraciones y tratamiento.

ABSTRACT

The present thesis entitled: “*Caracterización y tratamiento de efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno*”, developed in La Rinconada, Ananea District, San Antonio de Putina Province and Puno Region. The time of this investigation is from November of 2 017 to September of 2 018, where the main problem is the discharge of mine water effluents that are acid waters generated by mining activity and rainwater drainage and thaw that are being discharged without any treatment, thus generating potential contamination of water bodies, flora and fauna of pasture. The general objective is to evaluate the characterization and treatment design of acid water effluents at the La Rinconada mine. The research is experimental and explanatory using the appropriate physical - chemical characterization, and for the treatment, we worked with the active method of neutralization - precipitation with lime as a neutralizing agent, in the Environmental Monitoring and Evaluation Laboratory of the Mining Engineering School – UNA-P. Neutralization tests were carried out with samples of 500 ml of water with a pH value of 3,38 and with concentrations of dissolved heavy metals such as Cu, Fe, Al, Zn, Ni and Mn; In the final result of the neutralization tests for a time of 05 to 10 minutes pH was obtained of 6,5 and 8,5 with the acceptable precipitation of the dissolved heavy metals like: iron in 93,84 %, copper in 80,95 %, aluminum in 99,37 %, zinc in 86,88 %, nickel in 10,3 % and manganese in 95,55 %. where the optimum dose is 0,4 g of lime per liter of acidic water.

Keywords: Mine effluents, acid waters, concentrations and treatment.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema

En la región Puno, una de las actividades principales es la actividad minera en sus diferentes rangos como: pequeña minería, artesanal e informal, que se desarrolla desde los años 70 hasta la actualidad, la mina La Rinconada, ubicado en el paraje La Rinconada y Cerro Lunar, Distrito de Ananea, Provincia de San Antonio de Putina de la Región Puno, se realiza actividades de minería aurífera subterráneas centrada en la explotación de mantos, vetillas y filones auríferos con características de abundantes cuarzos, pirita, calcopirita, pirrotita, galena, blenda con mezcla de sulfuros, óxidos de Cu. Y óxidos de Ag (Quispe, 2013).

En la mina La Rinconada, por la actividad minera que se realiza, se evidencia que los efluentes de aguas de mina son aguas ácidas que se forman por un proceso natural de oxidación de los minerales sulfurados, causados por el drenaje de las aguas pluviales, bombeo y aguas del deshielo, y que estos efluentes de aguas ácidas de mina tienen un bajo pH y que también contienen altas concentraciones de metales pesados disueltos como Fe, Mn, Zn, Pb, Cu, Hg, y otros del orden de varios cientos de miligramos por litro, que son vertidos al medio ambiente como el suelo, cuencas de ríos, riachuelos y lagunas sin tratamiento alguno y así generando la contaminación directa a la flora, fauna y para el ser humano.

Las consecuencias del DAM por el alto contenido existente de metales pesados en suspensión afectan al sistema ecológico y estos representan un peligro directo e indirecto para los seres vivos (peces, ganado de pastura, etc.) y esto a la vez consumidos por el

hombre de acuerdo al ciclo biológico se adquiere una serie de enfermedades de origen hídrico como son: enfermedades gastrointestinales, edemas cerebrales, insuficiencia renal, hipertensión, convulsiones, insomnio, efectos crónicos irreversibles (Amanqui y Lopez, 2004).

Hoy en día los drenajes ácidos de mina generados por la actividad minera en esta zona de La Rinconada se constituyen en una de las fuentes potenciales de contaminación a las aguas subterráneas y superficiales por consiguiente al medio ambiente (De la Cruz, 2006).

Existen reportes de la muerte de miles de peces y crustáceos de ríos, afecciones ha ganado y destrucción de cultivos y riveras, así con la introducción de una coloración y turbiedad en aguas de ríos, riachuelos y lagunas (Aduvire, 2006).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Pregunta general

¿Cuáles son las caracterizaciones y el diseño de tratamiento de los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno?

1.2.2. Preguntas específicas

¿Cuál es la caracterización de los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno?

¿Cuál es la técnica de tratamiento que se emplea en los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada - Puno?

¿Cuál es el diseño de la planta piloto del sistema de tratamiento a emplearse en los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno?

1.3. Justificación del problema

La ejecución de esta investigación es muy importante porque nos permitirá evaluar los impactos negativos que generan los drenajes ácidos de mina a fin de minimizar la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales, como también al sistema ecológico donde afecta directamente eliminando la flora, fauna y poniendo en riesgo la salud humana, por lo tanto, al evaluar, caracterizar se determinara el método de tratamiento de las aguas ácidas, así evitar y reducir la contaminación.

Los drenajes ácidos de mina siguen siendo un importante problema de contaminación del agua en la industria minera para todo el mundo, Pueden persistir durante décadas e incluso cientos de años una vez finalizado el ciclo productivo de la mina, que por tanto existe la necesidad de prevenir su formación y aplicar el tratamiento más adecuado de las aguas ácidas cuando ya se ha formado (Aduvire, 2006).

Según Cuentas (2009) en nuestra región Puno, la percepción que se tiene en la actualidad de la actividad minera mayoritaria mente es negativo a un más cuando se habla de las zonas mineras de Ananea, Rinconada y Cerro Lunar. Por ello se busca que el resultado del presente trabajo de investigación sirva como un documento base, que permita a otros grupos de interés contra puestos entre sí, o a las empresas mineras que tiene su actividad en esta zona inicien un dialogo en forma seria y responsable con el conocimiento sobre el adecuado manejo de los efluentes de aguas ácidas de mina y su posterior vertimiento al medio ambiente para así evitar la contaminación.

A más de ello, es indudable que fenómenos como el calentamiento global nos afecta con consecuencias directas en la perdida de glaciares (reservorios congelados de agua dulce) y fuentes de agua. (Calla y Cabrera, 2010), por lo tanto, es muy importante minimizar, mitigar y evitar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

En consecuencia, el presente proyecto de tesis es de mucha importancia, que sirve para evaluar, caracterizar y diseñar un sistema de tratamiento piloto de los drenajes ácidos de mina y así evitar, reducir la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por consiguiente del medio ambiente.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la caracterización y el diseño de tratamiento de los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno

1.4.2. Objetivos específicos

Determinar la caracterización de los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada - Puno.

Determinar la técnica de tratamiento que se emplea en los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno.

Diseñar la planta piloto de tratamiento a emplearse en los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes históricos

Se estima que los yacimientos auríferos del paraje La Rinconada ya se conocían desde la época incaica. Durante el virreinato (1553) los sacerdotes de la compañía de Jesús (jesuitas) realizaron trabajos de minería en esta zona y a inicios de la época republicana los trabajos se realizaban principalmente en los contornos del yacimiento cerca de la laguna La Rinconada, los trabajos más representativos los realizó Rinconada Mining Company Ltd. y como también trabajaron las familias como los Peña Prado, Arróspide, Ford e Irigoyen (Sutty, 2016).

En el año 1947 Don Alfredo Tomas Cenzano Cáceres, guiado por los escritos del sabio Antonio Raimondi, en su obra “El Perú” llega ávido de realizar exploraciones en los nevados de Ananea, Cerro San Francisco y Cerro Lunar, partir del año de 1952, denuncia las Minas Ana María, actualmente las minas La Rinconada (Quispe, 2013).

Tabla 1: Concesiones mineras.

Cronología de los denuncios de las minas Ana María					
Fecha	Partida N.º	Padrón N.º	Hectáreas	Nombre del denuncia	Nombre del denunciante
08/02/1952	611	58	105	Ana María	A. Tomas Cenzano Cáceres
01/09/1967	6374	59	152	Ana María N.º 1	A. Tomas Cenzano Cáceres
25/04/1978	6904	603	132	Ana María N.º 2	A. Tomas Cenzano Cáceres
25/04/1978	6905	604	100	Ana María N.º 3	A. Tomas Cenzano Cáceres
14/11/1978	7079	66	930	Ana María N.º 4	A. Tomas Cenzano Cáceres

Fuente: (Quispe, 2013).

En la actualidad la Corporación Minera Ananea S.A. es la encargada de administrar las concesiones de Ana María, empresa que representa y administra en nombre de las tres cooperativas las mismas que forman parte de CMASA y se encuentran representadas por la Central de Cooperativas Mineras de La Rinconada y Lunar Ltda. CECOMIRL LTDA.

La base de la organización social-administrativa de las minas se manifiesta en agrupaciones mineros, las cuales de acuerdo a la legislación vigente forman la central de Cooperativas Mineras de La Rinconada, las que a su vez forman parte de la Corporación Minera Ananea S.A. las mismas que están en proceso de formalización y son las siguientes: Cooperativa Minera San Francisco de Rinconada Ltda., Cooperativa Minera Lunar de Oro Ltda. y Cooperativa Minera Cerro San Francisco Ltda.

2.1.2. Antecedentes técnicos

Cervantes (2014) en su tesis titulado *Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo*, presentado a la Facultad de Ingeniería en la Universidad Nacional Autónoma de México concluye que: Con la caracterización del DAM se conoce que éste presenta valores de pH que oscilan de 2,44 y 3,38, altas concentraciones de metales disueltos entre los que destacan cadmio, cobre, fierro, manganeso y zinc además de presentar un alto contenido de sulfatos y cationes (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+}). Por lo tanto, el sistema que se proponga deberá ser capaz, en primera instancia, de elevar el pH del agua ya que bajo condiciones neutras la mayoría de metales presentan baja solubilidad y precipitan en forma de hidróxidos metálicos, y por el lado del sulfato este es químicamente estable en un amplio rango de pH. Sin embargo, se deberá tener especial

cuidado con el Zn y el Cd, ya que son de los pocos metales pesados que se pueden liberar aun elevando el pH a neutro.

Espinosa, Hidalgo y Delgado (2016) en su tesis titulado *Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (HDS)* presentado a la Universidad Autónoma de Yucatán concluye que: La concentración de sólidos suspendidos totales disminuye al irse neutralizando el agua ácida por efecto de la precipitación del ion ferroso en forma de hidróxido de hierro $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$; al respecto, la concentración de hierro decrece de 72,6 mg/l a 0 mg/l, el cobre de 0,634 mg/l a 0 mg/l en un pH de 8 conforme se neutraliza el AMD (Kuyucak *et al.* 2012). Y el aluminio de 21,8 mg/l a 1,10 mg/l en un pH de 6, Nótese también la presencia de metales pesados en el AMD, los cuales representan un peligro si se descargan directamente en cuerpos de agua.

Quispe (2008) en su tesis titulado *Neutralización y retención de metales en drenajes ácidos de mina de la faja pirítica ibérica con residuos de la industria papelera de Huelva* presentado al Departamento de Geología de la Universidad de Huelva concluye que: Definitivamente, el tratamiento de los AMD generados en la FPI con los residuos de ENCE demostró ser una alternativa viable, económica y eficiente además de ser una tecnología limpia y capaz de neutralizar estas aguas hasta pH cercanos a 7 y reducir en más de un 95 % el contenido de Fe en solución. Adicionalmente el proceso logra reducir apreciablemente el contenido de otros elementos potencialmente tóxicos tales como Zn, Ni, As, Mn, Cr, Cd, etc.

Lobato (2013) en su tesis titulado *Evaluación ambiental y programas de remediación de la cuenca alta del Rio Ramis*, presentado a la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería concluye que:

La actividad minera que se desarrolla o influye de manera negativa sobre los ecosistemas de la parte alta de la cuenca del río Ramis, es la pequeña minera, la minería informal y artesanal, porque estos no aplican el manejo ambiental para las actividades de extracción y proceso del mineral (oro), provocando con ello la contaminación del agua del río Ramis, como lo demuestran los resultados de laboratorio.

Salvá (2012) en su tesis titulado *Tratamiento y remoción de sólidos suspendidos y metales en la cuenca del río Boca Cabana* presentado a la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería concluye: en cuanto a su metodología el diseño fue experimental, que se procedió a calcular la dosis de cal y floculante (Magnafloc a 0,05% w/v) necesarios para realizar el tratamiento y remoción de los metales que superan los Estándares de Calidad Ambiental: se adiciono cal en agitación hasta obtener un pH entre 7,5 y 8,0 luego se adiciono floculante en agitación para acelerar la sedimentación. Como resultados se obtuvo, antes de la neutralización con cal se tuvo un pH de 5,1 plomo de 0,396 mg/l, SST de 1 684,7 mg/l; después del tratamiento se tuvo un pH de 7,5 conductividad de 1 200 $\mu\text{s}/\text{cm}$, plomo de 0,01 mg/l, por lo tanto, para alcanzar un pH entre 7,5 a 8 es necesario 0,4 g de cal/litro de agua y 0,5 ml de floculante/litro de agua.

Oré (2015) en su tesis titulado *Recuperación de los metales pesados presentes en el drenaje ácido de mina mediante la precipitación selectiva para su posterior utilización*, presentado a la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Centro del Perú, concluye que: Los diagramas de precipitación permiten establecer el pH adecuado para la mejor selectividad de los metales pesados estableciéndose una recuperación en hierro de 94,06 % a un pH de 4,285, 88,42 % de recuperación del cobre a un pH de 5,811, de 84,13 % de recuperación del zinc a un pH de 8,025 y de 96,89 % de recuperación de manganeso a un pH de 10,385.

Medina (2018) en su tesis titulado *Diseño y operatividad de la planta de neutralización de aguas acidas de mina Paragsha Cerro de Pasco en minera Volcan S.A.A.*, presentado a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Agustín concluye que: El proceso comienza con la entrada del agua ácida a la planta, a través de un canal donde se mide el caudal y el pH, pasa seguidamente a las cubas de neutralización donde se adiciona la lechada de cal hasta alcanzar un valor del pH entre 10 y 10,5; con el que se consigue que se formen los hidróxidos de hierro y manganeso. Estas cubas disponen de unos agitadores que garantizan una mezcla homogénea, transcurrido cierto tiempo.

Tuiro (2010) en su tesis titulado *Evaluación y propuesta de mitigación de efluentes de aguas acidas de cantera de caolín*, presentado a la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería concluye que: La caracterización geoquímica de las aguas y sedimentos monitoreados, indicaron que pueden causar grandes impactos sobre las aguas, suelos, flora y fauna por lo que se hace la propuesta de un proyecto de tratamiento de estos efluentes por el proceso de neutralización con cal cuyos resultados dieron aguas de calidad potable que cumplen en demasía con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental de Aguas (Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM) llegando a lograr eficiencias de remoción mayores a 90 %.

Montesinos (2017) en su tesis titulado *Caracterización de efluentes de mina para elección de la alternativa optima de tratamiento*, presentado a la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad católica del Perú, concluye que: La importancia de caracterizar los efluentes y los cuerpos de agua circundantes (lagunas, ríos, quebradas o manantiales) radica en la identificación de patrones o calidades de agua propias de la zona hacia donde debe apuntar el futuro vertido (posterior al tratamiento), el cual de acuerdo a

la normativa vigente no deberá de modificar la calidad propia del cuerpo receptor. Y el tratamiento de efluentes con altas concentraciones metálicas se ve favorecido al implementar la Neutralización Secuencial pues permite reducir el consumo de reactivos en la planta y estudiar la posibilidad de recuperar los lodos ricos en metales.

Amanqui y Lopez (2004) en su tesis titulado *Tratamiento de aguas ácidas en la Mina Rinconada en el afluyente del Balcón N.º 03*, presentado a la coordinación de investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano, concluye que: Las aguas ácidas de la mina la Rinconada en el afluyente del Balcón N.º 03, hoy en día constituye una fuente potencial de contaminación por la elevada acidez (pH de 3,01), por la alta concentración de metales pesados tóxicos disueltos de (Cu, Pb, Zn, Cd, etc.) y el caudal elevado de evacuación (274,64 m³/día).

Montalvo (2016) en su tesis titulado *Evaluación y propuesta de mitigación del drenaje generado por los pasivos ambientales mineros de San Antonio de Esquilache - Puno*, presentado a la Coordinación de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano, concluye que: Las aguas ácidas que drenados por los pasivos ambientales mineros de San Antonio de Esquilache (bocaminas) efluentes al río San Antonio de Esquilache, hoy en día se constituye una fuente potencial de contaminación por la elevada acidez (pH de 3,66) y la alta concentración de metales pesados (Fe, Cr, Cu y Ni); donde sobre pasan los Límites Máximos Permisibles de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ECA).

2.2. Fundamento teórico

2.2.1. Drenaje ácido de minas (DAM)

La minería es una de las actividades industriales con mayor grado de manipulación del agua, pues, por un lado, lo emplea en un gran número de operaciones y, por otro con

sus excavaciones genera grandes volúmenes fundamentalmente por infiltración de los acuíferos interceptados y de la escorrentía superficial. Como consecuencia de esto en todos los proyectos mineros es preciso contemplar los medios necesarios para el control y evacuación del agua fuera de las áreas de laboreo mediante bombeo y el empleo de adecuados sistemas de desagüe, así como la adopción de medidas de prevención de la contaminación de las mismas durante la explotación y abandono posterior (Aduvire, 2006, p. 5).

El drenaje ácido de mina es la acidificación del agua superficial y subterránea en una mina al estar en contacto con minerales metalíferos en las labores mineras, botaderos, relaves y otros de acuerdo a la mineralogía de la roca expuesta y de la disponibilidad de oxígeno y agua.

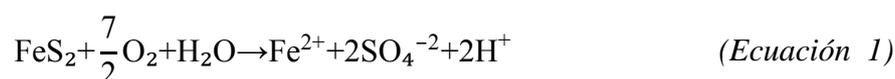
El DAM en términos generales es agua con niveles de pH bajo (en general $\text{pH} < 4$), con altos contenidos de Fe^{2+} y SO_4 disueltos, presenta elevada conductividad eléctrica, grandes cantidades en metales en solución que son potencialmente tóxicos como As, Cd, Pb, Zn, Cu, Hg, Sb, Se, etc. (Lottermoser, 2007). Los drenajes pueden ser ácidos o alcalinos, que pueden degradar el hábitat acuático y cambiar la calidad de las aguas debido a su toxicidad y corrosión que por lo general tienen unos valores de pH entre 2 a 9, contienen cationes y aniones en disolución (de < 1 a 100 000 mg/l), predominando elevadas concentraciones de metales y metaloides (Corzo, 2015).

Es importante que la relación de oxidación de los sulfuros no requiere de condiciones especiales para llevarse a cabo, es decir a condiciones ambiente, se inicia la reacción, en algunos casos se dice que ocurre de forma natural, y que la presencia de factores físicos, químicos y biológicos y de su relación dependerá el tiempo que tarde en presentarse el DAM (Cervantes, 2014).

El drenaje de aguas ácidas se produce tanto en minas activas como abandonadas, en túneles subterráneos, pozos, tajos abiertos, material de desmonte y relaveras. Este drenaje es poco importante cuando la mina esta activa porque el nivel freático es bajo debido al bombeo; sin embargo, es severo en minas abandonadas donde el sistema de bombeo deja de funcionar con el que se incrementa el nivel freático y con este la cantidad de aguas ácidas (Corzo, 2015).

2.2.2. Reacciones físicas, químicas y biológicas con la generación ácida

Algunos autores mencionan que las reacciones de generación ácida se expresan generalmente como la oxidación de la pirita, uno de los minerales sulfurosos más comunes (López *et al*; 2002; MEND, 1996; Maree y du Plessis, 1994; EPA, 1983). Inicialmente, los sulfuros reaccionan con el oxígeno y el agua para formar sulfato SO_4^{2-} , hierro ferroso (Fe^{2+}) e iones de hidrógeno (H^+). Esta reacción total de generación de ácido, en la que se muestra la pirita siendo oxidada por el oxígeno, puede representarse por la siguiente ecuación en la figura 1 (Cervantes, 2014).



Posteriormente, el hierro ferroso reacciona con el oxígeno para formar hierro férrico:



Dependiendo del pH en el ambiente alrededor del sitio de oxidación, el hierro férrico puede luego precipitarse en la forma de hidróxido (*Ecuación 3*), o puede, a su vez, ser utilizado como oxidante (*Ecuación 4*). A niveles de pH por encima de 3,5 el hierro férrico (Fe^{3+}) tiende a precipitarse como hidróxido férrico. Esto forma el precipitado de apariencia rojiza que se observa en la mayoría de minas que generan ácido. Durante esta reacción, se liberan iones de hidrógeno adicionales.

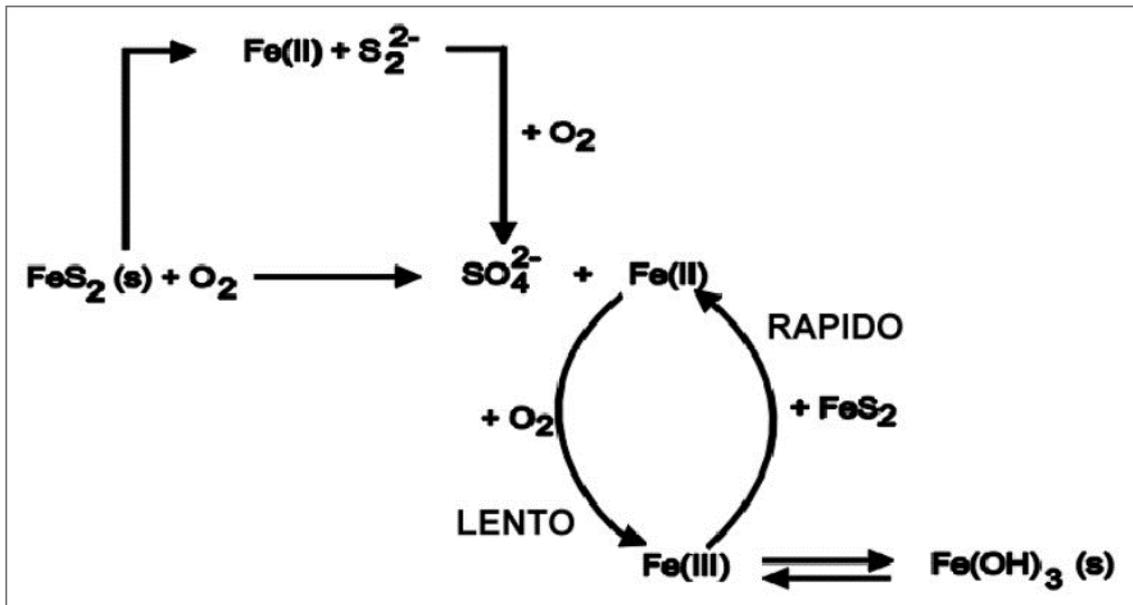
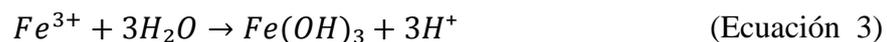
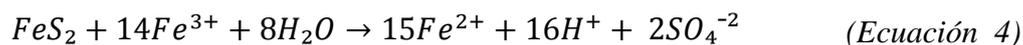


Figura 1: Formación de aguas acidas de mina.

Fuente: (Aduvire, 2006, p. 47).



A medida que se desarrolla la generación de ácido y se consume la alcalinidad disponible, el hierro férrico, a su vez, sirve como oxidante y puede promover la oxidación química de los minerales sulfurosos. En el caso de la pirita, la reacción que ocurre es la siguiente:



La velocidad del suministro de oxígeno es el elemento que controla principalmente la velocidad de la oxidación química (*Ecuación 1*). A niveles de pH inferiores a 4,5 la oxidación por el hierro férrico se convierte en el proceso de oxidación dominante. La velocidad de producción de hierro férrico, a partir del ferroso (*Ecuación 2*), se convierte en la etapa controlante del proceso total de oxidación. Sin embargo, por catálisis biológica, esta reacción es relativamente rápida (Cervantes, 2014, p. 15).

2.2.3. Formación del drenaje ácido de minas

Nordstrom y Alpers (1999) describe el proceso de oxidación de la pirita como el principal responsable de la formación de aguas ácidas; esta oxidación se ve favorecida en áreas mineras debido a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros a través de las labores mineras de acceso y por los poros existentes en las pilas de estériles y residuos como el incremento de la superficie de contacto de las partículas. Citado por: (López, Aduvire y Barretino, 2002).

La formación de aguas ácidas tiene lugar a partir de la oxidación química de los sulfuros, acelerada en muchos casos por la acción bacteriana. Los principales elementos que intervienen son: los sulfuros reactivos, el oxígeno y el agua (vapor o líquida), y como elemento catalizador las bacterias (Aduvire, 2006).

La comprensión de estos factores, así como de los procesos químicos y los reactantes involucrados, constituyen la clave para la predicción del potencial de generación de ácido en una obra minera.

Los componentes principales para la generación del DAM son:

Minerales sulfurosos

Agua o atmosfera húmeda

Un oxidante, especialmente el oxígeno de la atmosfera

La velocidad y la magnitud de la generación del DAM son afectadas por los siguientes factores secundarios:

Bacterias (Thiobacillus Ferrooxidans)

pH

Temperatura

El DAM se forma cuando los minerales de sulfuro, por ejemplo, pirita reaccionan en presencia de oxígeno, agua y bacterias llamadas Ferroxidans *Acidthiobacillus* (Sandow, 2011).

El factor principal en la formación del DAM es la oxidación de pirita (FeS_2), que libera protones e iones de Fe a la solución. La disminución del pH del agua, resultando de la pirita oxidada, puede acelerar la oxidación de otros minerales sulfúricos, como estibina (Sb_2S_3), argentita (Ag_2S), y estanita ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$). Secundariamente el DAM puede lixiviar metales y metaloides eco-tóxicos desde materiales geológicos de los cuales fluyen. Y que los iones metálicos eco-tóxicos, la acidez, y los resultantes precipitados asociados con el DAM, son amenazas significativas para los recursos de agua dulce (Strosnider *et al.*, 2014).

2.2.4. Etapas de formación del DAM

El proceso de formación de aguas ácidas, en su conjunto, también se puede explicar en tres etapas, como se observa en la Fig. 2.

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 Ferroxidans*) se produce 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).

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).

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 afectada 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.

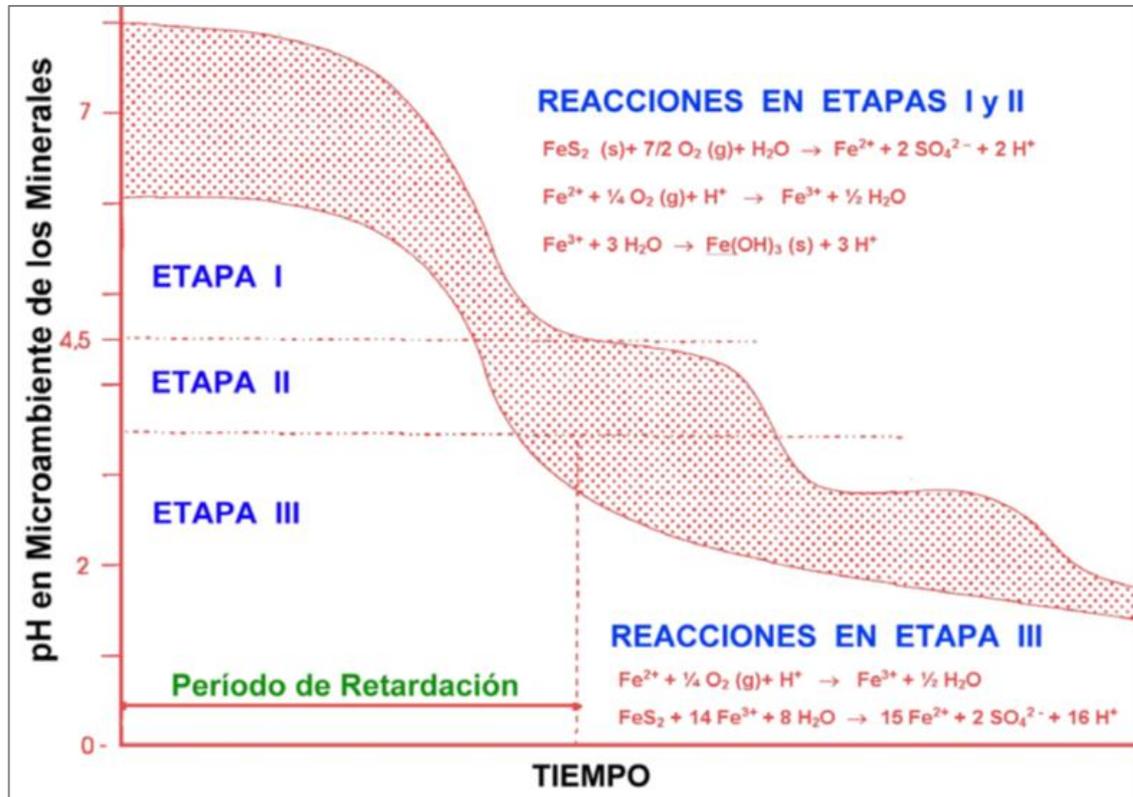


Figura 2: Etapas de la formación de aguas acidas.

Fuente: (Aduvire, 2006, p. 10).

En resumen, el *Thiobacillus ferrooxidans* oxida el ion ferroso a férrico que a su vez oxida a los sulfuros (pirita) produciendo más ácido. En este momento se producen grandes cantidades de ácido y se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

El mecanismo más importante es el indirecto, ya que es el que se auto cataliza (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.

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

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 desarrollo (la velocidad de reacción se habrá incrementado entre 10^5 y 10^6 veces respecto al mecanismo directo) (Aduvire, 2006, p. 11).

2.2.5. Factores que intervienen en la formación de aguas ácidas

Los factores que influyen en la generación de aguas ácidas a partir de los materiales rocosos que contienen pirita son las siguientes: el pH, la cantidad de oxígeno en la superficie de la pirita, la morfología de los minerales presentes, la temperatura, disponibilidad de agua, potencial de migración, cantidad y mineralogía de los sulfuros y la actividad microbiológica.

Otros factores que intervienen en la velocidad de oxidación de la pirita son las propiedades mineralógicas y factores externos químicos, físicos y biológicos. Las propiedades mineralógicas incluyen: el tamaño de la partícula, porosidad, área superficial, cristalografía, tipo de alteración y el contenido de elementos traza de la pirita;

y como factores externos se encuentra la presencia de otros sulfuros, la presencia o ausencia de microorganismos, así como la concentración de oxígeno y dióxido de carbono, temperatura, pH y la velocidad de la solución Fe^{2+}/Fe^{3+} a la intemperie (Lottermoser, 2007).

2.2.6. Características físicas, químicas y biológicas del DAM

El conocimiento de la naturaleza del agua residual industrial es fundamental de cara al proyecto como también a la explotación de los yacimientos mineros tanto de recogida como de tratamiento y evacuación de las aguas ácidas y residuales. A continuación, se describen brevemente los constituyentes físicos, químicos y biológicos de los drenajes ácidos de mina. Los contaminantes importantes de cara al tratamiento de las aguas ácidas.

Características físicas

Olor: El drenaje ácido de minas tiene un olor peculiar y característico debido a la presencia de sulfuro de hidrogeno que son productos de la reducción de los sulfatos a sulfitos por la acción de microorganismos anaerobios.

Color: En la mayoría de los casos, el color de las aguas ácidas es amarillento, naranja gris debido a la formación de sulfuros metálicos por reacción del sulfuro liberado en condiciones anaerobias con los metales presentes en los drenajes ácidos de mina.

Temperatura: La temperatura, de los drenajes ácidos de mina suele ser siempre más elevadas, la temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como también sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción. La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25° y los $35^{\circ}C$.

Turbiedad: Como medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, es otro parámetro que se emplea para indicar de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión.

Su medición se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones. La turbiedad del agua está causada por el material en suspensión (Tejada, 2017).

Características químicas

Metales pesados: Como constituyentes importantes de muchas aguas, también se encuentran cantidades, a nivel de traza, de muchos metales. Entre ellos podemos destacar el níquel (Ni), el manganeso (Mn), el plomo (Pb), el cromo (Cr), el cadmio (Cd), el cinc (Zn), el cobre (Cu), el hierro (Fe) y el mercurio (Hg). Muchos de estos metales también están catalogados como contaminantes prioritarios.

Sulfuro de hidrogeno: El sulfuro de hidrogeno, se forma durante el proceso de descomposición de la materia orgánica e inorgánica que contiene azufre, o en la reducción de sulfitos y sulfatos minerales, mientras que su formación queda inhibida en presencia de grandes cantidades de oxígeno.

pH: La concentración del ion hidrogeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de las aguas naturales como residuales, generalmente los drenajes ácidos de mina tienden a tener un pH bajo de 1 a 4,5.

Sólidos totales en suspensión: Los sólidos suspendidos totales o el residuo no filtrable de una muestra de agua natural o residual industrial o doméstica, se definen como la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca

a 103° - 105° C hasta peso constante. Este método es aplicable a aguas potables, superficiales, y salinas, aguas residuales domésticas e industriales y lluvia ácida (Marin, 2011).

Características biológicas

Bacterias catalizadoras: Las bacterias más importantes en el DAM son: Acidthiobacillus Ferrooxidans, Acidthiobacillus Thiooxidans, Leptospirillum Ferrooxidans y otras. Estas bacterias catalizadoras son capaces de generar ion férrico y ácido sulfúrico.

2.2.7. Caracterización del drenaje ácido de aguas de mina

La caracterización precisa de drenaje ácido de minas es muy importante para efectuar la correcta selección y dimensionamiento de los dispositivos operacionales que configuran el conjunto del tratamiento pasivo de las aguas ácidas (López, Aduvire y Barretino, 2002, p. 5).

La geoquímica de las aguas ácidas de mina es un fenómeno complejo al haber diversos procesos físicos, químicos y biológicos jugando un papel importante en la producción, liberación, movilidad y atenuación de los contaminantes, comprende una serie de procesos, como: la oxidación de la pirita, y otros sulfuros; la oxidación e hidrolisis del hierro disuelto y otros metales; la capacidad neutralizadora de la ganga, el mineral y roca encajonante; la capacidad neutralizadora de las aguas bicarbonatadas; la disponibilidad del oxígeno; la disponibilidad de agua líquida o en forma de vapor; la localización y forma de zonas permeables en relación con las vías de flujo; las variaciones climáticas (diarias o estacionales); la temperatura la acción de catálisis de las bacterias; la adsorción microbiana de metales; la precipitación y disolución de metales durante el transporte y otros (Aduvire, 2006).

Una adecuada caracterización de efluentes debe incluir la medida precisa y representativa del caudal de al menos un año hidrológico y al menos de los parámetros físicos y químicos siguientes (López, Aduvire y Barretino, 2002).

pH in situ

pH en laboratorio

Acidez/alcalinidad

Contenidos de metales totales y disueltos

Conductividad

Los términos acidez o alcalinidad de un drenaje es la capacidad que estos tienen para neutralizar una base o neutralizar un ácido respectivamente. Si un drenaje presenta acidez quiere decir que en este predomina su acidez total por lo que hablamos de un drenaje con acidez neta. La misma regla se cumple en el caso de que la alcalinidad sea la predominante. La ecuación que define lo anteriormente dicho se presenta a continuación:

$$\text{Acidez/Alcalinidad Neta} = \text{Acidez total} - \text{Alcalinidad total} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Teniendo en cuenta la acidez o alcalinidad de un drenaje de mina (Tabla 2) y elegir el dispositivo de tratamiento más adecuado, se ha confeccionado una clasificación agrupándolas en cinco categorías.

2.2.8. Control de los drenajes ácidos

El control de los drenajes ácidos se fundamenta en medidas de carácter preventivo y mitigador.

Tabla 2: Clasificación de los drenajes ácidos de mina (Bigatel *et al.*, 1998).

Sub categoría	Descripción	Rango de acidez o alcalinidad
1	Muy ácido	Acidez Neta > 300 mg/l como CaCO ₃
2	Moderadamente ácido	100 ≤ Acidez Neta ≤ 300 mg/l como CaCO ₃
3	Débilmente ácido	0 ≤ Acidez Neta < 100 mg/l como CaCO ₃
4	Débilmente alcalino	Alcalinidad Neta < 80 mg/l como CaCO ₃
5	Fuertemente alcalino	Alcalinidad Neta ≥ 80 mg/l como CaCO ₃

Fuente: (Aduvire, 2006, p. 54).

Las medidas preventivas se dan antes de la formación del DAM evitando proactivamente la oxidación de los sulfuros al contacto con agua y aire. Por otro lado, las medidas mitigadoras se dan cuando el DAM ya se ha formado y se busca minimizar o eliminar su generación con acciones de carácter correctivo. A continuación, se realiza una breve descripción de los tres niveles de control del DAM (Montesinos, 2017).

Medidas de control primario: Estas medidas están relacionadas a la prevención del DAM propiamente dicha y se basan en la supresión de los mecanismos de oxidación mediante la eliminación de uno de los elementos que intervienen en la formación del DAM. Por ejemplo, depósitos con impermeabilización, depósitos subacuáticos, desvío de agua, adición de materiales alcalinos y fosfatos, inhibición bacteriana con aplicación de bactericidas, etc (Montesinos, 2017).

Medidas de control secundario: Estas medidas se aplican cuando el DAM ya se ha generado. El objetivo principal es impedir o desviar la entrada del agua a las fuentes de acidez para evitar la migración del DAM (Montesinos, 2017).

Medidas de control terciario: Estas medidas están orientadas a coleccionar y tratar el DAM. Las técnicas de tratamiento a implementar van desde tratamientos activos como

neutralización, osmosis inversa, intercambio iónico, etc. y tratamientos pasivos como humedales aerobios, humedales anaerobios, etc (Montesinos, 2017).

La elección del control a implementar deberá considerar además el manejo de la operación minera (método de minado superficial o subterráneo), la mineralogía y la geoquímica del yacimiento, el clima, la topografía, la configuración del agua superficial y subterránea del entorno, la normativa vigente y los costos a generarse por la construcción, operación y mantenimiento de las medidas. (INAP 2009: 261) citado por: (Montesinos, 2017).

2.2.9. Tratamientos del drenaje ácido de minas

Los sistemas de recogida dependen de sí, las aguas ácidas son superficiales o subterráneas, en las primeras se utilizan cunetas, diques y pequeños embalses en los fondos de las explotaciones, mientras que para las segundas se recurre a zanjas de drenajes, muros de intercepción, pozos, galerías y otros. La mayoría de estos sistemas requieren de un cierto mantenimiento a largo plazo para garantizar su funcionamiento adecuado (Aduvire, 2006, p. 79).

Según Aduvire (2006) y Puig (2014) el tratamiento del drenaje ácido tiene como objetivo principal la remoción y aislamiento de metales y aniones metálicos mediante su precipitación como hidróxidos insolubles. En este proceso, los metales se extraen de la solución precipitada como sólidos o absorbidos en sólidos para luego ser separados como residuos (lodos) y ser eliminados, reutilizados o dispuestos bajo condiciones adecuadas. Citado por (Montesinos, 2017).

La precipitación de los metales se da en un intervalo de pH determinado que depende de los rangos de movilización de cada metal. En la Figura 3 se presentan gráficas

teóricas de solubilidad de hidróxidos metálicos en función del pH donde el punto más bajo de cada curva representa el punto óptimo de remoción (Montesinos, 2017).

Cabe mencionar que las curvas teóricas presentadas fueron construidas en base a ensayos a condiciones determinadas (temperatura, presión, etc.) por lo que para cada curva experimental se podrá observar un rango de desplazamiento ligado principalmente a las condiciones en las que se efectuó el ensayo (Montesinos, 2017).

El tratamiento del drenaje ácido puede darse por métodos activos o métodos pasivos. Básicamente la elección del tratamiento a implementar se centrará en la caracterización propia del drenaje, su caudal promedio, el uso final del agua tratada y el costo por infraestructura, operación y mantenimiento del tratamiento propiamente dicho (planta, humedal, etc.) (Montesinos, 2017).

Tratamiento por métodos activos

Las técnicas de tratamiento activo son las que requieren una operación, mantenimiento y monitoreo continuo y utilizan para su funcionamiento energía externa (energía eléctrica) y reactivos (Montesinos, 2017, p. 21).

Este tipo de tratamiento es mayormente utilizado en minas operativas y su ventaja principal radica en que puede ser aplicado para tratar grandes caudales y cualquier tipo de acidez, siendo además adaptable a cambios en la química del agua que pudiera darse durante el avance del minado (Montesinos, 2017, p. 22).

Si bien este tipo de tratamiento no requiere de grandes áreas para su infraestructura, su costo de inversión es elevado pues implica el montaje de una planta de tratamiento químico con diversos equipos como tanques, clarificadores, bombas entre otros. Así mismo, por ser de operación continua, su costo operativo considerará la adición

rutinaria de reactivos requiriendo el monitoreo permanente del personal (Montesinos, 2017, p. 22).

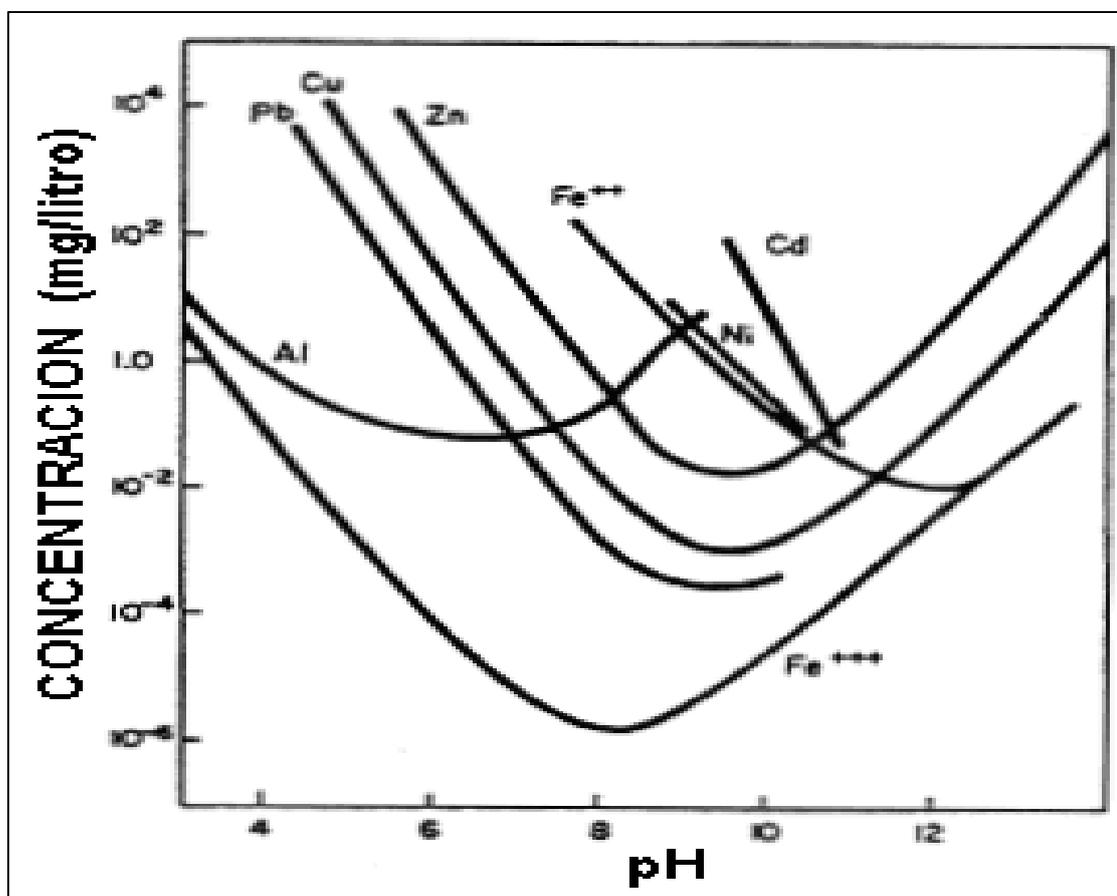


Figura 3: Solubilidad de hidróxidos metálicos en función al pH.

Fuente: (Aduvire, 2006, p. 103).

Entre los métodos de tratamiento activo más comunes tenemos: Control de pH o neutralización/precipitación, intercambio iónico, métodos electroquímicos, procesos de membrana como la filtración, ósmosis inversa, etc.

Mundialmente el método de mayor aceptación es el tratamiento de neutralización/precipitación con cal que realiza la neutralización de drenaje ácido en un sistema mecánico que facilita la neutralización y la eliminación de metales mediante la adición de reactivos neutralizantes como CaO (cal viva), Ca(OH)₂ (cal apagada), caliza rica en calcio, soda caustica, etc (Montesinos, 2017, p. 22).

Tratamiento químico por neutralización con cal

El tratamiento activo del DAR es una tecnología ampliamente conocida y aceptada. Se basan en la adición de sustancias alcalinas, generalmente cal, cal hidratada, caliza triturada, sosa caustica, carbonato sódico o amoníaco, con el fin de conseguir la neutralización del ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para la precipitación de metales pesados (Aduvire, 2006).

Se suele utilizar cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que es particularmente útil para tratar grandes caudales en condiciones de alta acidez. Como la cal hidratada es hidrófoba, para conseguir una buena mezcla con el agua, se precisa de un dispositivo de agitación. Cuando se pretende eliminar el hierro, en el propio proceso de agitación se incorpora la aireación necesaria para lograr la oxidación del hierro ferroso hasta transformarse en hierro férrico y conseguir la mayor eliminación de este (Medina, 2018, p. 29).

Los lodos que se obtienen presentan una gran cantidad de sulfato cálcico, que desde los decantadores pueden bombearse a una balsa de almacenamiento o en algunos casos, escurrir el agua en filtros prensa para una manipulación más cómoda de los sólidos. Esta técnica, tiene una limitación, cuando se requiere alcanzar un pH muy alto para precipitar metales como el manganeso (Aduvire, 2006, p. 82).

Asimismo, Aduvire (2006) indica que la mayoría de sistemas de tratamiento activo para aguas ácidas de mina están basados en la precipitación de hidróxidos, que se realiza en un proceso de tres pasos:

Oxidación (para convertir Fe^{2+} en Fe^{3+}).

Dosis con álcalis, especialmente lechada de Cal ($(\text{OH})_2$).

Sedimentación.

Neutralización química de las aguas ácidas

El proceso de neutralización de las aguas ácidas mediante la adición de sustancias alcalinas es el que actualmente se lleva a cabo en la mayoría de las minas que generan efluentes de este tipo (Aduvire, 2006, p. 85).

El tratamiento en las plantas convencionales se realiza en tres etapas: neutralización, oxidación y precipitación (Aduvire, 2006, p. 85).

2.3. Bases Conceptuales

Cal: Es el producto que se obtiene de la calcinación de la piedra caliza por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio. La caliza, al calentarla a 900 °C, pierde el CO₂ y se convierte en cal viva. El CaO mezclado con agua forma el hidrato cálcico, cal pagada (Ca(OH)₂), se hincha, produce mucho calor y se endurece o como corrientemente se dice, fragua. La cal viva sometida al tratamiento con agua, se llama cal apagada (hidróxido de calcio) (Tejada, 2017).

Efluente: Producto de desecho de un proceso gaseoso, líquido o sólido que es descargado al ambiente. Estos desechos pueden haber sido tratados o no. Cualquier sólido, líquido, gas o semisólido que entra en el ambiente como un subproducto de actividades humanas (Tejada, 2017).

Muestra de agua: Porción de agua representativa de un cuerpo acuoso en un tiempo y lugar específico (Tejada, 2017).

Neutralización: Adición de un material ácido o alcalino al agua o al suelo para ajustar su pH hasta alcanzar el valor de 7 (neutro) (IGME, 2004, p. 330).

Precipitación: Producir en una disolución una materia sólida que caiga al fondo de una vasija.

Relaves: En la mayoría de los casos las aguas decantadas que se descargan de las pozas de relaves cumplen con las normas de pH, sólidos suspendidos, metales disueltos e incluso con el contenido de cianuro (Tejada, 2017).

Sedimentación: Es la separación de partículas sólidas en suspensión de un líquido, mediante asentamiento por gravedad (IGME, 2004, p. 330).

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La contaminación ambiental en la zona de estudio es muy alta de acuerdo a la caracterización y el diseño de tratamiento de los efluentes de aguas ácidas porque no cumplen con los estándares de calidad ambiental para agua categoría 3, riego de vegetales y bebida de animales en la mina La Rinconada – Puno.

2.4.2. Hipótesis específicas

De acuerdo a la caracterización de los efluentes de aguas ácidas poseen un bajo pH y su exposición es generadora de acidez en la mina La Rinconada – Puno.

La técnica de tratamiento por neutralización con cal, neutraliza la acidez en los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno.

Con la adecuada caracterización de los efluentes de aguas ácidas es posible diseñar la planta piloto de tratamiento en la mina La Rinconada – Puno.

2.5. Operacionalización de variables

2.5.1. Variable independiente (Vi)

Las aguas ácidas de los efluentes de la mina La Rinconada.

2.5.2. Variable dependiente (Vd)

Neutralización.

2.5.3. Variable interviniente (Vint)

En la variable interviniente tenemos el pH del agua.

Tabla 3: Operacionalización de variables.

Tipo de variable	Variable	Indicador	Unidad
Independiente	Las aguas ácidas de los efluentes de la mina La Rinconada	Caudal	l/s
		Conductividad eléctrica	µs/cm
		pH	1 a 14
		Sólidos totales disueltos	ppm o mg/l
		Metales pesados	mg/l
		pH	1 a 14
Dependiente	Neutralización	Fe	mg/l
		Cu	mg/l
		Al	mg/l
		Mn y otros	mg/l
Interviniente		pH	1 a 14

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Tipo y diseño de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

La presente investigación que se realizó es de tipo cuantitativo, aplicada y explicativo, porque se recogen las muestras y se realizaron los respectivos análisis de los parámetros físico-químicos y de las concentraciones de los metales pesados disueltos en los efluentes de la mina La Rinconada.

También el estudio es explicativo, pues se explicarán las causas de los fenómenos que se den en el tratamiento de neutralización - precipitación de las aguas ácidas aplicando cal (hidróxido de calcio) como agente neutralizante.

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014) señala que el estudio explicativo se centra en aplicar el por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da.

3.1.2. Diseño de investigación

El diseño de la presente investigación es experimental mediante las pruebas de jarras de neutralización con cal (hidróxido de calcio) en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de Minas, en donde el tratamiento de mitigación de los efluentes de la mina involucra la realización de las actividades como: recolección, transporte y análisis de las muestras. Así como la realización de las pruebas experimentales de tratamiento por neutralización – precipitación con cal, hasta lograr rangos de pH 8,5, 10,1 y 11,2, en el que la concentración de los metales pesados disueltos en los efluentes de mina disminuyó a valores muy cercanos al de los Límites Máximos Permisibles.

En ese sentido la realización de estas pruebas experimentales con técnica de activos que se fundamenta en un método químico que es un proceso de oxidación, con álcalis (cal), se demostró la reducción de la concentraciones de los metales pesados disueltos, a través de los ensayos de neutralización, precipitación, decantación y sedimentación de los efluentes de aguas ácidas de la mina, lo que constituyó un procedimiento para la eliminación de los metales pesados disueltos en los efluentes de la mina La Rinconada y que permita el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles y D. S. N° 004-2017-MINAM para la categoría 3, riego de vegetales y bebida de animales.

El diseño de la investigación fue experimental, en la que se operaron dos variables una independiente y la otra dependiente, se manipulo la variable independiente (causa), aplicando los tratamientos de neutralización con cal (hidróxido de calcio) sobre la variable dependiente tratamiento (efecto) y se procedió a evaluar y determinar los parámetros fisicoquímicos de la muestra de agua ácida antes y después de los tratamientos.

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014) señalan que le diseño experimental se refiere a un estudio en el que se manipula una o más variables independientes, para luego analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes

3.2. Población y muestra de investigación

3.2.1. Población

La población de este trabajo de investigación son los efluentes de aguas ácidas generados por la actividad minera como también por los drenajes de las aguas pluviales, bombeó de interior mina y aguas del deshielo en la unidad económica administrativa Ana María que es la zona de las minas La Rinconada.

3.2.2. Muestra

La muestra de la investigación son las aguas ácidas productos de la actividad minera en las minas La Rinconada. Viene hacer la muestra tomada en el punto P-01, P-02, P-03 y P-04 como lo indica el anexo 02 y 03 de cada punto de muestreo se tomó 10 litros y como muestra representativa se tomó 5 litros para su análisis de los parámetros físico-químico del agua de los efluentes de aguas ácidas de mina, estos se realizaron en las 3 etapas de muestreo teniendo una muestra de 55 litros, en la última etapa se tomó 20 litros del punto 04 y 10 litros de los otros puntos para los ensayos de neutralización. La muestra total que se ha utilizado para las pruebas de neutralización – precipitación es de 50 litros de agua de los efluentes de aguas ácidas de la mina La Rinconada adicional al ensayo de los parámetros físico- químico en las tres primeras etapas se utiliza 55 litros. Entonces el tamaño de la muestra total es de 105 litros de agua del efluente de mina aproximadamente.

3.3. Ubicación y delimitación del área de estudio

3.3.1. Ubicación política

Las minas de La Rinconada de la Unidad Económica Administrativa Ana María, se ubica dentro de la jurisdicción del Departamento de Puno, Provincia de San Antonio de Putina, Distrito de Ananea y el Paraje La Rinconada

3.3.2. Ubicación geográfica

Se ubican en el extremo Sur Oriental del Perú, al noreste de la Región Puno, en el extremo sur de la cordillera oriental de los andes, dentro de la cordillera Carabaya en la zona Nororiental de la meseta del Collao.

Las minas La Rinconada están ubicada geográficamente en las siguientes coordenadas UTM (sistema WGS 84), como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Coordenadas UTM de La Rinconada.

Coordenadas UTM	
Este	452 205
Norte	8 383 034
Altitud	5 100 m.s.n.m.

3.3.3. Accesibilidad

Desde Puno se llega a la zona del proyecto de investigación por medio de vía terrestre excepto de Lima a Juliaca, (ver anexo 01) ver la Tabla 5:

Tabla 5: Vías de acceso.

Tramos	Vía	Distancia (km)	Tiempo	Condición
Lima – Juliaca	Aéreo	842	01 h: 32 min	Muy buena
Puno – Juliaca	Terrestre	45	00 h: 45 min	Buena
Juliaca – Putina	Terrestre	90	01 h: 15 min	Buena
Putina – Ananea	Terrestre	65	01h: 15 min	Buena
Ananea – Rinconada	Terrestre	15	00h: 30 min	Regular

3.3.4. Precipitación fluvial

Para el análisis de la precipitación se ha tomado como referencia la estación meteorológica Ananea CO. 114 050 para calcular el promedio del año 2 017 y 2 018. En la estación meteorológica Ananea la precipitación total anual promedio es de 50,1 mm (septiembre hasta septiembre del 2 018), siendo el más bajo en el mes de junio 0,0 mm y el más alto es en el mes de enero 131,0 mm.

3.4. Materiales, equipos y reactivos experimentales

3.4.1. Materiales

Frascos de vidrio y plástico

Guantes quirúrgicos

Botas

Cooler (para preservar las muestras)

Muestras (aguas ácidas)

Cinta masking tape

Cinta de embalaje

Agua estéril

Cucharilla metálica

Matraz Erlenmeyer

Pipetas graduadas

Probeta milimetrada (50 ml)

Vasos de precipitado (150 ml y 1000 ml)

Embudo de vidrio

Papel de filtro

Piseta o matraz de lavado

Recipientes de plásticos (para almacenamiento de muestras)

Jeringas de plástico estéril (1 ml y 10 ml)

Varilla de vidrio

Papel bond

Plumón

Lapiceros

3.4.2. Equipos

Multiparámetro (HANNA 9 828): Es un instrumento impermeable de medición de pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y temperatura, las lecturas de pH, CE, TDS, tienen compensación automática de temperatura, las unidades están en $\mu\text{s}/\text{cm}$, ppm y $^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

Balanza analítica (A&D HR-250): Son instrumentos compactos de peso HR-A, son rápidas y exactas y confiables con puertas giratorias, con vitrina inastillable, de tamaño de 20*30 cm, con capacidad de peso de 252 g con un tiempo de estabilización de 2 segundos, sus unidades de lectura en peso están en g, mg, oz y otros y que pueden operar de 5 a 40 $^{\circ}\text{C}$.

Agitador magnético (VELP SCIENTIFICA): Es un instrumento construido para la agitación de los líquidos en un recipiente o vasos precipitados que asegura la agitación uniforme, con una regulación electrónica de velocidad hasta 1 500 rpm, con un volumen de agitación de hasta 20 litros de agua incluida con una barra magnética de 6*35 mm.

Fotómetro multiparamétrico de sobre mesa (HANNA HI 83 200): Es un instrumento de sobre mesa diseñado para análisis de las aguas residuales y que analiza varios metales y parámetros del agua como: hierro, cobre, aluminio, zinc, níquel,

manganeso, pH y otros usando reactivos específicos líquidos o en polvos. La cantidad de reactivo esta dosificada para cada análisis que se desarrolle. Las dimensiones son de 235*200*110 mm, peso de 0.9 kg y con su kit para la preparación de las muestras.

Correntómetro de hélices (Global Water M-FP): Es un instrumento especialmente desarrollado para la medición de la velocidad de corrientes en ríos, canales, arroyos y zanjas, funciona óptimamente en aguas limpias y residuales. La unidad consta con un lector digital, varilla telescópica milimetrada y una hélice en parte inferior de la varilla y las lecturas de velocidad están en pie/s, m/s.

GPS Garmin: Instrumento para la navegación al aire libre que funciona como un navegador por satélite y para la toma de puntos de muestreo.

Laptop: Es una computadora portátil de peso y tamaño ligero que se utilizó para hacer los cálculos matemáticos, estadísticos, informe dibujos y otros.

3.4.3. Reactivos

CaO: Es una sustancia alcalina constituida por oxido de calcio de color blanco grisáceo también llamada cal viva ver anexo 13, la pureza de la cal CaO.

Reactivo Hierro: Se utilizó un sobre dosificado en polvo, código HI 93721-0.

Reactivo Cobre: se usó un solo reactivo dosificado en un sobre llamado bicinconinato con código HI 93 702-0.

Reactivo Aluminio: se utilizó 3 reactivos, uno ácido ascórbico con código HI 93 712A-0, luego el aluminon con código HI 93 712B-0 R y el ultimo polvo de blanqueo con código HI 93 712C-0.

Reactivo Zinc: se utilizó dos reactivos uno en polvo con código HI 93 731A-0 y el otro en liquido de 0.5 ml con código HI 93 731B-0 llamado ciclohexanona



Figura 4: Fotómetro multiparamétrico de sobre mesa (HI 83 200).

Reactivo Aluminio: se utilizó 3 reactivos, uno ácido ascórbico con código HI 93 712A-0, luego el aluminon con código HI 93 712B-0 R y el ultimo polvo de blanqueo con código HI 93 712C-0.

Reactivo Zinc: se utilizó dos reactivos uno en polvo con código HI 93 731A-0 y el otro en liquido de 0.5 ml con código HI 93 731B-0 llamado ciclohexanona

Reactivo Níquel: Se usó un sobre de reactivo en polvo de código HI 93726-0

Reactivo Manganeso: se utilizó dos paquetes de sobres de citrato con código HI 93 709A-0 y el otro periodato de sodio con código HI 93 709B-0.

3.5. Técnicas de recolección de datos

Primeramente, se identificó los lugares más representativos en los efluentes de las aguas ácidas de mina con la utilización de GPS (garmin). Determinados los puntos de muestreo, se efectuaron la toma de muestras de acuerdo al protocolo que se exige para

este caso “protocolo de monitoreo de aguas del sector Energía y Minas” las muestras fueron rotuladas a medida de su recolección, y con el protocolo que se exige fueron trasladadas al laboratorio de la Universidad Nacional del Altiplano (Mega Laboratorio de Investigación Ambiental Suelos - Aguas) y al laboratorio de la Facultad de Ingeniería de Minas UNA-Puno.

3.6. Procedimientos de experimento

Ubicación de los puntos de muestreo

Para la recolección de muestras primero se seleccionó un lugar estratégico y representativo, que debe ser accesible y seguro para poder tomar las muestras siguiendo las recomendaciones del protocolo de monitoreo, ver Tabla 6.

Tabla 6: Coordenadas UTM de los puntos de muestreos.

Punto	Este	Norte	Altitud
P-01	451 693	8 383 041	4 838
P-02	451 718	8 383 448	4 830
P-03	451 650	8 383 196	4 825
P-04	451 395	8 383 075	4 790

Cronograma de toma de muestras

El cronograma de toma de muestras es en cuatro fechas de muestreos diferentes, a continuación, se muestra las fechas y los puntos de muestreo, ver Tabla 7.

Procedimientos de toma de muestra

Para la presente investigación se tomaron muestras en cuatro puntos estratégicos (bocamina y efluentes del riachuelo), en fechas diferentes y en cuatro puntos distintos, al muestrear se tomó 01 muestra de 5 litros por cada punto de muestreo haciendo un total

de 20 litros por cada fecha de muestreo, pero en el último se tomó 10 litros y 20 litros del P-04 en total 50 litros en total de la cuarta etapa.

Tabla 7: Cronograma de toma de muestras.

Fechas de muestreo	Puntos de Muestreo			
	P-01	P-02	P-03	P-04
12/11/2 017	si	si	si	si
12/02/2 018	si	si	si	si
07/05/2 018	si	si	si	no
10/08/2 018	si	si	si	si

Procedimientos de toma de muestra

Para la presente investigación se tomaron muestras en cuatro puntos estratégicos (bocamina y efluentes del riachuelo), en fechas diferentes y en cuatro puntos distintos, al muestrear se tomó 01 muestra de 5 litros por cada punto de muestreo haciendo un total de 20 litros por cada fecha de muestreo, pero en el último se tomó 10 litros y 20 litros del P-04 en total 50 litros en total de la cuarta etapa.

Los parámetros físicos y químicos del agua que se tomaron en in situ de cada punto de muestreo fueron como: lectura de pH, caudal, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, temperatura y otros con los equipos y personal del Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la FIM - UNA-Puno.

Caracterización de los parámetros físicos y químicos de las aguas ácidas

Para determinar los parámetros físicos y químicos de las muestras obtenidas se realizaron los análisis respectivos en el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de Minas UNA-Puno, también fueron analizados

(tercera etapa de muestreo) en el laboratorio de la Universidad Nacional del Altiplano (Mega Laboratorio de Investigación Ambiental Suelos - Aguas).

La determinación de los parámetros químicos (concentración de metales pesados disueltos) de las muestras en el laboratorio se realizó con muestra que fue previamente sedimentada y filtrada, utilizando el fotómetro multiparamétrico y reactivos ya mencionados en la página 56.

3.7. Descripción experimental del plan de tratamiento de aguas ácidas

Se realizaron ensayos que se especifican posteriormente utilizando las muestras de la cuarta etapa de muestreo, previo a las pruebas de neutralización y precipitación se realizó el análisis físico y químicos (caracterización de las aguas ácidas) en el laboratorio el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de Minas UNA-Puno.

Pruebas estáticas de neutralización y precipitación

El objetivo principal de esta prueba es observar, en un ambiente sin corriente, como evoluciona el pH al introducir (CaO) como elemento neutralizador a diferentes alturas (Calvo, Casado, Zamora y Alfonso, 2013).

Utilizando lechada de cal como agente neutralizador

De acuerdo a las pruebas realizadas se determinó las características de la lechada más eficiente a utilizarse, siendo este:

$$\text{pH} = 12,66$$

$$\text{Concentración } 4 \% = 0,4 \text{ g/l}$$

Procedimiento de la prueba

Para el tratamiento por neutralización de agua ácida se tomó una muestra de agua ácida de 500 ml.

Se hizo la lectura inicial de los parámetros físicos y químicos de la muestra seleccionada de pH, CE, STD, Metales Pesados, turbidez y temperatura.

Pesar 0,4 g de óxido de calcio CaO (cal) y mezclar a 100 ml de agua estéril

Se preparó la solución neutralizadora de hidróxido de calcio Ca (OH)₂ en 100 ml de agua estéril, para el mezclado homogéneo se usó la agitación magnética

Se determinó el valor de pH de saturación de la solución de neutralización, haciendo el uso del multiparamétrico.

Se puso la muestra de agua ácida de 500 ml en el equipo de agitación magnética poniendo en funcionamiento inmediatamente a 1 000 rpm.

Se añadió 25 ml de la solución neutralizadora dejando en agitación durante 10 segundos.

Finalmente, la muestra se deja en reposo y se realiza el control del valor de pH a cada 30 segundos hasta que esta se estabilice.

Se hizo la repetición de la operación añadiendo 37,5 ml y 50 ml de la solución neutralizadora respectivamente.

Se graficó los resultados obtenidos para cada una de las muestras tratadas.

Por último, se realizó el análisis de la concentración de los metales pesados disueltos a pH 8,5 de la muestra tratada.

Procedimiento para los ensayos de neutralización secuencial.

Inicialmente, para el tratamiento secuencial se tomó una muestra de 1 000 ml de agua ácida.

Luego se sometió la muestra a los 4 siguientes pasos del primer procedimiento.

Para empezar con la primera etapa se añadió 10 ml de lechada en donde alcanzo a un pH de 4,4 y se realiza la decantación en 10 a 20 minutos, se procedió al filtrado y a los análisis de los metales pesados disueltos.

Este procedimiento se realizó hasta llegar a los pH de 5,25 y 6,5, así terminado la primera etapa del tratamiento y el hidrolisis de los metales como Fe, Cu y Al.

Los sólidos formados producto de la decantación fueron separados y depositados en frascos

Los pasos mencionados fueron repetidos hasta lograr un pH de 8,5, 10,1 y 11,2 hasta lograr el hidrolisis de Ni, Zn y Mn.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada

4.1.1. Análisis de los resultados obtenidos

De acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio de los análisis físico y químico de los efluentes de aguas ácidas de la mina La Rinconada, primera etapa ver anexo 07, tercera etapa ver anexo 08 y cuarta etapa ver anexo 10, se logra observar que los cuatro puntos de muestreo y de las cuatro etapas tienen un pH menor de 7, y lo que indica que estas aguas son ácidas y que estos resultados indican que están por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP) de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua de la categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales del Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (ver Anexo 06); por lo tanto estas aguas ácidas del efluente no son aptas para ningún tipo de consumo, también se analizan la conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, temperatura y caudal.

Resultados de la primera etapa de muestreo del agua.

Tabla 8: Resultados de la primera etapa de muestreo.

Parámetros	Unidades	Puntos de muestreo			
		P-01	P-02	P-03	P-04
Potencial de Hidrogeno	pH	3,27	3,28	3,3	3,42
Conductividad Eléctrica	µs/cm	1 320	1 090	1 940	3 240
Sólidos Totales Disueltos	mg/l	660	550	970	1 630
Temperatura	Celsius	12,7	12,7	13,4	13,1
Caudal	l/s	3,6	39,5	60,1	76,5

Fuente: Resultado de análisis físico-químico de agua del laboratorio de la Facultad de Minas UNA-Puno (2017).

Resultados de la segunda etapa de muestreo del agua

Tabla 9: Resultados de la segunda etapa de muestreo del agua.

Parámetros	Unidades	Puntos de muestreo			
		P-01	P-02	P-03	P-04
Potencial de Hidrogeno	pH	3,38	3,30	3,32	3,45
Conductividad Eléctrica	µs/cm	1 310	1 100	1 900	3 140
Solidos Totales Disueltos	mg/l	600	510	910	1 530
Temperatura	Celsius	12,7	12,7	13,4	13,1
Caudal	l/s	4,6	45,2	72,5	81,8

Fuente: Resultado de análisis físico-químico de agua del laboratorio de la Facultad de Minas UNA-Puno (2018).

Resultados de la tercera etapa de muestreo de agua

Tabla 10: Resultados de la tercera etapa de muestreo del agua.

Parámetros	Unidades	Puntos de muestreo			
		P-01	P-02	P-03	P-04
Potencial de Hidrogeno	pH	2,35	2,92	2,85	-
Conductividad Eléctrica	µs/cm	2 620	1 843	2 230	-
Solidos Totales Disueltos	mg/l	1 840	1 290	1 550	-
Turbidez	NTU	19,3	60,4	56,4	-
Salinidad	mg/l	1 320	920	1 110	-
Potencial Redox	m V	245,9	214,9	2 19,1	-
Temperatura	Celsius	13	13	13	-
Caudal	l/s	5,0	21,3	32,5	39,8

Fuente: Resultado de análisis físico-químico de agua en el mega laboratorio de investigación ambiental suelos – agua de la UNA-Puno (2018).

Resultados de la cuarta etapa de muestreo de agua

Tabla 11: Resultados de la cuarta etapa de muestreo del agua.

Parámetros	unidades	Puntos de muestreo			
		P-01	P-02	P-03	P-04
Potencial de Hidrogeno	pH	4,25	3,35	3,25	3,59
Conductividad Eléctrica	µs/cm	2 240	1 510	1 700	1 760
Solidos Totales Disueltos	mg/l	1 120	750	850	880
Turbidez	NTU	89	98,1	99,6	102
Temperatura	Celsius	11,5	12,1	9,7	10,7
Caudal	l/s	1,0	20,2	35,6	42,3

Fuente: Resultado de análisis físico-químico de agua del laboratorio de la Facultad de Minas UNA-Puno (2018).

4.1.2. Análisis del comportamiento del pH de los puntos de muestreo

El análisis del comportamiento del pH de los puntos de muestreo de los efluentes de la mina La Rinconada, se realizó en cuatro puntos diferentes y cuatro etapas distintas, en donde el pH permitido por el D.S. 004-2017-MINAM (ver anexo 06), los Límites Máximos Permitidos de pH para el agua tienen que estar en el rango de 6,5 a 8,5 para este análisis ver figura 5.

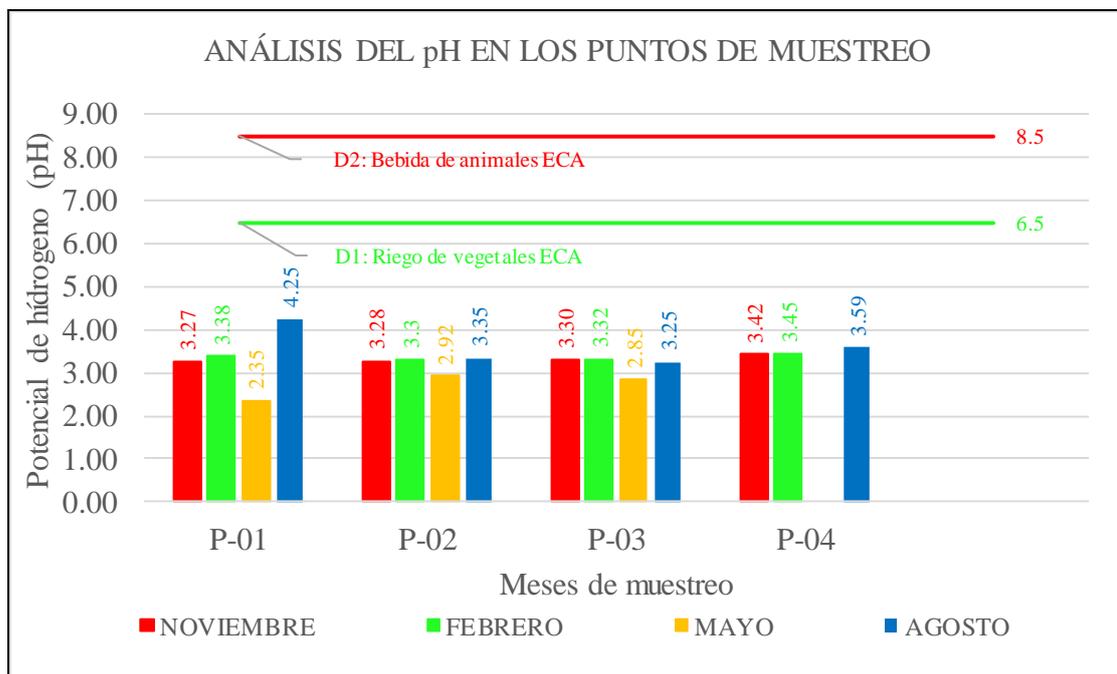


Figura 5: Análisis del pH en los puntos de muestreo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio (FIM y UNA-P) se logra observar que en la figura 5 se muestran los valores de pH de los cuatro puntos de muestreo y las cuatro etapas, donde podemos distinguir que los niveles de pH son menores de 7 que indica acidez del agua y que por lo tanto se considera que son drenaje ácido de mina y que se encuentran por debajo de lo permitido por los (LMP) de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales (ver anexo 06); por lo tanto, estas aguas de los efluentes de la mina La Rinconada no son aptas para ningún tipo de consumo.

4.1.3. Análisis del comportamiento de la conductividad eléctrica en los puntos de muestreo

El análisis del comportamiento de la conductividad eléctrica en los puntos de muestreo de los efluentes de la mina La Rinconada, en donde el Límite Máximo Permisible es de 2 500 a 5 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (ver anexo 06).

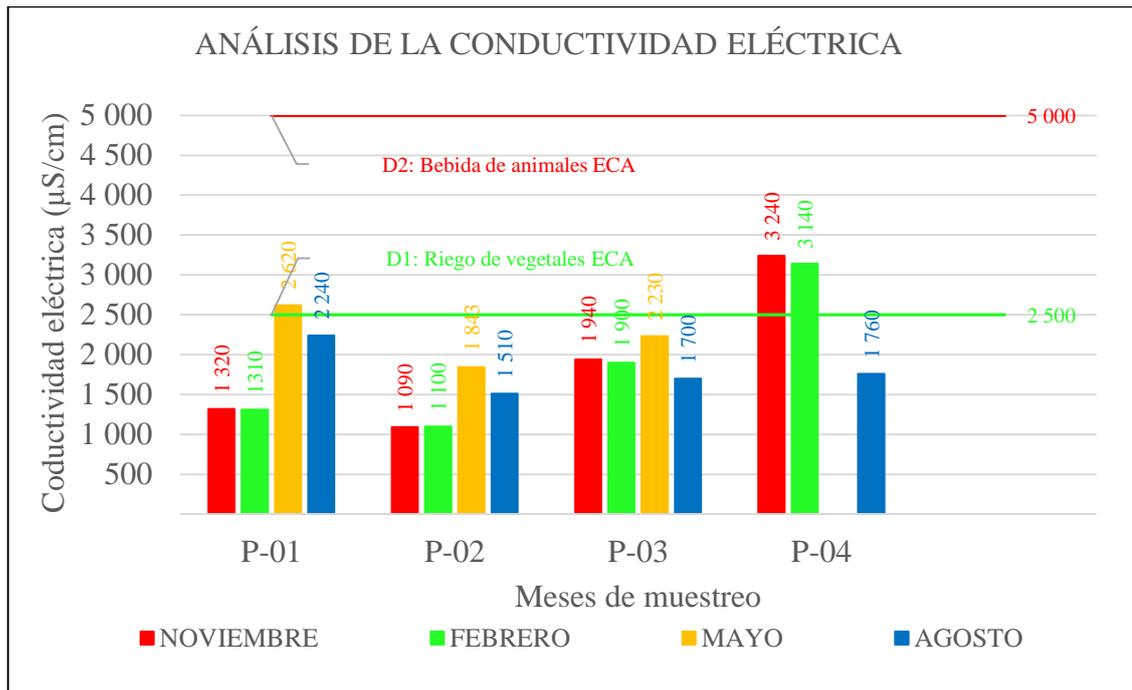


Figura 6: Análisis de la conductividad eléctrica en los puntos de muestreo.

De la figura 6 podemos observar los resultados de conductividad eléctrica en donde se puede apreciar que los análisis realizados en los efluentes de agua ácidas en la mina La Rinconada están dentro de los Límites Máximos Permisibles (5 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua categoría 3: bebida de animales y que por lo tanto en este parámetro si cumple con las exigencias del Decreto Supremo N. ° 004-2017-MINAM. (Ver anexo 06). Pero para la categoría 3: riego de vegetales no cumplen en los puntos de P-01 de 2 620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y P-04 de 3 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 3 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.1.4. Análisis del comportamiento de los sólidos totales disueltos en los puntos de muestreo

En el análisis de los sólidos totales disueltos de los efluentes de la mina La Rinconada según los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua tenemos como el Límite Máximo Permissible es de 1 500 mg/l, ver anexo 06.

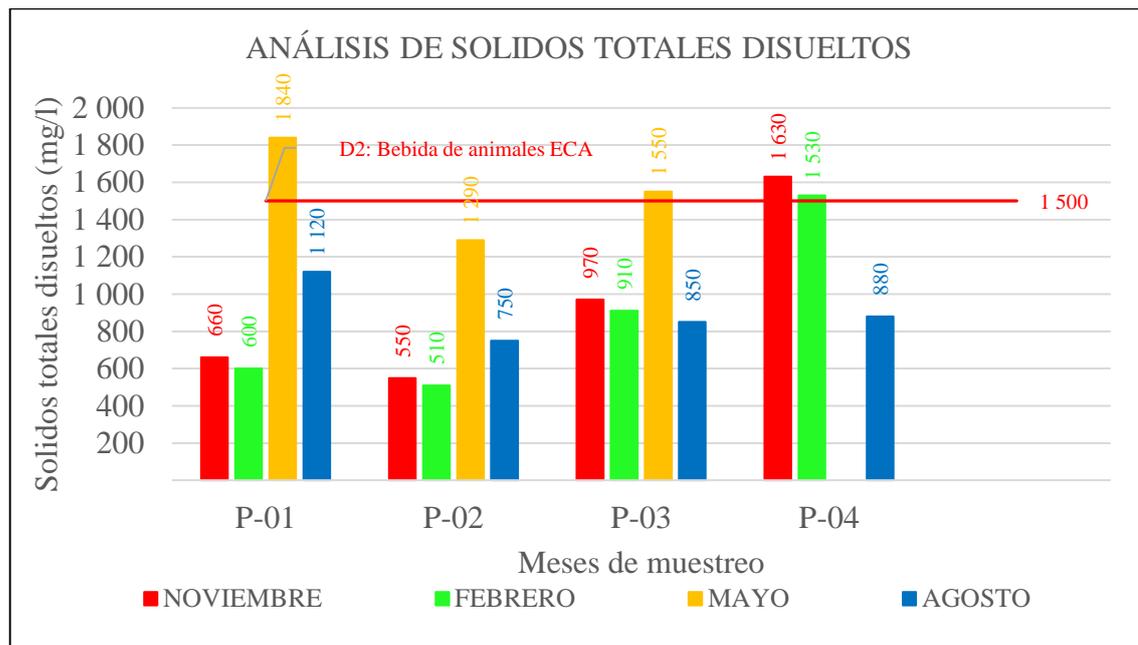


Figura 7: Análisis de los sólidos totales disueltos en los puntos de muestreo.

De acuerdo a la figura 7, los resultados obtenidos nos indican que en los puntos de muestreo P-01, P-03 y P-04, no se encuentran dentro de los Límites Máximos Permisibles, que por lo que se observa en el mes de mayo en los puntos P-01 y P-03 están fuera de los límites 1 840 mg/l y 1 550 mg/l respectivamente, y en el punto de P-04 del mes de noviembre está por encima de los Límites Máximos Permisibles que es de 1 630 mg/l y en el punto P-04 del mes de febrero tiene un valor de 1 530 mg/l que no cumplen con los Límites Máximos Permisibles (LMP) de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA) categoría 3; riego de vegetales y bebida de animales.

4.1.5. Análisis del comportamiento del caudal en los puntos de muestreo

El análisis de los caudales en los puntos de muestreo se realizó por el método del correntómetro (ver anexo 04), en cuatro diferentes puntos y en cuatro meses distintos en temporada de lluvias y de estiaje lo cual los resultados se muestran en la tabla 12.

Tabla 12: Caudales de los puntos de muestreo.

Etapas de muestreo	Fecha	Unidades	Caudal			
			P - 01	P - 02	P - 03	P - 04
Primera etapa de muestreo	11/11/2017	l/s	3,6	39,5	60,16	76,59
Segunda etapa de muestreo	12/02/2018	l/s	4,6	45,2	72,52	81,89
Tercera etapa de muestreo	07/05/2018	l/s	0,5	21,3	32,5	39,8
Cuarta etapa de muestreo	10/08/2018	l/s	1,06	20,23	35,68	42,3

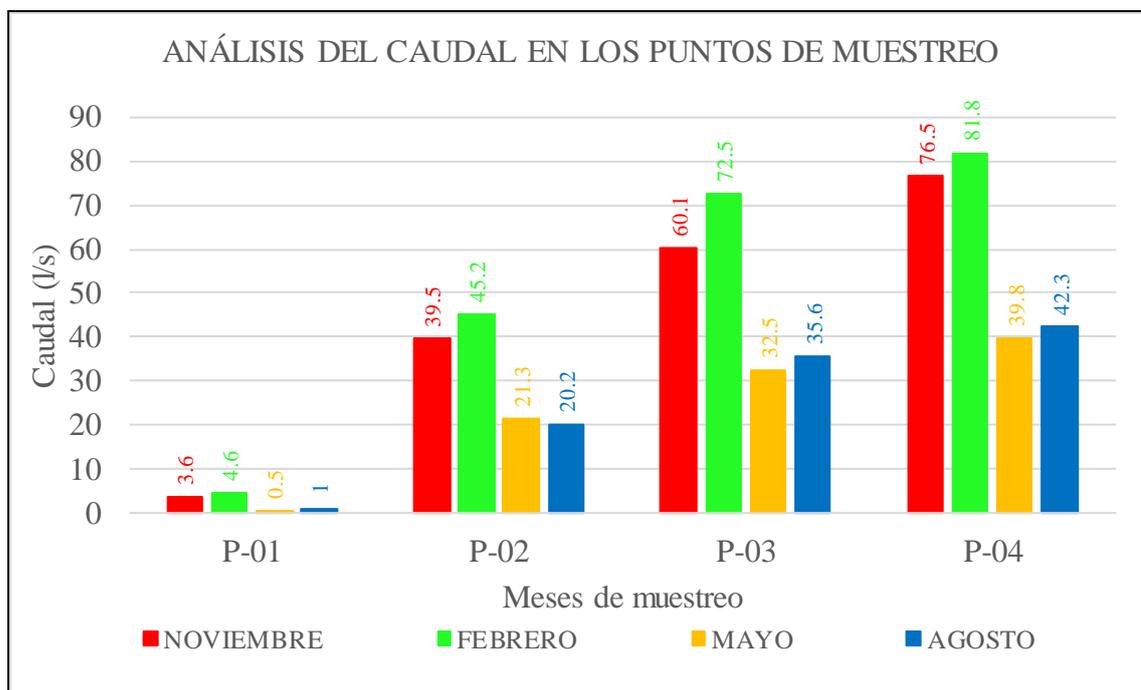


Figura 8: Análisis de los caudales en los puntos de muestreo.

De acuerdo a la figura 8 se muestran los resultados de los caudales de los cuatro puntos de muestreo y de las cuatro etapas, de donde se aprecian que los caudales en los diferentes puntos de muestreo presentan altas y bajas cantidades de caudal como podemos

observar que en el punto P-01, en el mes de noviembre el caudal es alto 4,6 l/s y el más bajo es en el mes de mayo 0,5 l/s en el P-03 y P-04 se observa que tienen el más elevado caudal de 81,89 l/s, 72,52 l/s y 76,59 l/s, 60,16 l/s que son en los meses de noviembre y febrero respectivamente y en la temporada de estiaje el caudal es de 0,5 l/s, 20,23 l/s y 32,5 l/s, 39,8 l/s respectivamente.

4.1.6. Resultados de los análisis de la concentración de metales pesados disueltos

Los resultados de los análisis de la concentración de los metales pesados disueltos en los efluentes de agua de la mina La Rinconada son el siguiente:

Tabla 13: Resultados del análisis de concentraciones en laboratorio de la muestra P-01.

Parámetros	Unidad de Medidas	D1: Riego de Vegetales			Muestra P-01		
		Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	D2: Bebida de animales	Valores (Lab.)	D1: Riego de Vegetales	D2: Bebida de animales
INORGÁNICOS							
Aluminio	mg/l	5	5	5	3,562	✓	✓
Arsénico	mg/l	0,1	0,2	0,2	0,071	✓	✓
Bario	mg/l	0,7	-	-	0,0448	✓	✓
Berilio	mg/l	0,1	0,1	0,1	-	-	-
Boro	mg/l	1	5	5	-	-	-
Cadmio	mg/l	0,01	0,05	0,05	0,003	✓	✓
Cobre	mg/l	0,2	0,5	0,5	0,082	✓	✓
Cobalto	mg/l	0,05	1	1	0,0242	✓	✓
Hierro	mg/l	5	-	-	-	-	-
Litio	mg/l	2,5	2,5	2,5	-	-	-
Magnesio	mg/l	-	250	250	-	-	-
Manganeso	mg/l	0,2	0,2	0,2	19,375	✗	✗
Mercurio	mg/l	0,001	0,01	0,01	-	-	-
Níquel	mg/l	0,2	1	1	0,477	✗	✓
Plomo	mg/l	0,05	0,05	0,05	0,04	✓	✓
Selenio	mg/l	0,02	0,05	0,05	0,011	✓	✓
Zinc	mg/l	2	24	24	3,95	✗	✓

Fuente: Resultados de los análisis del mega laboratorio de la UNA-PUNO.

De acuerdo a la tabla 13 a los análisis realizados en el Mega Laboratorio de la UNA-Puno (ver anexo 09), los resultados de la muestra P-01 nos dan como resultado los siguiente: Manganeso es de 19,375 mg/l, Níquel es de 0,477 mg/l y Zinc es de 3,95 mg/l. según los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ver anexo 06) lo cual estas aguas ácidas exceden los Límites Máximos Permisibles.

Tabla 14: Resultados del análisis de concentraciones en laboratorio de la muestra P-02.

Parámetros	Unidad de Medidas	D1: Riego de Vegetales		D2: Bebida de animales	Muestra P-02	
		Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido		Valores (Lab.)	D1: Riego de Vegetales
INORGÁNICOS						
Aluminio	mg/l	5	5	10,73	✗	✗
Arsénico	mg/l	0,1	0,2	0,361	✗	✗
Bario	mg/l	0,7	-	0,0288	✓	✓
Berilio	mg/l	0,1	0,1	-	-	-
Boro	mg/l	1	5	-	-	-
Cadmio	mg/l	0,01	0,05	0,005	✓	✓
Cobre	mg/l	0,2	0,5	0,147	✓	✓
Cobalto	mg/l	0,05	1	0,215	✗	✓
Hierro	mg/l	5	-	-	-	-
Litio	mg/l	2,5	2,5	-	-	-
Magnesio	mg/l	-	250	-	-	-
Manganeso	mg/l	0,2	0,2	4,318	✗	✗
Mercurio	mg/l	0,001	0,01	-	-	-
Níquel	mg/l	0,2	1	0,555	✗	✓
Plomo	mg/l	0,05	0,05	0,009	✓	✓
Selenio	mg/l	0,02	0,05	0,005	✓	✓
Zinc	mg/l	2	24	1,054	✓	✓

Fuente: Resultados de los análisis del mega laboratorio de la UNA-PUNO.

De acuerdo a la tabla 14, los resultados del análisis de las concentraciones de metales pesados disueltos, realizados en el Mega Laboratorio de la UNA-Puno (ver anexo 09), los resultados de la muestra P-02 se obtuvieron los siguientes datos como: Aluminio es de 10,73 mg/l, Arsénico es de 0,361 mg/l, Cobalto es de 0,215 mg/l, Manganeso es de 4,318 mg/l y Níquel es de 0,555 mg/l. según los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ver anexo 06) categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales, estas aguas ácidas exceden los Límites Máximos Permisibles y que por lo no son aptas para ningún tipo de consumo.

Tabla 15: Resultados del análisis de concentraciones en el laboratorio de la muestra P-03.

Parámetros	Unidad de Medidas	D1: Riego de Vegetales			Muestra P-03		
		Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	D2: Bebida de animales	Valores (Lab.)	D1: Riego de Vegetales	D2: Bebida de animales
INORGÁNICOS							
Aluminio	mg/l	5	5	5	64,819	✗	✗
Arsénico	mg/l	0,1	0,2	0,2	0,473	✗	✗
Bario	mg/l	0,7	-	-	0,085	✓	✓
Berilio	mg/l	0,1	0,1	0,1	-	-	-
Boro	mg/l	1	5	5	-	-	-
Cadmio	mg/l	0,01	0,05	0,05	0,027	✗	✓
Cobre	mg/l	0,2	0,5	0,5	0,407	✗	✓
Cobalto	mg/l	0,05	1	1	1,063	✗	✗
Hierro	mg/l	5	-	-	-	-	-
Litio	mg/l	2,5	2,5	2,5	-	-	-
Magnesio	mg/l	-	250	250	-	-	-
Manganeso	mg/l	0,2	0,2	0,2	12,172	✗	✗
Mercurio	mg/l	0,001	0,01	0,01	-	-	-
Níquel	mg/l	0,2	1	1	2,644	✗	✗
Plomo	mg/l	0,05	0,05	0,05	0,095	✗	✗
Selenio	mg/l	0,02	0,05	0,05	-0,006	✓	✓
Zinc	mg/l	2	24	24	6,13	✗	✓

Fuente: Resultados del análisis de los mega laboratorio de la UNA-PUNO.

De acuerdo a la tabla 15, de los análisis realizados en el Mega Laboratorio de la UNA-Puno (ver anexo 09), los resultados de la muestra P-03 nos dan como resultado los siguiente: Aluminio es de 64,81 mg/l, Arsénico es de 0,473 mg/l, Cadmio es de 0,027 mg/l, Cobre es de 0,407 mg/l, Cobalto es de 1,063 mg/l, Manganeso es de 12,172 mg/l, Níquel es de 2,644 mg/l, Plomo es de 0,095 mg/l y Zinc es de 6,13 mg/l. según los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales (ver anexo 06), estas aguas exceden los Límites Máximos Permisibles y que no son aptas para ningún tipo de consumos por lo tanto estos efluentes de aguas ácidas de la mina La Rinconada son una fuente de contaminación para el medio ambiente.

Tabla 16: Resultados de análisis de concentraciones en el laboratorio de la muestra P-04.

Parámetros	Unidad de Medidas	D1: Riego de Vegetales		D2: Bebida de animales	Muestra P-04	
		Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido		Valores (Lab.)	D1: Riego de Vegetales
INORGÁNICOS						
Aluminio	mg/l	5	5	>16,00	X	X
Arsénico	mg/l	0,1	0,2	-	-	-
Bario	mg/l	0,7	-	-	-	-
Berilio	mg/l	0,1	0,1	-	-	-
Boro	mg/l	1	5	-	-	-
Cadmio	mg/l	0,01	0,05	-	-	-
Cobre	mg/l	0,2	0,5	0,21	X	✓
Cobalto	mg/l	0,05	1	-	-	-
Hierro	mg/l	5	-	4,55	✓	X
Litio	mg/l	2,5	2,5	-	-	-
Magnesio	mg/l	-	250	-	-	-
Manganeso	mg/l	0,2	0,2	9	X	X
Mercurio	mg/l	0,001	0,01	-	-	-
Níquel	mg/l	0,2	1	10	X	X
Plomo	mg/l	0,05	0,05	-	-	-
Selenio	mg/l	0,02	0,05	-	-	-
Zinc	mg/l	2	24	4,5	X	✓

Fuente: Resultados de los análisis del laboratorio de la FIM.

De acuerdo a la tabla 16, de los análisis de concentraciones de metales pesados disueltos realizados en el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la FIM - UNA-Puno, (ver anexo 11), los resultados de la muestra P-04 nos dan como resultado los siguientes: Hierro es de 3,55 mg/l, Cobre es de 0,31 mg/l, Aluminio es de >16 mg/l, Zinc es de 4.5 mg/l, , Níquel es de 10 mg/l y Manganeso es de 9 mg/l. según los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ver anexo 06), estos metales como el Hierro, Cobre, Aluminio, Zinc, Níquel y Manganeso no cumplen con lo estipulado del D.S. N° 004-2017-MINAM, y que estas aguas de los efluentes de la mina La Rinconada, exceden en la cantidad permitido por los Límites Máximos Permisibles.

4.1.7. Análisis de las concentraciones de los metales pesados disueltos de las muestras de aguas ácidas

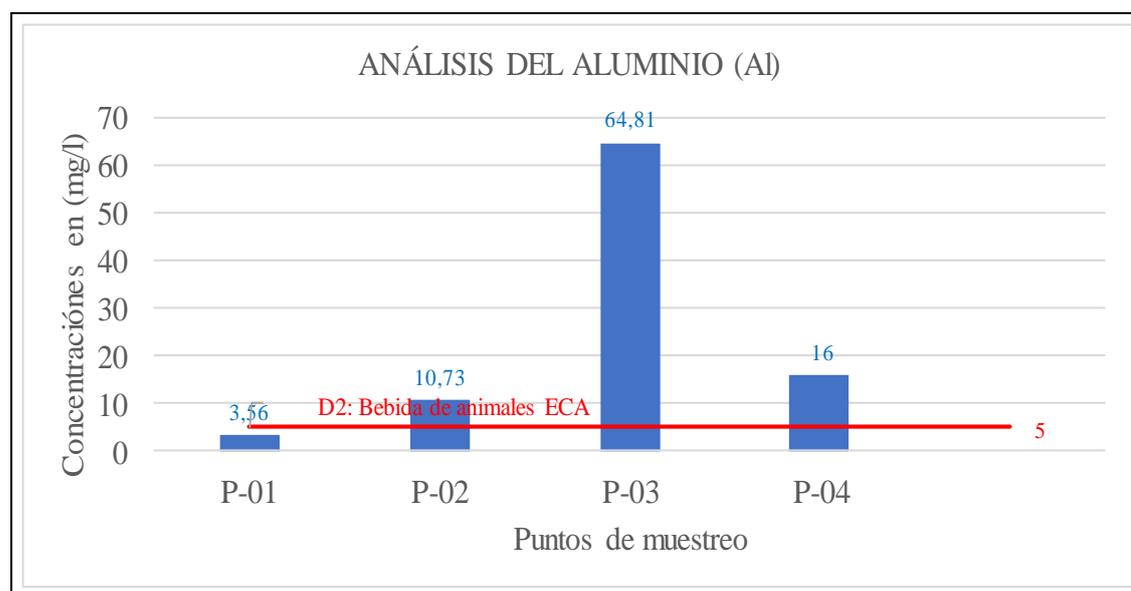


Figura 9: Análisis de las concentraciones de Aluminio.

De acuerdo a la figura 9, se observa que en los puntos de P-02, P-03 y P-04 sobrepasan los Límites Máximos Permisibles que tienen valores de 10,73 mg/l, 64,81 mg/l y >16 mg/l respectivamente y que no están dentro de los Límites Máximos Permisibles exigidos por los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua categoría 3; riego de vegetales y bebida de animales.

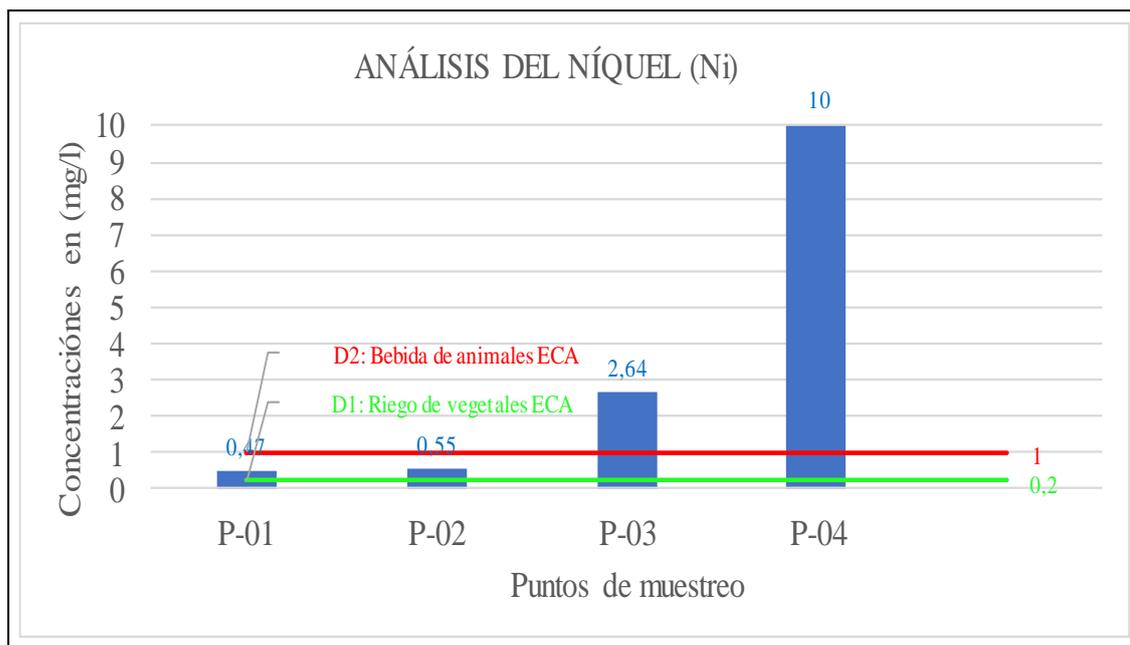


Figura 10: Análisis de las concentraciones de Níquel.

En la figura 10 se muestra los valores obtenidos de níquel, donde se aprecia que en los puntos de muestreo: P-03 y P-04 es de 2,64 mg/l y 10 mg/l respectivamente, estos valores sobre pasan los Límites Máximos Permisibles de Níquel considerados en los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ver anexo 06) categoría 3; Riego de vegetales y bebida de animales, y en los puntos de muestreo P-01 con 0,47 mg/l y P-02 es de 0,55 mg/l exceden en los Límites Máximos Permisibles de (ECA) categoría 3.

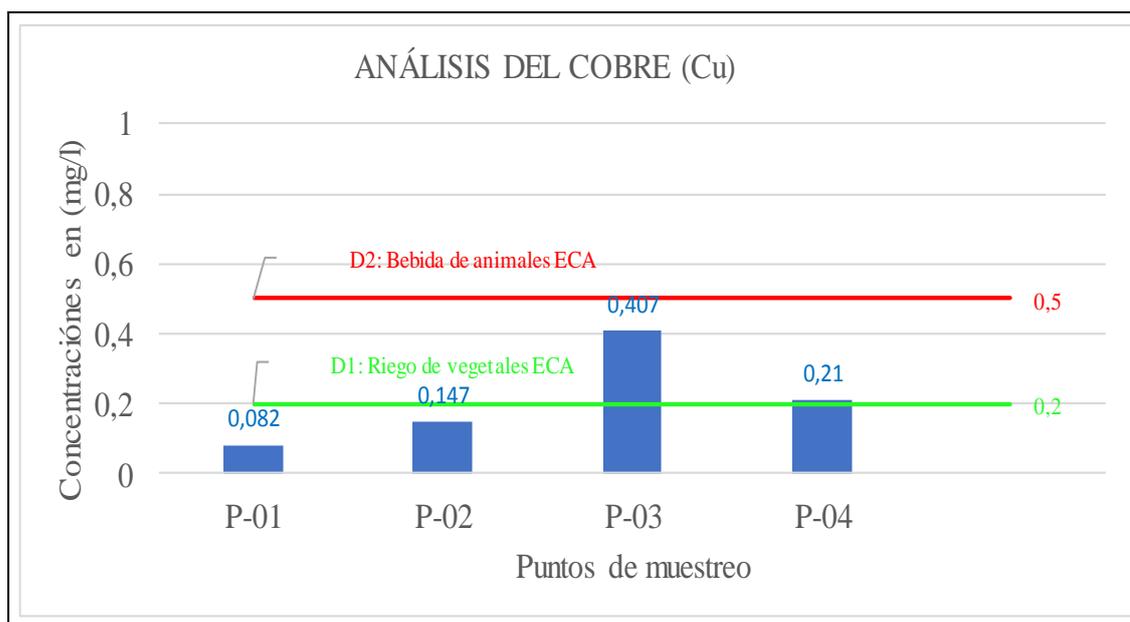


Figura 11: Análisis de las concentraciones de Cobre.

De acuerdo a la figura 11, de los análisis realizados en el Mega Laboratorio de la UNA-PUNO y el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de Minas (FIM) se obtuvieron los siguientes resultados en el punto P-03 la concentración es de 0,407 mg/l de Cobre, y en punto P-04 el contenido de Cobre es de 0,21 mg/l lo cual en estos dos puntos sobre pasan los Límites Máximos Permisibles de Cobre considerados en los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ver anexo 06) categoría 3; riego de vegetales.

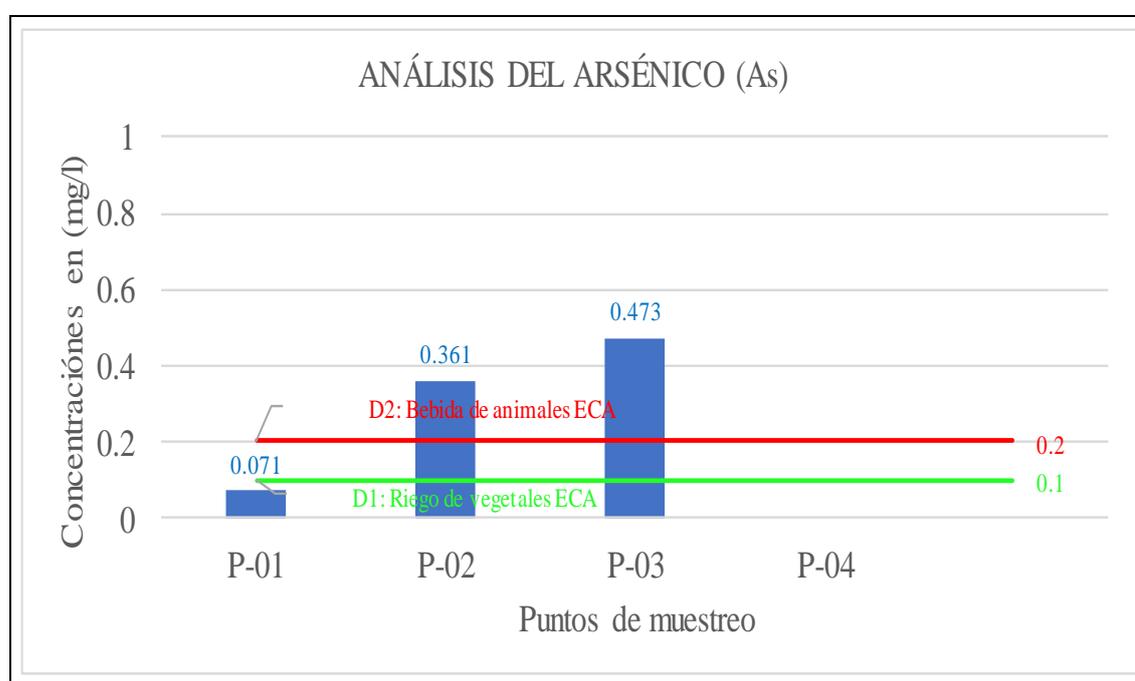


Figura 12: Análisis de las concentraciones de Arsénico.

En la figura 12 se observa los valores de Arsénico en el punto P-02 y P-03 es de 0,361 mg/l y 0,473 mg/l respectivamente donde no están dentro de los Límites Máximos Permisibles de arsénico considerados en los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ver anexo 06) categoría 3; riego de vegetales y bebida de animales. Y estos análisis se realizaron en el Mega Laboratorio de la UNA-PUNO y el Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la Facultad de Ingeniería de Minas (FIM)

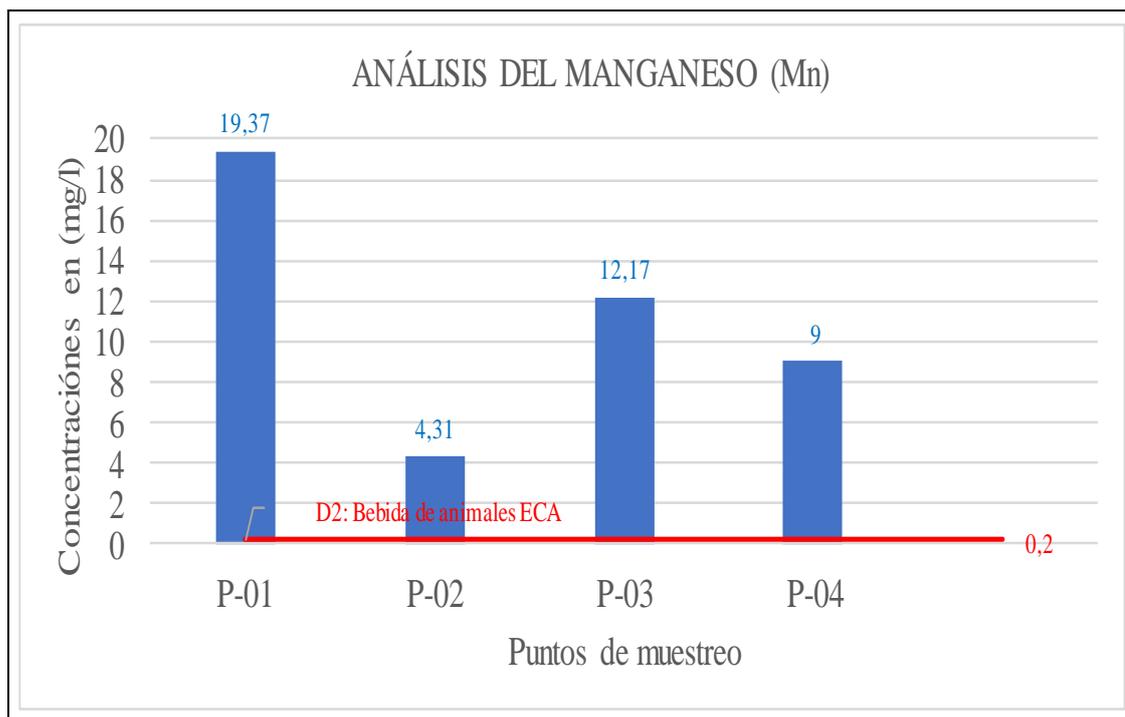


Figura 13: Análisis de las concentraciones de Manganeso.

De acuerdo a la figura 13 se observa los valores de manganeso que en los cuatro puntos de muestreo se logra observar que son de 19,37 mg/l, 4,31 mg/l, 12,17 mg/l y 9 mg/l respectivamente donde no están dentro de los Límites Máximos Permisibles.

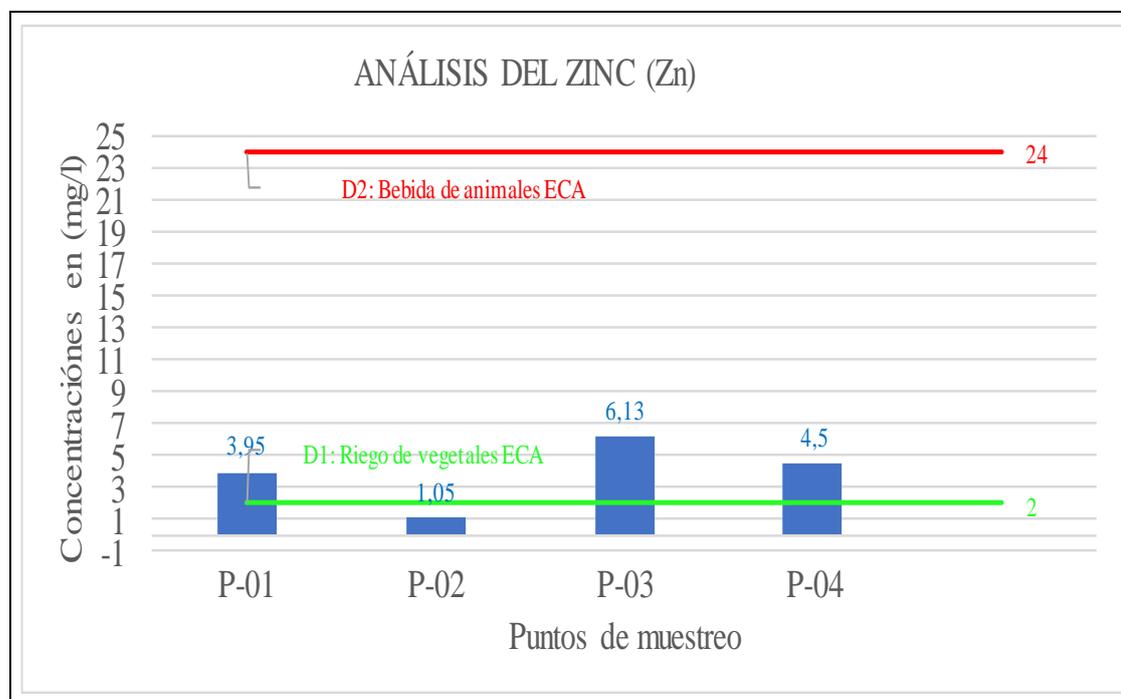


Figura 14: Análisis de las concentraciones de Zinc.

De acuerdo a la figura 14 se puede observar que en los puntos P-01, P-03 y P-04 la concentración de Zinc es de 3,95 mg/l, 6,13 mg/l y 3,95 mg/l, lo cual sobre pasa los Límites Máximos Permisibles de Zinc considerados en los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ver anexo 06) categoría 3; riego de vegetales.

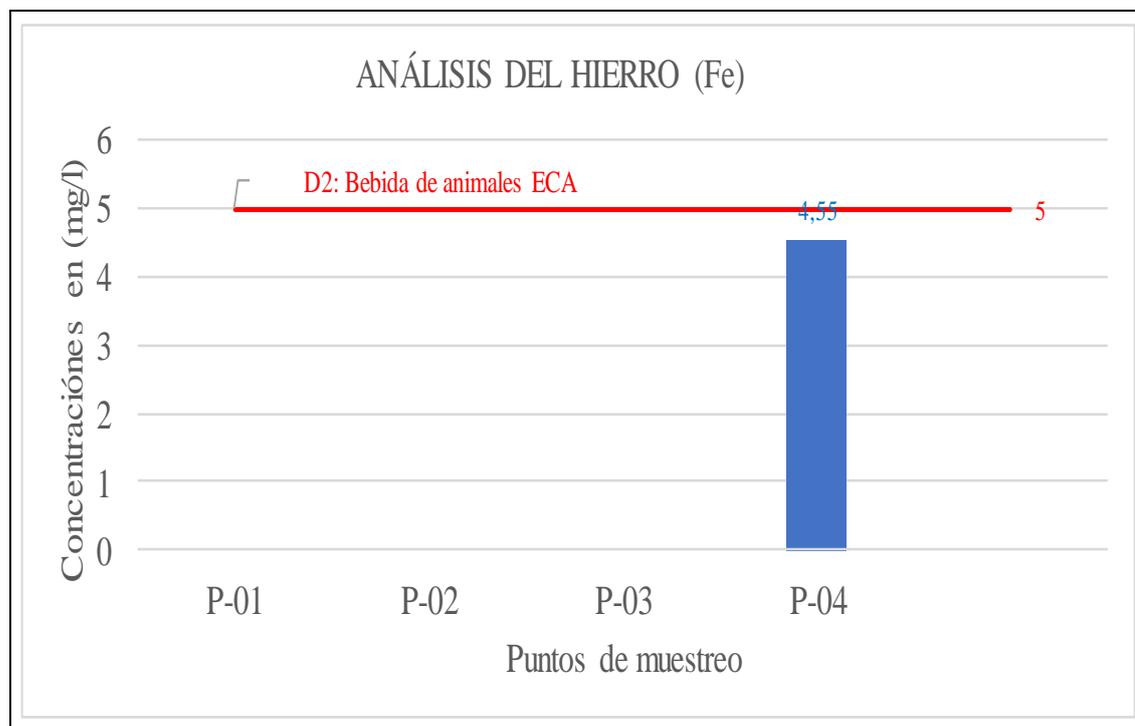


Figura 15: Análisis de las concentraciones de Hierro.

De acuerdo a la figura 15 se puede observar que en punto P-04 la concentración es de 4,55 mg/l de Hierro, lo cual está dentro de los Límites Máximos Permisibles de Hierro considerados en los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ver anexo 06) categoría 3; Evaluación de la técnica de tratamiento de los efluentes de aguas ácidas

4.1.8. Pruebas estáticas de neutralización - precipitación

Con los resultados obtenidos del laboratorio de los análisis físico-químicos realizados se pudo observar que todos los puntos de muestreo contienen concentraciones de metales pesados disueltos, que no cumplen con los Estándares de Calidad Ambiental

para Agua y los LMP. Por lo que se realiza los ensayos de tratamiento por neutralización – precipitación de la cuarta etapa y muestra P-04.

Utilizando lechada de cal como agente neutralizador

Tabla 17: Resultados de la primera prueba estáticas de Neutralización – precipitación con 0,1 g de CaO.

T (s)	Ensayo N.º 01	Ensayo N.º 02
	CaO – 0,1 g	CaO – 0,1 g
	pH	pH
0	3,39	3,42
30	4,51	4,52
60	5,2	5,22
90	5,4	5,43
120	5,54	5,58
150	5,62	5,68
180	5,68	5,75
210	5,77	5,85
240	5,81	5,88
270	5,85	5,93
300	5,86	5,95
330	5,89	5,98
360	5,91	6
390	5,93	6,03
420	5,96	6,07
450	6,02	6,11
480	6,06	6,14
510	6,1	6,18
540	6,15	6,25
570	6,19	6,26
600	6,2	6,27

De la tabla 17, se puede observar que la neutralización llega a un valor de pH con CaO de 0,1 g a 500 ml de agua ácida tiende a 6,2 a 6,7 de donde podemos deducir que es necesario aumentar la cantidad de cal para que el pH suba más y precipiten los metales pesados, dentro de un lapso de tiempo de 10 minutos.

Tabla 18: Resultados de la segunda prueba estáticas de neutralización - precipitación con 0,15g de CaO.

T (s)	Ensayo N.º 03	Ensayo N.º 04
	CaO – 0,15 g	CaO – 0,15 g
	pH	pH
0	3,4	3,38
30	5,21	5,12
60	6,4	6,28
90	7,08	7,03
120	7,36	7,3
150	7,78	7,73
180	8,1	8,04
210	8,2	8,15
240	8,34	8,29
270	8,45	8,42
300	8,51	8,48
330	8,56	8,53
360	8,6	8,57
390	8,64	8,62
420	8,67	8,65
450	8,72	8,68
480	8,74	8,7
510	8,88	8,83
540	8,91	8,87
570	8,94	8,9
600	8,95	8,91

De la tabla 18, de los análisis realizados de neutralización – precipitación directa observamos que con la cantidad de 0,15 g de CaO a 500 ml de agua ácida llega a neutralizar hasta lograr un valor de pH de 8,91 a 8,95 en un tiempo aproximado de 05 a 10 minutos, que por los resultados con esta cantidad de CaO precipitan la mayoría de los metales pesados.

Tabla 19: Resultados de la tercera prueba estáticas de neutralización -Precipitación con 0,2g de CaO.

T (s)	Ensayo N.º 05	Ensayo N.º 06
	CaO – 0,2 g	CaO – 0,2 g
	pH	pH
0	3,36	3,42
30	5,55	5,6
60	8,93	8,62
90	10,19	10,1
120	10,33	10,31
150	10,41	10,43
180	10,45	10,48
210	10,47	10,52
240	10,5	10,55
270	10,51	10,56
300	10,55	10,66
330	10,56	10,67
360	10,57	10,68
390	10,59	10,68
420	10,63	10,71
450	10,65	10,75
480	10,68	10,79
510	10,71	10,81
540	10,73	10,85
570	10,74	10,86
600	10,75	10,87

Según la tabla 19 se observa que con 0,2 g de CaO a 500 ml de agua ácida llega a neutralizar un pH hasta obtener un valor de 10,75 a 10,87, en un tiempo de 10 minutos, y que por lo tanto para un pH de 8 a 10,1 se necesitan de 60 a 90 segundos de tiempo aproximadamente, en donde precipitan todos los metales pesados disueltos investigados como Hierro, Cobre, Aluminio, Zinc, Níquel y Manganese y así cumpliendo con lo exigido por los Límites Máximos Permisible (LMP). de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA) Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.

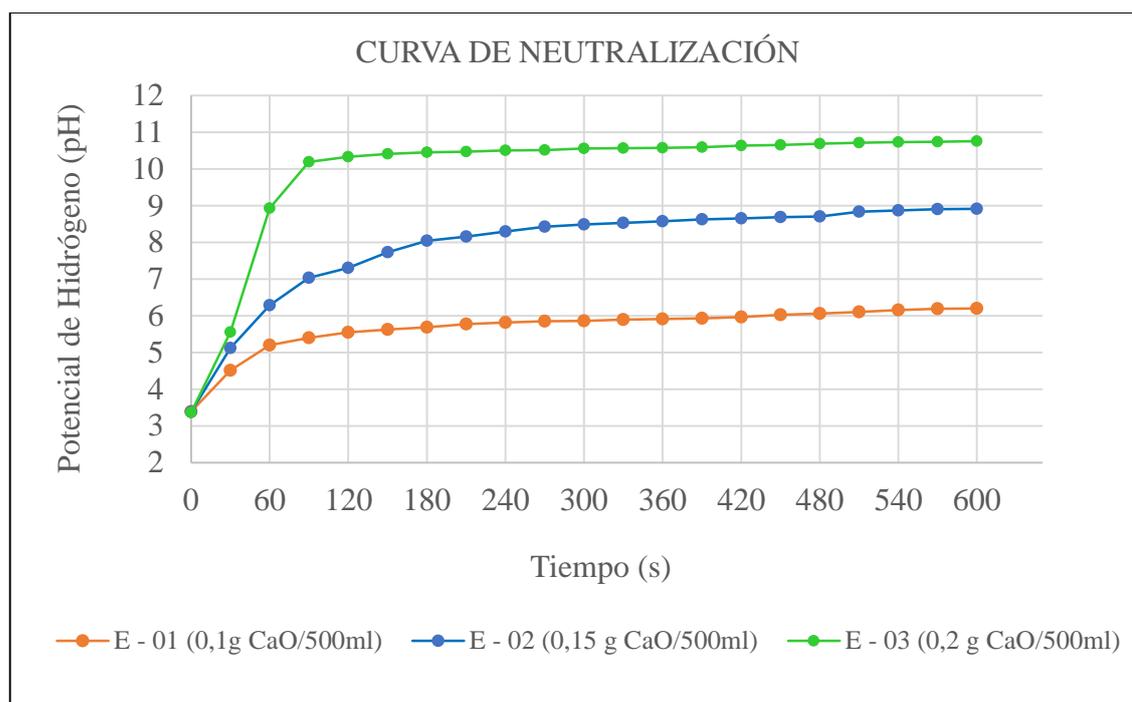


Figura 16: Curvas de neutralización.

De acuerdo a la figura 16, se obtiene la dosis óptima para la neutralización y precipitación de los metales pesados que es de 0,2 mg/500 ml de agua ácida por lo que se deduce que necesitamos 0,4 g/l de cal (hidróxido de calcio) para obtener un pH de 10,1 para la precipitación y decantación de los metales pesados disueltos y que así cumplen con los Límites Máximos Permisibles y los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ver anexo 06) categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales.

4.1.9. Análisis de los parámetros físicos y químicos del agua ácida tratada

Según la tabla 20, los resultados de los análisis de la conductividad eléctrica de las aguas ácidas se redujeron de 2 240 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 1 430 $\mu\text{s}/\text{cm}$, por lo que estos resultados están dentro de los Límites Máximos Permisibles y los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA) categoría 3; riego de vegetales y bebida de animales.

De la tabla 20, se puede apreciar que los resultados obtenidos en las pruebas de neutralización con cal y que los sólidos totales disueltos se redujeron de 1 120 mg/l a 730

mg/l por lo que estos resultados se encuentran dentro de lo exigido por los Límites Máximos Permisibles

Tabla 20: Resultados de los análisis de los parámetros físico - químico de las aguas ácidas tratadas.

Parámetros	Muestra de agua ácida			
	Unidades	Muestra de agua no tratada	Muestra de agua tratada	
Potencial de hidrogeno	pH	3,38	6,5	8,5
Conductividad eléctrica	µs/cm	2 240	1 530	1 430
Solidos totales disueltos	mg/l	1 120	880	730
Turbidez	NTU	102	11,42	9,95
Temperatura	Celsius	11,5	12	12,1

De acuerdo a la tabla 20, observamos que los resultados obtenidos de los ensayos de neutralización con cal se obtuvieron resultados aceptables de la turbidez que se redujo de 102 NTU a 9,95 NTU por lo que estos resultados se encuentran dentro de los Límites Máximos Permisibles exigidos por los Estándares de Calidad Ambiental para Agua.

4.1.10. Análisis de las concentraciones de metales pesados en las aguas ácidas ya tratadas

Los dos tipos de ensayo por neutralización realizados a la muestra P-04 de la última etapa de muestreo a los efluentes de la mina La Rinconada, consistió en realizar el tratamiento activo de pruebas de neutralización - precipitación directa y secuencial con cal (hidróxido de calcio), se obtuvo resultados aceptables en la reducción de los metales como: Hierro, Cobre, Aluminio, Níquel, Zinc y Manganeso según se muestra en la tabla 21 y 22.

Tabla 21: Resultados del análisis de las concentraciones de metales pesados disueltos tratadas por neutralización directa.

Parámetros	Unidades	Muestras	
		N.º 01 agua no tratada	N.º 02 agua tratada 0,15 g - CaO
Potencial de Hidrógeno	pH	3,38	8,50
Hierro (Fe)	mg/l	4,55	0,10
Cobre (Cu)	mg/l	0,21	0,01
Aluminio (Al)	mg/l	>16	0,1
Zinc (Zn)	mg/l	4,5	0,59
Níquel (Ni)	mg/l	10	8,75
Manganeso (Mn)	mg/l	9	0,45

Fuente: Resultados de los análisis del laboratorio de la FIM.

La tabla 21, nos muestra los resultados de las pruebas de neutralización directa en donde se obtuvo los siguientes resultados en un inicio con un pH de 3,8: Hierro es 4,55 mg/l, Cobre de 0,21 mg/l, Aluminio de >16 mg/l, Zinc de 4,5 mg/l, Níquel tuvo 10 mg/l y a 9 mg/l de Manganeso. Y en un pH de 8,5 el Hierro disminuyo a 0,10 mg/l, Cobre en 0,01 mg/l, Aluminio en 0,1 mg/l, Zinc hasta 0,59 mg/l, Níquel disminuyo a 8,75 mg/l y a 0,45 mg/l de Manganeso.

Tabla 22: Resultados del análisis de las concentraciones de metales pesados disueltos tratadas por neutralización secuencial.

Parámetros	Unidades	Muestras de agua ácida						
		Muestra no tratada N.º 01	Muestra tratada N.º 02	Muestra tratada N.º 03	Muestra tratada N.º 04	Muestra tratada N.º 05	Muestra tratada N.º 06	Muestra tratada N.º 07
Potencial de Hidrógeno	pH	3,38	4,4	5,25	6,5	8,5	10,1	11,2
Hierro (Fe)	mg/l	4,55	4,01	3,79	0,28	0,1	0,09	0
Cobre (Cu)	mg/l	0,21	0,2	0,16	0,04	0	0	0
Aluminio (Al)	mg/l	>16	16	0,2	0,01	0,1	0,27	-
Zinc (Zn)	mg/l	4,5	4,5	4,2	0,84	0,59	0,15	0,12
Níquel (Ni)	mg/l	10	9,91	9,92	9,89	8,97	0,07	0,05
Manganeso (Mn)	mg/l	9	9	7,7	3,38	0,4	0,1	0,1

Fuente: Resultados de los análisis del laboratorio de la FIM.

De la tabla 22 muestra que de acuerdo al tratamiento activo químico convencional de neutralización – precipitación secuencial con cal observamos que los resultados indican que se ha logrado remover la carga metálica más bajos que los Límites Máximos Permisibles de los Estándares Nacional de Calidad Ambiental para Agua categoría 3; riego de vegetales y bebida de animales.

4.1.11. Análisis de la solubilidad de los metales pesados disueltos

La precipitación de los metales pesados disueltos se da en intervalos de pH determinado que dependen de los rangos de movilización de cada metal, en la figura 17 se presentan las gráficas realizadas de las pruebas estáticas de neutralización – precipitación secuencial con cal en donde la solubilidad de los hidróxidos metálicos es en función del pH donde el punto más bajo de cada curva representa el punto óptimo de remoción de cada metal.

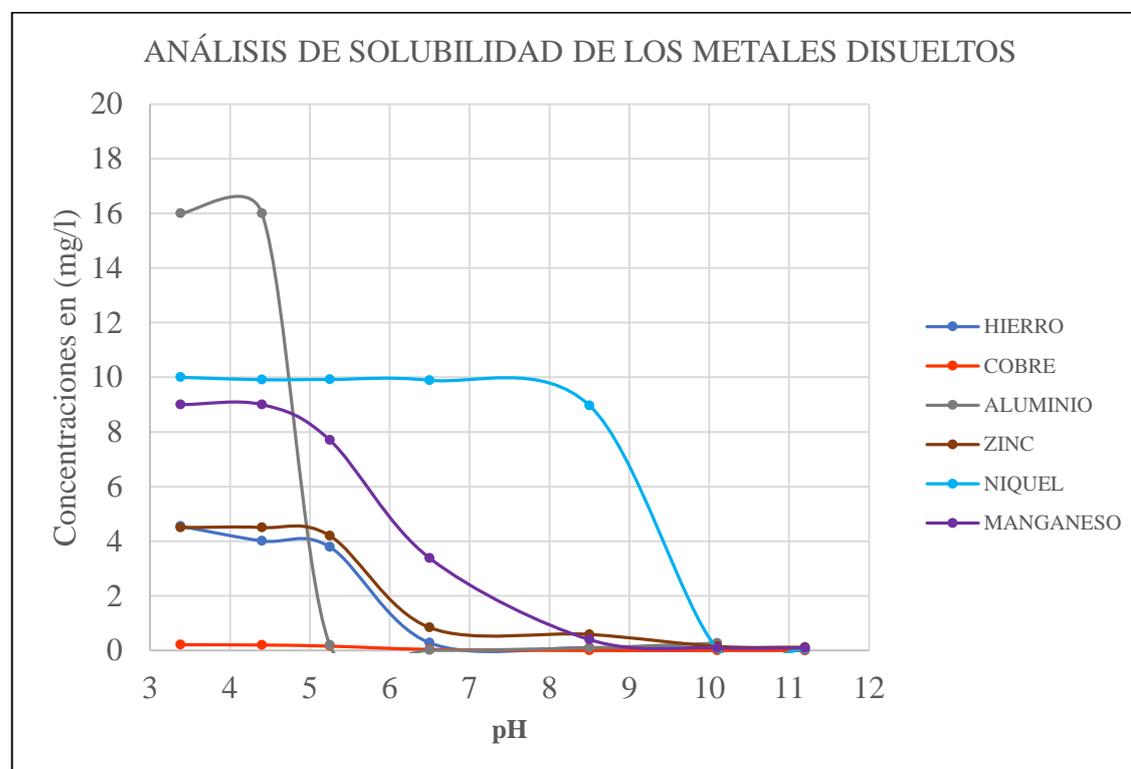


Figura 17: Solubilidad de los hidróxidos de metales en función del pH.

Estos resultados de las curvas de la solubilidad de los hidróxidos metálicos presentes fueron realizados en base a los ensayos y condiciones determinados, por lo que para cada curva experimental se observa un rango de desplazamiento para cada metal y un diferente rango de pH

4.1.12. Análisis de los metales del punto P-04 de muestreo de los efluentes de agua de mina con tratamiento activo químico neutralización – precipitación con cal

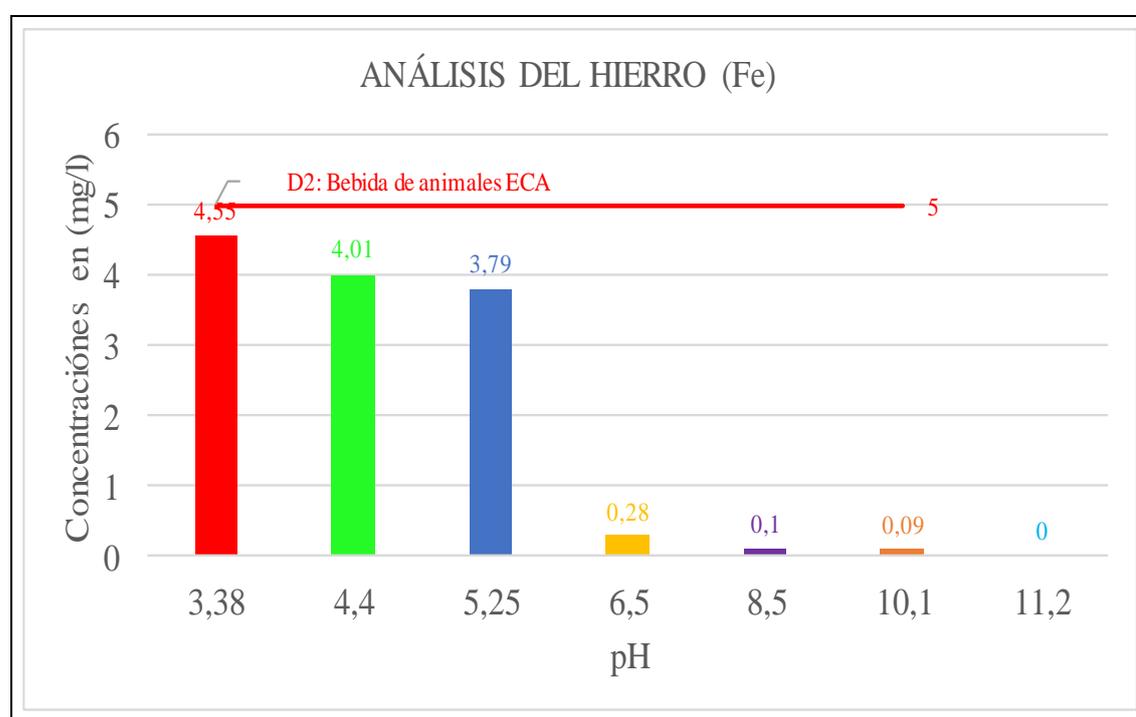


Figura 18: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Hierro.

En la figura 18, se puede observar que el Hierro bajo de 4,55 mg/l a 0,28 mg/l que es un 93,84 % en un pH de 6,5 donde indica estos valores de Hierro están dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA) Cat. 3. Riego de vegetales y bebida de animales.

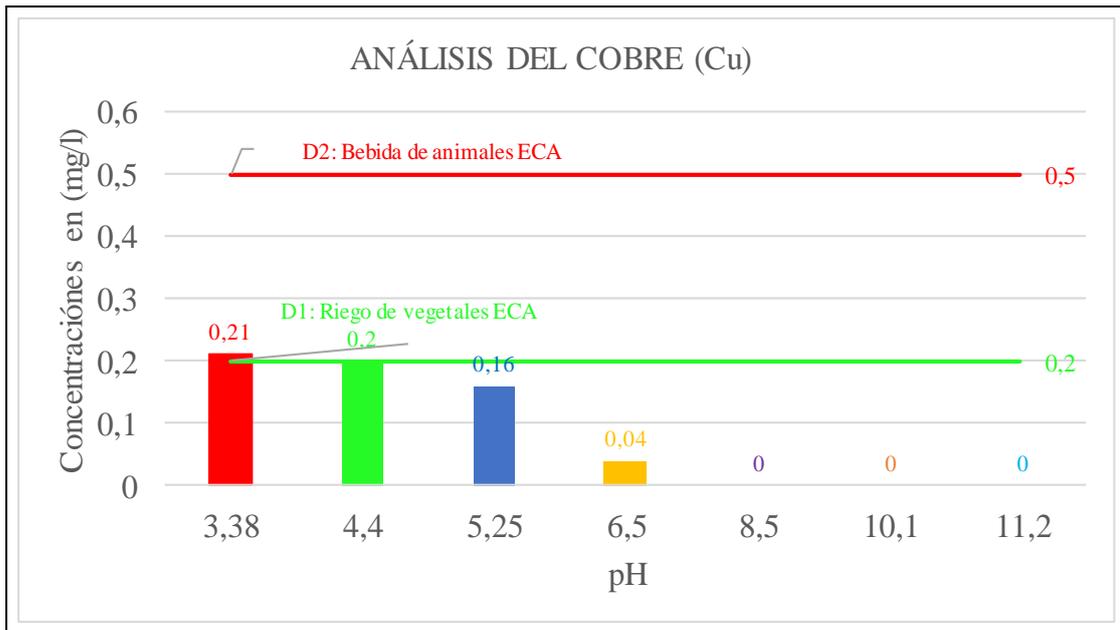


Figura 19: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Cobre.

Según la figura 19 se logra observar que con la técnica de tratamiento activo por neutralización - precipitación con cal se obtuvo resultados aceptables del Cobre que disminuyó de 0,21 mg/l a 0,04 mg/l que es en un 80,95 % en un pH de 6,5 y a un pH de 8,5 precipitó al 100 %, donde nos indican que estos valores están dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP), de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ECA) categoría 3; riego de vegetales y bebida de animales.

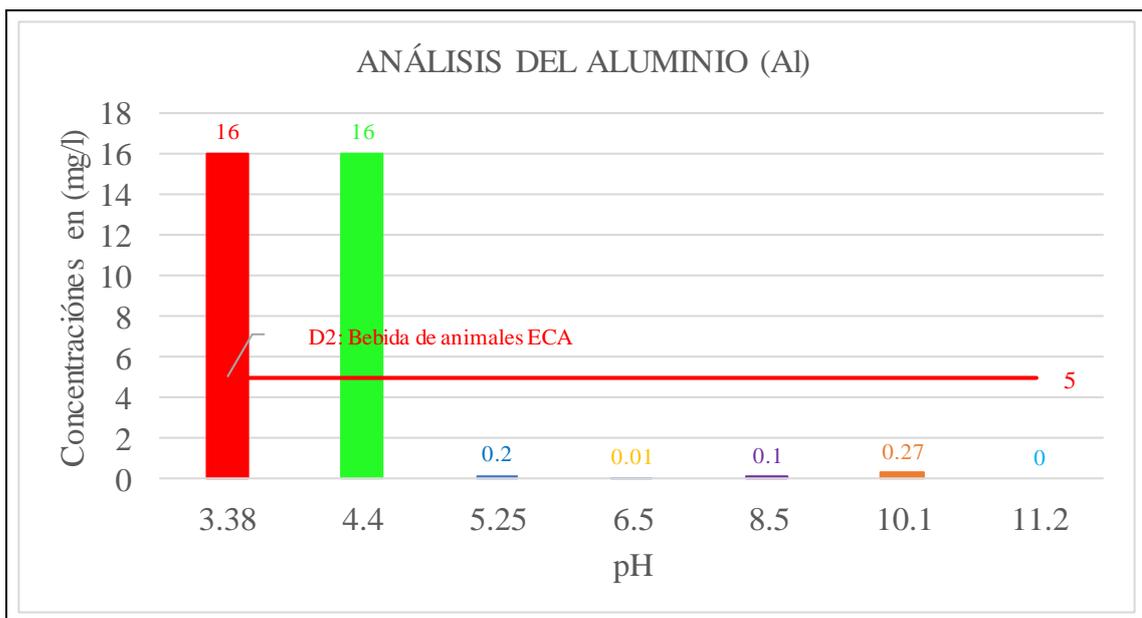


Figura 20: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Aluminio.

En la figura 20 se muestra que de acuerdo al tratamiento activo químico de neutralización secuencial con cal realizado a la muestra de agua ácida se puede distinguir que el Aluminio no precipito en nada entre los pH de 4,4 y a un pH de 5,25 bajo al 98,75 %, en un pH de 6,5 se redujo en un 99,93 % y a pH de 8,5 disminuyo en un 99,37 %, donde indica que las concentraciones del metal de Aluminio están dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP) de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua ECA Categoría 3; riego de vegetales y bebida de animales.

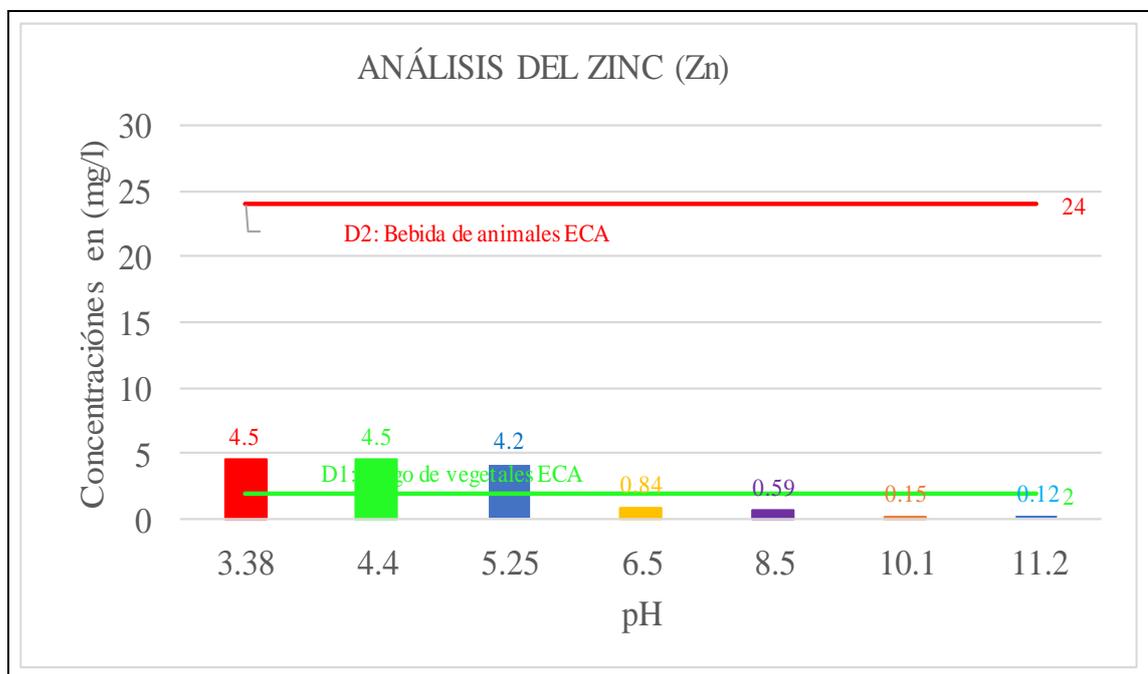


Figura 21: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Zinc.

Según la figura 21 se aprecia los resultados del zinc que se logró en reducir de 4,5 mg/l a 0,59 mg/l, donde el porcentaje es de 86,88 % en un pH de 8,5, y a un pH de 10,1 se obtuvo un 96,66 %, donde indica que estos valores de Zinc están dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP), de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua categoría 3; riego de vegetales y bebida de animales.

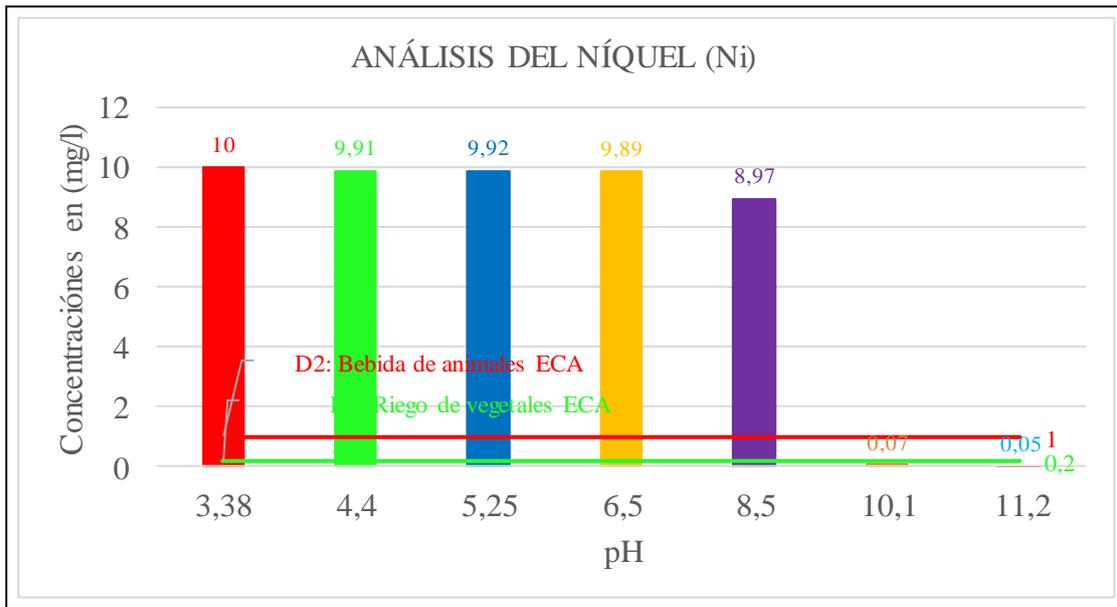


Figura 22: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Níquel.

De acuerdo a la figura 22 se puede apreciar que el Níquel se redujo de 10 mg/l a 8,97 mg/l donde es el 10,3 % en un pH de 8,5 y a un pH de 10,1 se obtuvo una considerable remoción de 8,97 mg/l a 0,07 mg/l que representa un 99,3 %, donde indica que estos valores de Níquel están dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP) de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua categoría 3; riego de vegetales y bebida de animales. Y que con estos resultados estas aguas ácidas ya son aptas para su vertimiento.

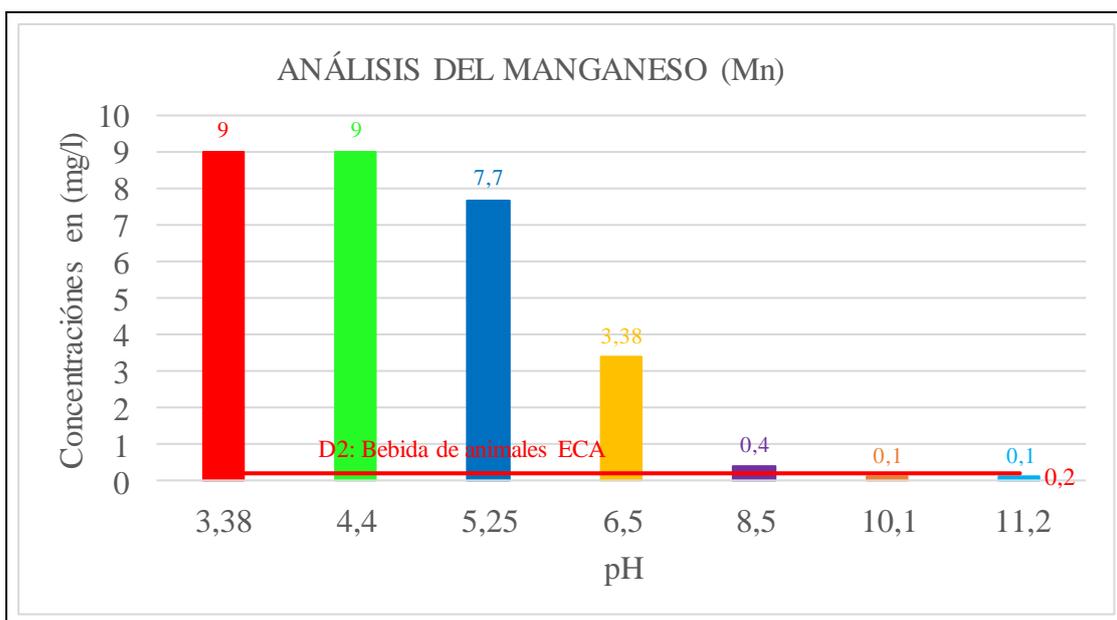


Figura 23: Análisis de las pruebas de concentraciones del metal Manganeseo.

Según la figura 23 se muestra que de acuerdo al tratamiento activo químico de neutralización con cal realizado a las muestras de agua se puede observar que el Manganeseo se redujo de 9 mg/l a 3,38 mg/l que es de 62,44 % en un pH de 6,5 luego a un pH de 8,5 disminuyo hasta 0,4 mg/l que es un 95,55 % y a un pH de 11,2 precipito hasta 0,1 mg/l donde representa un 98,8 % de remoción, donde estos valores nos indican que están dentro de los límites máximos permisibles (LMP), de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua categoría 3; riego de vegetales y bebida de animales.

4.2. Propuesta de diseño de la planta piloto de tratamiento convencional por neutralización secuencial con cal

4.2.1. Tratamiento de aguas ácidas en una planta por neutralización

Con los resultados obtenidos en los ensayos en el laboratorio se procede al diseño del sistema de tratamiento para las aguas ácidas de los efluentes de mina, cuidando el pH final y la carga metálica del agua tratada (neutralizada) cumpla con los Límites Máximos Permisibles y los Estándares de Calidad Ambiental para Agua ECA categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales.

El proceso comienza con la entrada del agua ácida a la planta, a través de un canal donde se mide el caudal y el pH, pasa seguidamente las cubas o posas de neutralización donde se adiciona la cal hasta alcanzar un valor del pH entre 5,5 a 6,5: con el que se consigue que se formen los hidróxidos de hierro. Luego adicionar cal hasta alcanzar un valor del pH de 8,5 a 10,1. Estas cubas disponen de unos agitadores que garanticen una mezcla homogénea, transcurrido cierto tiempo y su decantación.

4.2.2. Dimensionamiento de las plantas de neutralización

Una de las variables para el diseño de la planta de tratamiento es el consumo de material reactivo necesario para alcanzar la neutralización de los efluentes, esta tasa de consumo experimental junto con las características hidráulicas y geoquímicas ayuda a determinar el tamaño de los dispositivos de tratamiento (Aduvire y Loza, 2015).

Para determinar el consumo de material reactivo necesario para neutralizar los efluentes de mina se realizaron una serie de ensayos en el laboratorio, con el fin de determinar experimentalmente el tamaño de los dispositivos de tratamiento la secuencia de la operación y los tiempos de tratamiento en cada etapa y/o dispositivo (Aduvire y Loza, 2015).

4.2.3. Dosificación de cal

En el tratamiento por etapas, para pasar a fase solida los contenidos de hierro, cobre y aluminio se requiere alcanzar un pH de 6,5 y para ello se gastarán 0,12 g de CaO/l de agua ácida, y para pasar a fase solida el contenido de Zinc, Níquel y Manganeso se añade cal hasta llegar a un pH de 8,5 a 10,1 en donde el consumo de la cal es de 0,24 g de CaO/l de agua ácida y el total de 0,4 g de CaO/l de agua ácida para alcanzar un pH 11,2. Si no se retira los lodos de la primera etapa, estos pueden re disolverse y pasar nuevamente al agua del sistema, por lo que habrá que añadir más cal para precipitarlos por sobre saturación, haciendo más costoso el tratamiento de las aguas ácidas.

En general los procesos de neutralización con cal permiten cumplir con los límites de descarga para metales pesados e incluyen básicamente 4 actuaciones o pasos.

Control del pH

Agitación y/o retención: para no incurrir en la pasivación de la cal, logrando que esto se disuelva y precipiten los metales.

Separación solido-liquido: para permitir la sedimentación de óxidos/hidróxidos de metales, puede realizarse mediante procesos de floculación, coagulación o secuestro de fases sólidas.

Descarga: descarga del efluente limpio cumpliendo la calidad y los estándares adecuados.

Considerando los resultados de las pruebas de neutralización – precipitación con cal, y la dosis usada será de 0,4 g CaO/l de agua ácida, teniendo en cuenta el caudal máximo que se presenta en la época de lluvia (nevadas) es de $Q = 81,8$ l/s para lo cual será necesario la cantidad de óxido de calcio CaO (cal) es de 2 827,008 kg/día para su respectivo tratamiento de las aguas ácidas. Y la cantidad mínima requerida de óxido de calcio CaO es de 1 375,488 kg/día para el caudal mínimo en época seca (tiempo de heladas) que es de 39,8 l/s.

4.2.4. Operaciones unitarias que conforman el sistema de tratamiento por etapas

Las principales operaciones unitarias involucradas en un sistema de tratamiento por etapas son: disolución (de reactivos de proceso), agitación y decantación en cada etapa y están complementadas por operaciones secundarias que nos permiten controlar el proceso.

Al aplicar el sistema de tratamiento de aguas ácidas por etapas, permite obtener lodos con características bien definidas y de similares características con posibilidades de recuperar metales de los lodos de proceso (Loza y Aduvire, 2017).

El agua del proceso de tratamiento se puede descargar a un curso de agua natural del lugar (cuerpo receptor), con un previo control de su calidad a fin de causar el mínimo impacto ambiental. Los lodos que no tengan interés de recuperación se almacenaran en depósitos adecuados o se pueden enviar al depósito de relaves u otro deposito preparado para este cometido, para que así no se re disuelvan y causen impactos negativos al medio ambiente.

Luego de la etapa experimental en el laboratorio se propone llevar un pilotaje que nos permita dimensionar adecuadamente el sistema de tratamiento para estas aguas ácidas de mina ver figura 24.

4.3. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos de la investigación muestran que los efluentes de mina estudiados son aguas ácidas con pH de 2,80 a 3,38 lo cual son considerados como una fuente potencial de contaminación por la elevada acidez y las altas concentraciones de Al, Cu, Zn, Mn, Ni, y Fe lo cual es comparable con lo mencionado por Cervantes (2014) y Montalvo (2016). En la mina La Rinconada la actividad minera que se desarrolla influye de manera negativa sobre los ecosistemas en las cuencas, ríos riachuelos, lagunas y lagos de la parte alta de la región Puno lo cual es aproximado a la conclusión que obtuvo en su investigación Lobato (2013) y Tuiro (2010).

La eficiencia de la cantidad de hidróxido de calcio en los tratamientos, el más eficiente fue la prueba de 0,3 g de CaO y 0,4 g de CaO por litro de agua ácida, en donde el pH inicial fue de 3,38 y con 0,3 g CaO/l se llegó a obtener un pH de 8,92 y con el 0,4 g CaO/l se obtuvo un pH de 10,89, mientras que Salvá (2012) en su investigación con 0,4 g de CaO/l de agua y 0,5 ml de floculante 0,5 ml/l de agua obtuvo un pH de 7,5 a 8,0, lo

cual difiere con lo mencionado por Salvá ya que en esta investigación con 0,4g de cal por litro de agua se obtuvo un pH de 10,89 y que Salvá solo obtuvo un pH de 7,5.

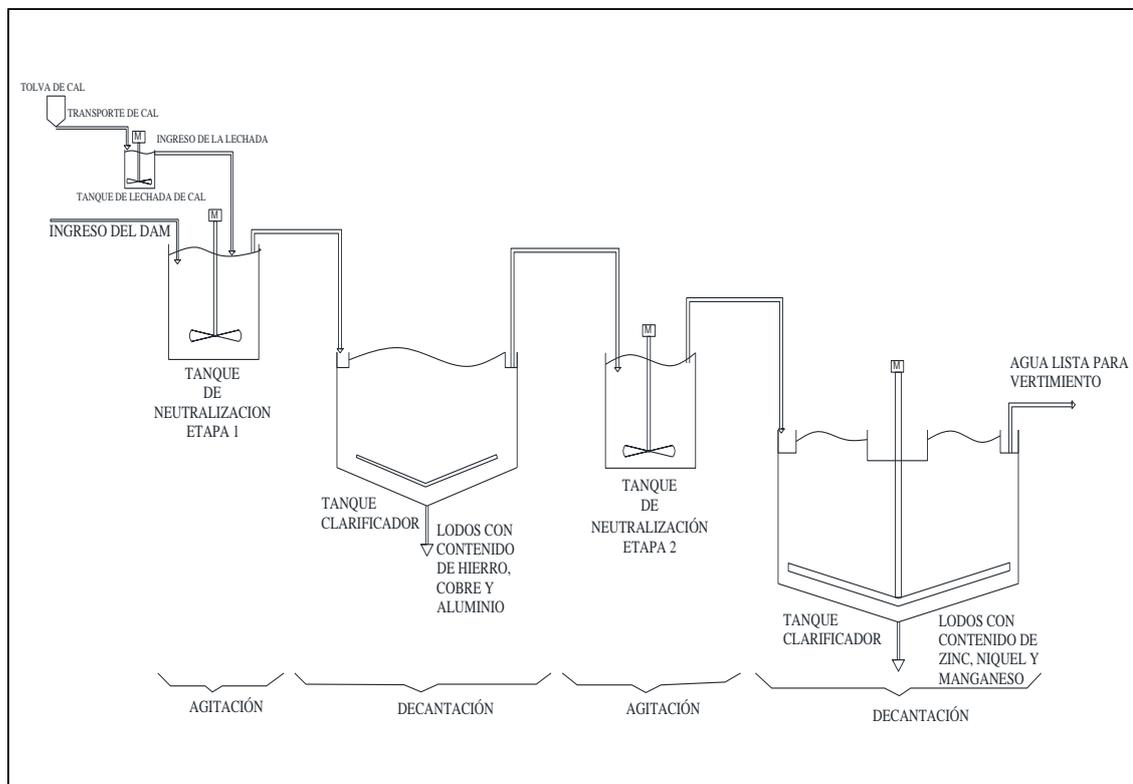


Figura 24: Diseño de una planta piloto de tratamiento convencional por neutralización por etapas.

Según Oré (2015) en su investigación realizada obtuvo la recuperación de metales pesados de hierro en 94,06 % a un pH de 4,285, cobre en 88,42 % a un pH de 5,811, zinc en 84,13 % a un pH de 8,025 y manganeso en 96,89 % en un pH de 10,385, mientras que en la presente investigación se obtuvo el hierro en 11,86 %, cobre en 23,80 % en pH de 4,4 y 5,25 respectivamente y que defieren con los de Oré (2015), mientras que en Zinc a pH 8,5 bajo en 86,88% y Manganeso en 98,88 % en un pH de 10,1, se obtuvieron resultados muy aproximados.

Según Espinosa y otros (2016) en su investigación realizado obtuvieron a un pH de 8 la recuperación del 100 % de Fe y Cu y del Al en 94,95 % en un pH de 6, mientras que la presente investigación a un pH de 8,5 se obtuvo el Cu en 100 % lo cual es similar a lo obtenido por Espinosa y fe en 97,80 % lo cual difiere de lo mencionado por Espinosa

en caso del Al se obtuvo un 99,37 % a un pH de 6,5 que es mejor el resultado por la investigación hecha.

Según Amanqui y López (2004) en su investigación realizada de la mina la Rinconada obtuvo un caudal de 3,178 l/s (274,64 m³/día), en la presente tesis se obtuvo un caudal mínimo de 39,8 l/s y máximo de 81,89 l/s, donde los resultados difieren con lo obtenido por Amanqui, pero si son muy próximos los resultados de pH (3,01) y la concentración de metales Cu, Zc, Pb y otros, con los resultados de esta tesis de pH 2,85 y 3,38 y las concentraciones de Cu, Zc, y otros.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la caracterización de los efluentes de aguas ácidas desarrolladas en esta investigación se demuestran que son aguas ácidas y que poseen valores muy bajos de pH que oscilan entre 2,80 a 3,38 y por cual concentraciones de metales pesados disueltos como: Cu = 0,21 mg/l, Fe = 4,55mg/l, Al = >16 mg/l, Zn = 4,5 mg/l, Ni = 10 mg/l y Mn = 9 mg/l. con un caudal máximo (época de lluvias y/o nevada) de evacuación es de 81,8 l/s. y que son una fuente potencial de contaminación al ecosistema por su elevada acidez.

Con la técnica de tratamiento por neutralización con cal al 4 % como agente neutralizador, en un tiempo de 05 a 10 minutos se logró una aceptable remoción de contenido de metales pesados en un pH de 6,5 de Fe en un 93,84 %, Cu en 80,95 %, Al en 99,37 %, y a un pH de 8,5 el Zn se redujo a 86,88 %, Ni en un 10,3 % y Mn en un 95,55 %, pero el Níquel en un pH de 10,1 se redujo a 99,3 % y manganeso a 98,88 % así obteniendo valores de concentraciones muy bajos y mejorando la calidad ambiental en los efluentes de aguas ácidas y cumpliendo con lo exigido por los (LMP) y Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA) Categoría 3, riego de vegetales y bebida de animales.

Con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio se diseñó la planta piloto de tratamiento por neutralización por etapas en donde la primera etapa se neutralizará hasta llegar un pH de 6,5 donde precipitaran el Fe, Cu y Al como también los otros metales, pero en pequeñas cantidades y en la segunda etapa hasta obtener un pH de 8,5 a 10,1 donde precipitaran los metales de Zn, Ni y Mn.

RECOMENDACIONES

Realizar una correcta gestión de las aguas ácidas en el área del proyecto separando las aguas de escorrentía, aguas del deshielo y los efluentes de mina con el fin de reducir los volúmenes de caudal de agua a tratar.

Se deberá considerar mayores estudios para probar la viabilidad de recuperar metales a partir del lodo removido de manera secuencial. Este aporte brindaría un gran valor agregado al tratamiento de aguas ácidas de los efluentes de mina.

Para el diseño de tratamiento será necesario realizar un pilotaje de campo para ajustar parámetros de acuerdo a las propias condiciones del entorno (presión y temperatura). Como también será necesario realizar un programa de monitoreo durante un periodo de por lo menos dos ciclos hidrológicos diferenciando como mínimo las estaciones húmedas, lluviosas y las de mayor estiaje.

REFERENCIAS

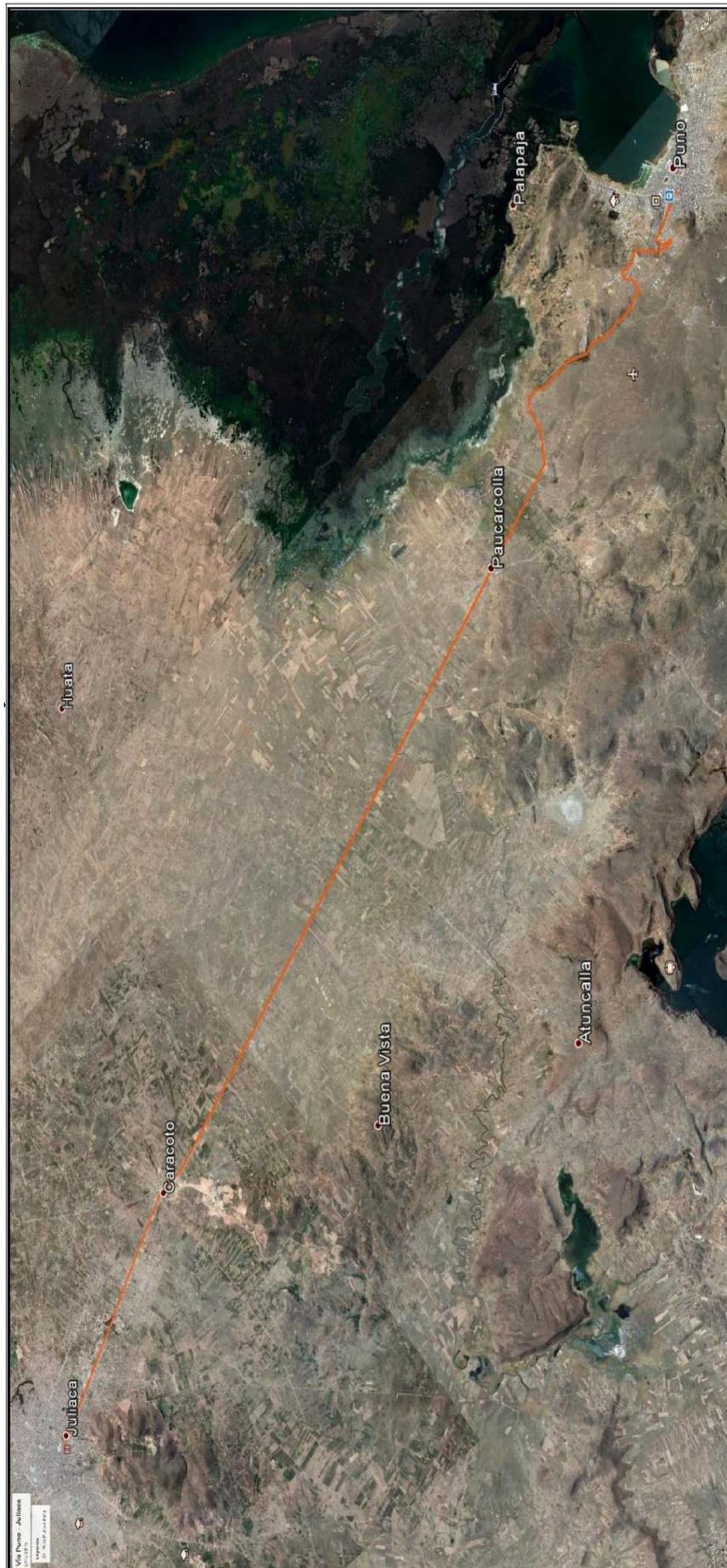
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina generación y tratamiento*. Instituto geológico y minero de España, Dirección de recursos minerales y geoambiente, Madrid.
http://info.igme.es/SIDIMAGENES/113000/258/113258_0000001.PDF
- Aduvire, O. y Loza, N. (2015). *Dimensionado de sistemas de tratamiento de aguas ácidas de mina*. SVS ingenieros S.A.C., 235 a 247.
- Amanqui, J. y Lopez, F. (2004). *Tratamiento de aguas ácidas de la mina Rinconda en el afluyente del Balcon n° 03* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de ingeniería química, Puno. biblioteca especializada de Ingeniería Química
- Calla, H. y Cabrera, C. (2010). Calidad del agua en la cuenca del río Rímac, sector de San Mateo, afectado por las actividades mineras. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 13(25).
- Calvo, D., Casado, J., Zamora, G. y Alfonso, P. (2013). Estudio para el tratamiento de las aguas ácidas por neutralización - precipitación en interior de la mina Santa Fé, Bolivia. *Libro de actas del III congreso internacional de geología y minera ambiental para el ordenamiento territorial y el desarrollo*. Cardona, 297 a 309.
- Cervantes, A. (2014). *Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma De México, Facultad De Ingeniería, Mexico, D.F.
- Corzo, A. (2015). *Impacto de los pasivos ambientales mineros en el recurso hídrico de la microcuenca quebrada párac, distrito de san mateo de huanchor, lima* (Tesis para optar el Grado de Magíster) Pontificia Universidad Católica Del Perú, Escuela De Posgrado, Lima.
- Cuentas, S. (2009). *Evaluación cualitativa del impacto ambiental generado por la actividad minera en la rinconada puno*. tesis, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Piura.
- De la Cruz, C. (2006). Mitigación de drenaje ácido en minas subterráneas aplicando fangos artificiales. Caso: mina Orcopampa. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 9, N° 17, 69-74 (2006) UNMSM ISSN: 1561*.

- Espinosa , A., Hidalgo, A. y Delgado, R. (2016). *Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (HDS)* (Tesis). Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodoogia de la investigacion* (Vol. Sexta edición). Mexico: McGRAW-HILL/Interamerica Editores S.A. de C.V.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2004). *Manual de restauracion de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*. Madrid.
- Lobato, L. (2013). *Evaluacion ambiental y programas de remediacion de la cuenca del Río Ramis*. Universidad Nacional de Ingenieria, Facultad Geológica, Minera y Metalúrgica, Lima. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1079>
- López, E., Aduvire, O. y Barretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (1): 3-21 ISSN: 0366-0176, 19.
- Lottermoser, G. (2007). *Mine wastes characterization, treatment, environmental impacts*. New York,,: Springer Berlin Heidelberg.
- Loza, N. y Aduvire, O. (2017). Optimizacion de un proceso de tratamiento de aguas ácidas de mina para reducir contenidos de manganeso mediante neutralizacion secuencial. *consultora del área de medio ambiente, SRK Consulting Perú S.A.*, 1 a 13.
- Marin, C. (2011). *Determinación de la dosis optima de lodos aluminosos para ser utilizada en el proceso de coagulación en aguas residuales provenientes del sector sur de la comuna del café - Parque industrial*. Universidad Tecnologica de Pereira, Facultad de Tecnologias, Pereira. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/2556/62839M337.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Medina, J. (2018). *Diseño y operatividad de la planta de neutralización de aguas acidas de mina paragsha cerro de pasco en minera volcan s.a.a*. Universidad Nacional de San Agustín, Escuela de Ingenieria metalúrgia, Arequipa.
- MMSMC, M. (2002). Guía metodológica sobre drenaje ácido en la industria minera. *Acuerdo Marco Producción Limpia Sector Gran Minería Buenas Prácticas Y Gestión Ambiental*, 25-26.
- Montalvo, V. (2016). *Evaluacion y propuesta de mitigacion del drenaje generado por los pasivos ambientales mineros de San Antonio de Esquilachue - Puno*. tesis, Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería de Minas, Puno.

- Montesinos, I. (2017). *Caracterización de efluentes de mina para la elección de la alternativa óptima de tratamiento*. tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de ciencias e ingeniería, Lima. http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/7885/MONTESINOS_MAYRA_EFLUENTES_MINA_ELECCION_TRATAMIENTO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Oré, T. (2015). *Recuperación de los metales pesados presentes en el drenaje ácido de mina mediante la precipitación selectiva para su posterior utilización*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Escuela de Posgrado, Huancayo.
- Quispe, A. (2013). *Plan De Minado Subterráneo Aplicado En La Corporación Minera Ananea S.A.* Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Puno.
- Quispe, L. (2008). *Neutralización y retención de metales en drenajes ácidos de mina de la faja pirítica ibérica con residuos de la industria papelera de Huelva*. Universidad de Huelva, Departamento de Geología, Huelva.
- Salvá, A. (2012). *Tratamiento y remoción de sólidos suspendidos y metales en la cuenca del río Boca Cabana*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Lima.
- Sandow, M. (2011). Remediation of acid mine waters. *Mine Water – Managing the Challenges IMWA*, 253.
- Strosnider, W., Llanos, F., Marcillo, E., Callapa, R. y Nairn, W. (2014). Impact of additional contaminants due to acid mine drainage in tributaries of the Pilcomayo river from Cerro Rico, Potosí, Bolivia. *Avances en Ciencias e Ingeniería - ISSN: 0718-8706*, 2.
- Sutty, J. (2016). *Influencia de la ventilación mecánica, en el diseño del sistema de ventilación del nivel 4955 Mina Urano Sac – Puno*. Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería de Minas, Puno.
- Tejada, R. (2017). *Tratamiento y sedimentación de la turbidez con cal en las aguas residuales de los relaves mineros de la unidad operativa Minera Santiago - B.* Tesis Para Optar El Título Profesional de Ingeniero de Minas, Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería de Minas, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Puno. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4695>
- Tuiro, C. (2010). *Evaluación y propuesta de mitigación de efluentes de aguas ácidas de cantera de caolin*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Lima.

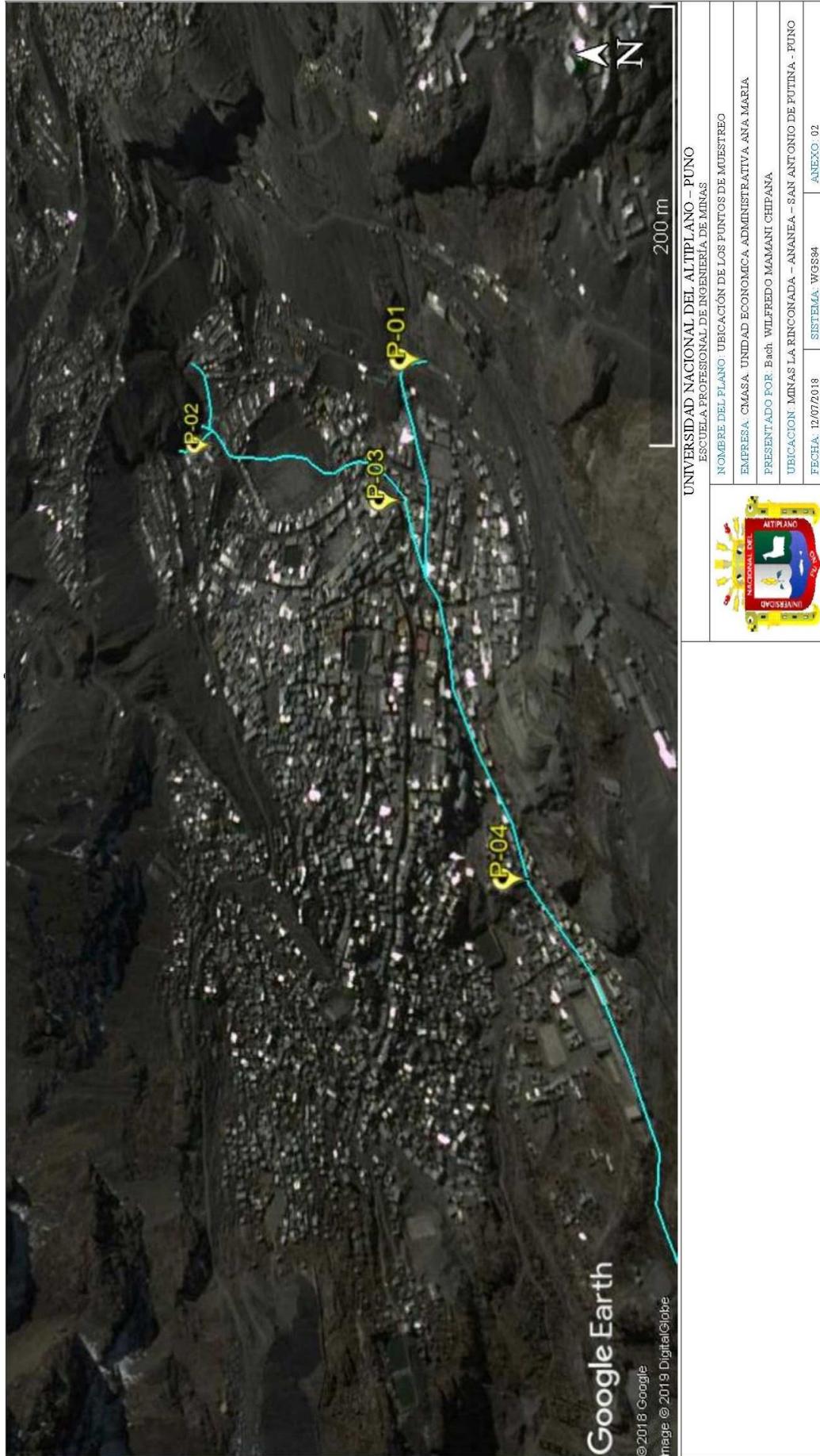
ANEXOS

Anexo 1. Vía de acceso y ubicación

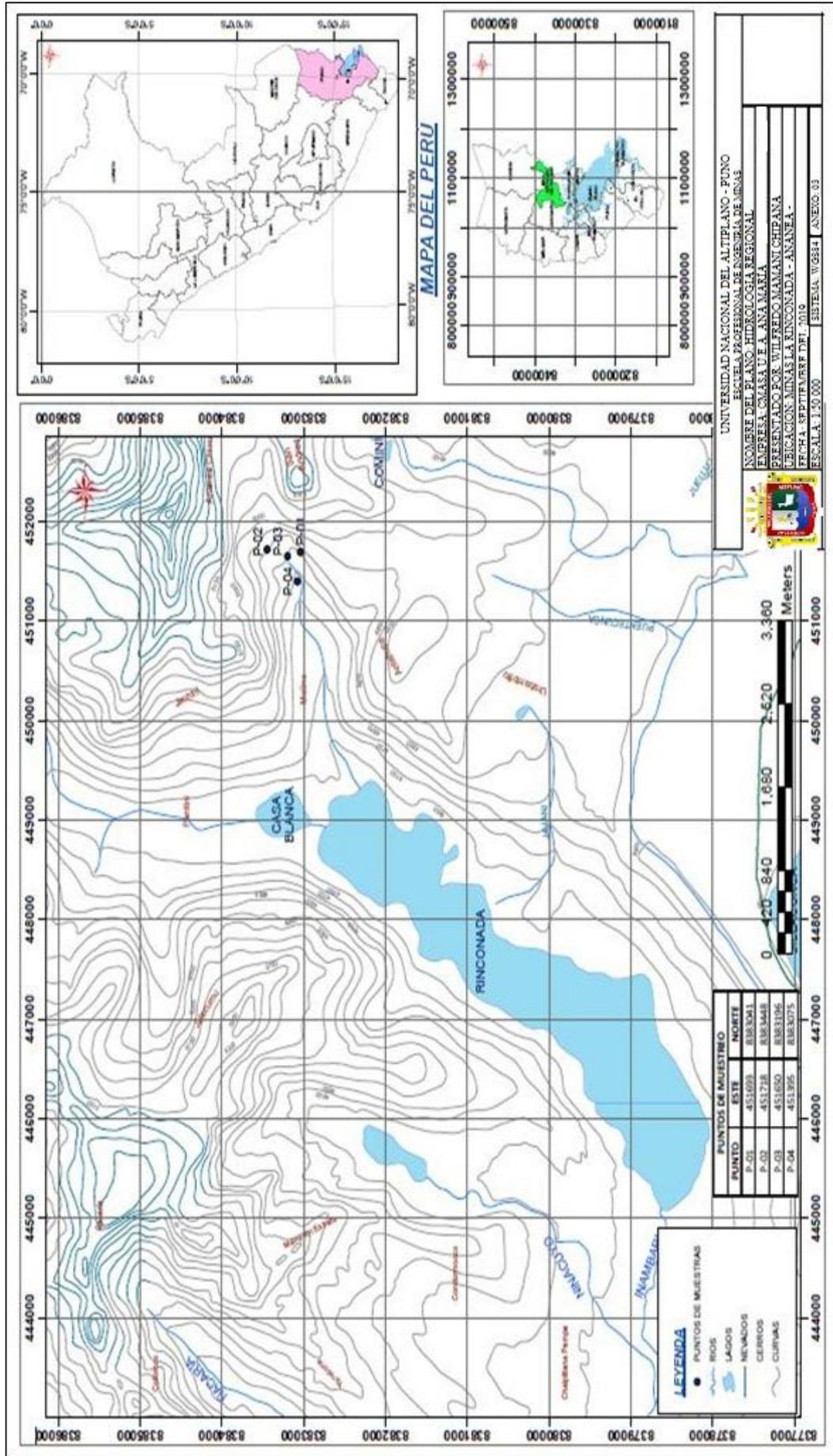


	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO – PUNO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
	NOMBRE DEL PLANO: VÍAS DE ACCESO Y UBICACIÓN
	EMPRESA: CMASA. UNIDAD ECONOMICA ADMINISTRATIVA ANA MARIA
	PRESENTADO POR: Bach. WILFREDO MAMANI CHEPANA
	UBICACION: MINAS LA RINCONADA – ANANEA – SAN ANTONIO DE PUTINA - PUNO
	FECHA: 12/07/2018 SISTEMA: WGS84 ANEXO: 01.A

Anexo 2. Ubicación de los puntos de muestreo



Anexo 3. Plano hidrológico con los puntos de muestreo



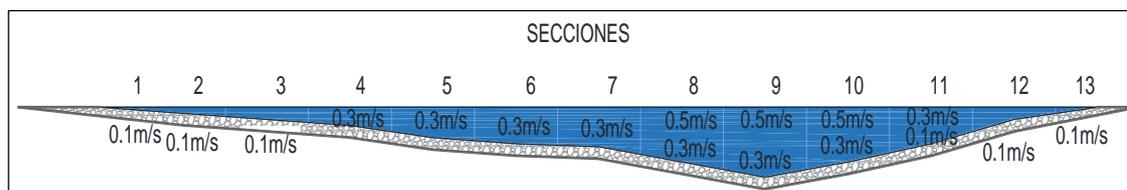
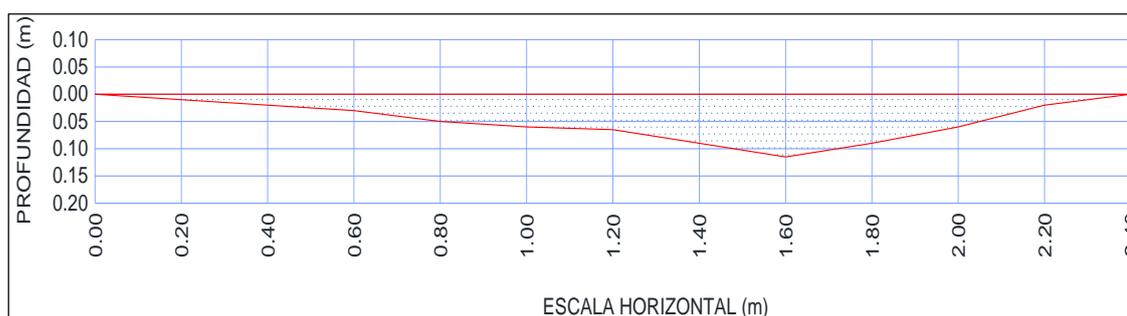
Anexo 4. Cálculo de los caudales en los puntos de muestreo de la primera etapa

CÁLCULO DE CAUDAL EN LOS PUNTOS DE MUESTREO

1. Punto P-02

Ubicación: 19L E 451718 N 8383448

Sección transversal



Cálculo del caudal por el método Velocidad-Superficie con correntómetro

SECCIÓN	AREA	VELOCIDAD			CAUDAL
		V _{inf}	V _{sup}	V _{promedio}	
1	0.0003	0.1000	0.1000	0.1000	0.000030
2	0.0020	0.1000	0.1000	0.1000	0.000200
3	0.0040	0.1000	0.1000	0.1000	0.000400
4	0.0063	0.3000	0.3000	0.3000	0.001890
5	0.0098	0.3000	0.3000	0.3000	0.002940
6	0.0119	0.3000	0.3000	0.3000	0.003570
7	0.0135	0.3000	0.3000	0.3000	0.004050
8	0.0180	0.3000	0.5000	0.4000	0.007200
9	0.0217	0.3000	0.5000	0.4000	0.008680
10	0.0179	0.3000	0.5000	0.4000	0.007160
11	0.0117	0.2000	0.3000	0.2500	0.002925
12	0.0045	0.1000	0.1000	0.1000	0.000450
13	0.0005	0.1000	0.1000	0.1000	0.000050
Q_{total}=					0.039545 m ³ /s
					39.545 l/s
					3416.7 m ³ /día

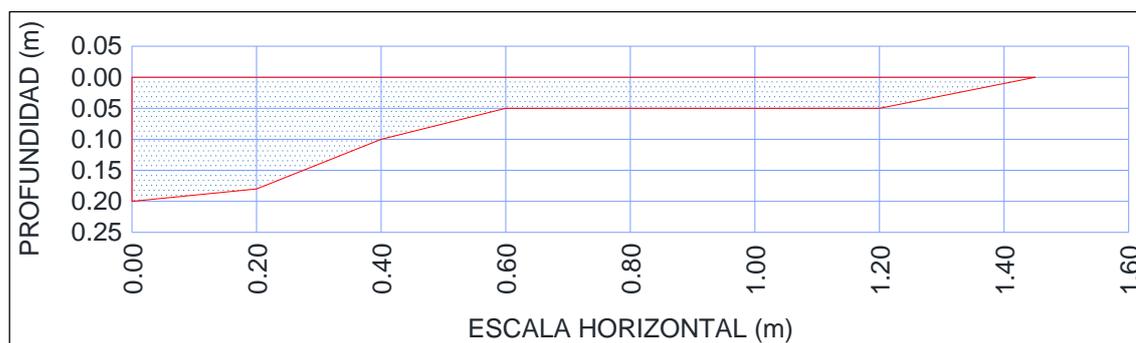


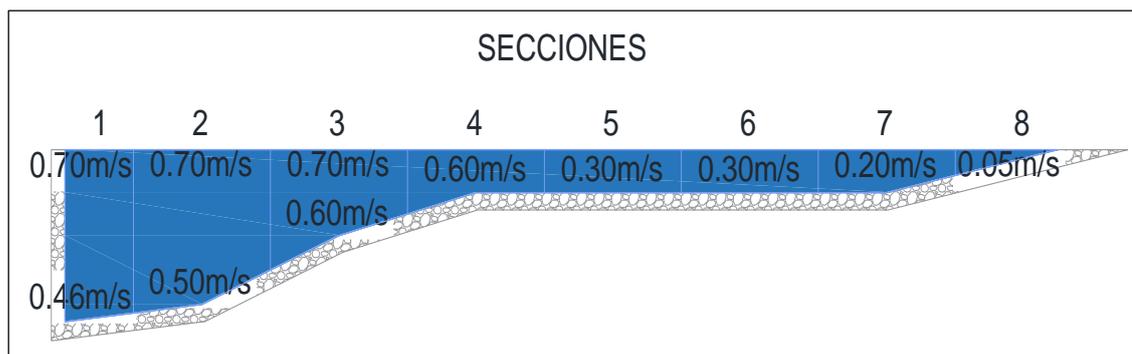
Figura 1: Toma de datos geométricos y determinación de la velocidad de flujo con correntómetro

2. Punto P-03

Ubicación: 19L E 451650 N 8383196

Sección transversal





Cálculo del caudal por el método Velocidad-Superficie con correntómetro

SECCIÓN	AREA	VELOCIDAD			CAUDAL
		Vinf	Vsup	Vpromedio	
1	0.0195	0.4600	0.7000	0.5800	0.011310
2	0.0345	0.5000	0.7000	0.6000	0.020700
3	0.0207	0.6000	0.7000	0.6500	0.013455
4	0.0113	0.6000	0.6000	0.6000	0.006780
5	0.0100	0.3000	0.3000	0.3000	0.003000
6	0.0100	0.3000	0.3000	0.3000	0.003000
7	0.0090	0.2000	0.2000	0.2000	0.001800
8	0.0023	0.0500	0.0500	0.0500	0.000115
Qtotal=					0.060160 m3/s
					60.160 l/s
					5197.8 m3/día

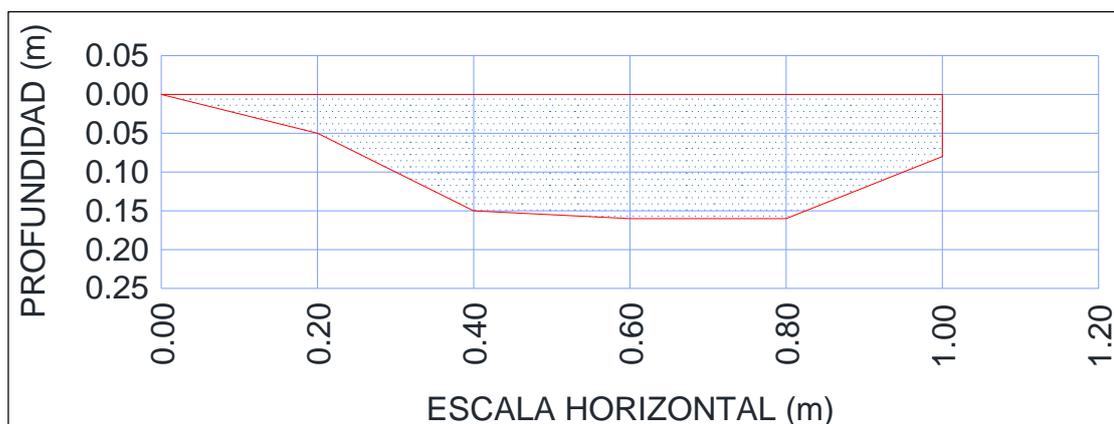


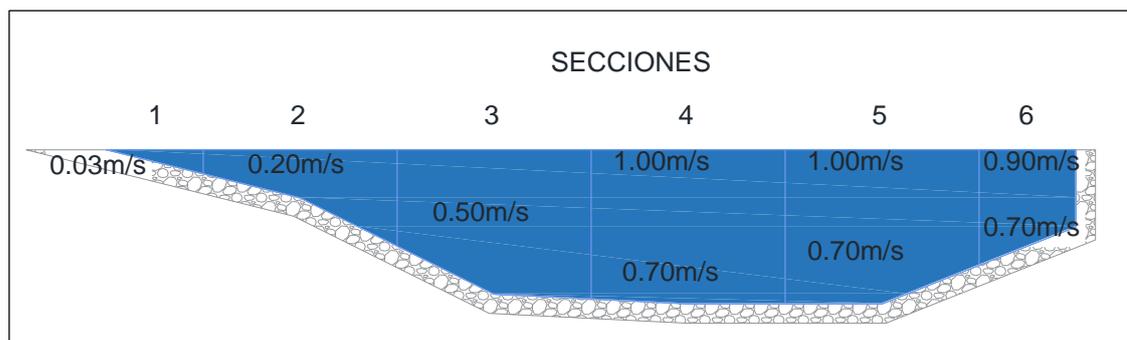
Figura 2: Toma de datos geométricos y determinación de la velocidad de flujo con correntómetro

Punto P-04

Ubicación: 19L E 451395 N 8383075

Sección transversal





Cálculo del caudal por el método Velocidad-Superficie con correntómetro

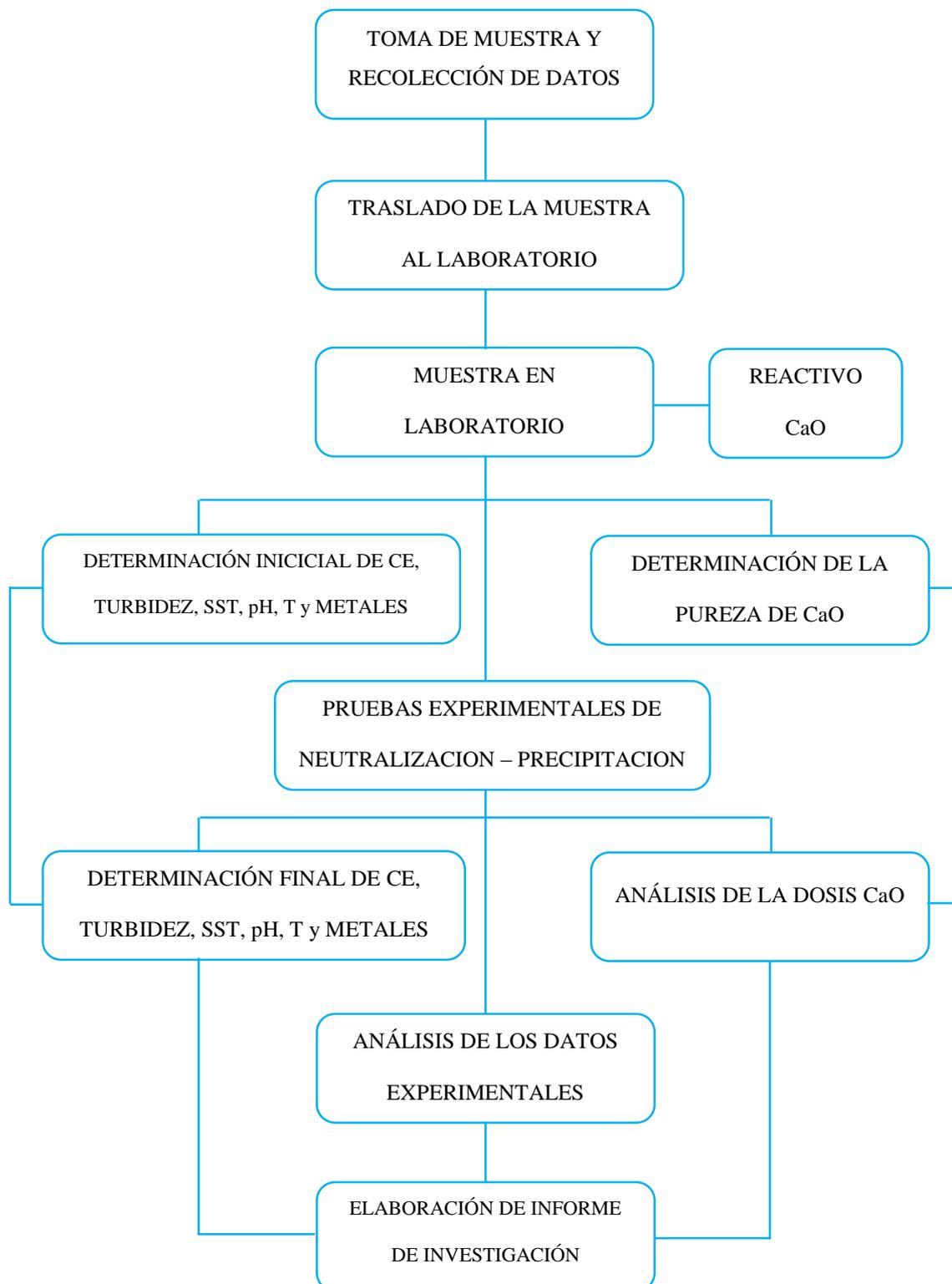
SECCIÓN	AREA	VELOCIDAD			CAUDAL
		V _{inf}	V _{sup}	V _{promedio}	
1	0.0012	0.0300	0.0300	0.0300	0.000036
2	0.0113	0.2000	0.2000	0.2000	0.002260
3	0.0277	0.5000	0.5000	0.5000	0.013850
4	0.0317	0.7000	1.0000	0.8500	0.026945
5	0.0300	0.7000	1.0000	0.8500	0.025500
6	0.0100	0.7000	0.9000	0.8000	0.008000
Q_{total}=					0.076591 m³/s
					76.591 l/s
					6617.5 m³/día



Figura 3: Toma de datos geométricos y determinación de la velocidad de flujo con correntómetro

Anexo 5. Diagrama de diseño de tratamiento

DISEÑO DE TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS



Anexo 6. Estándares de calidad ambiental para agua (ECA) DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM

Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS- QUÍMICOS				
Aceites y Grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		**
Cianuro Wad	mg/L	0,1		0,1
Cloruros	mg/L	500		**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/ Co	100 (a)		100 (a)
Conductividad	(μ S/cm)	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergents (SAAM)	mg/L	0,2		0,5
Fenoles	mg/L	0,002		0,01
Fluoruros	mg/L	1		**
Nitratos (NO ⁻ -N)+3Nitritos (NO ₂ ⁻ -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO ⁻ -N) ₂	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5		6,5 – 8,4
Sulfatos	mg/L	1 000		1 000
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3
INORGÁNICOS				
Aluminio	mg/L	5		5
Arsénico	mg/L	0,1		0,2
Bario	mg/L	0,7		**
Berilio	mg/L	0,1		0,1
Boro	mg/L	1		5
Cadmio	mg/L	0,01		0,05
Cobre	mg/L	0,2		0,5
Cobalto	mg/L	0,05		1
Cromo Total	mg/L	0,1		1
Hierro	mg/L	5		**
Litio	mg/L	2,5		2,5
Magnesio	mg/L	**		250
Manganeso	mg/L	0,2		0,2
Mercurio	mg/L	0,001		0,01
Níquel	mg/L	0,2		1
Plomo	mg/L	0,05		0,05
Selenio	mg/L	0,02		0,05
Zinc	mg/L	2		24
ORGÁNICO				
Bifenilos Policlorados				
Bifenilos Policlorados (PCB)	μ g/L	0,04		0,045

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
PLAGUICIDAS				
Paratión	µg/L	35		35
Organoclorados				
Aldrín	µg/L	0,004		0,7
Clordano	µg/L	0,006		7
Dicloro Difeníl Tricloroetano (DDT)	µg/L	0,001		30
Dieldrín	µg/L	0,5		0,5
Endosulfán	µg/L	0,01		0,01
Endrin	µg/L	0,004		0,2
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0,01		0,03
Lindano	µg/L	4		4
Carbamato				
Aldicarb	µg/L	1		11
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	1 000
Escherichia coli	NMP/100 ml	1 000	**	**
Huevos de Helmintos	Huevo/L	1	1	**

(a): Para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

(b): Después de filtración simple.

(c): Para el riego de parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales, sólo aplican los parámetros microbiológicos y parasitológicos del tipo de riego no restringido.

Δ 3: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

Nota 4:

- El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.
- Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

Anexo 7. Análisis de parámetros físico-químico de las muestras de aguas en laboratorio de FIM.



Universidad Nacional del Altiplano
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ENSAYO N° 18006

SOLICITANTE : Bach. WILFREDO MAMANI CHIPANA
 TIPO DE MUESTRA : Agua Superficial
 PROCEDENCIA DE LA MUESTRA : Aguas de los efluentes de la mina la Rinconada
 Distrito de Ananea
 Provincia de San Antonio de Putina
 Departamento de Puno
 MUESTRA TOMADO : Bach. WILFREDO MAMANI CHIPANA

DATOS DE LA MUESTRA

DATOS	PUNTOS DE MUESTREO			
	P-01	P-02	P-03	P-04
PROCEDENCIA	Mina la Rinconada / Ananea / San Antonio de Putina / Puno	Mina la Rinconada / Ananea / San Antonio de Putina / Puno	Mina la Rinconada / Ananea / San Antonio de Putina / Puno	Mina la Rinconada / Ananea / San Antonio de Putina / Puno
COORDENADAS – SISTEMA WGS-84	E: 451693 N: 8383041	E: 451718 N: 8383448	E: 451650 N: 8383196	E: 451395 N: 8383075
ZONA	19	19	19	19
CARTA	30 - Y	30 - Y	30 - Y	30 - Y
FECHA DE MUESTREO	12/11/2017	12/11/2017	12/11/2017	12/11/2017
HORA DE MUESTREO	8:00:30	9:00:30	10:00:30	11:35:30
FECHA DE ANALISIS	13/11/2017	13/11/2017	13/11/2017	13/11/2017

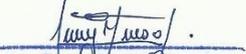
PROPIEDADES FISICAS

Parámetros	unidades	PUNTOS DE MUESTREO			
		P-01	P-02	P-03	P-04
Potencial de Hidrogeno	pH	3.27	3.28	3.3	3.42
Conductividad Eléctrica	µs/cm	1320	1090	1940	3240
Solidos Totales Disueltos	mg/l	660	550	970	1630
Temperatura	Celsius	12.7	12.7	13.4	13.1
Caudal	L/s	3.6	39.54	60.16	76.59

Nota: La medición de análisis de muestras se realizó in situ.



Ing. OWAL A. VELASQUEZ VIZA
 Jefe de Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental



Ing. Eddy Marisol Bencho Justo
 Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental
 FIM UNA

Fuente: Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la FIM.

Anexo 8. Análisis de parámetros físico-químico de las muestras en mega laboratorio UNA-PUNO.

Universidad Nacional del Altiplano - Puno
 Vicerrectorado de Investigación
 Megalaboratorio de Investigación Ambiental-Suelos y Aguas
 Espectroscopia ICP - Microscopia Electrónica de Rayos X

INFORME DE ANÁLISIS N° 006-18

ASUNTO ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO: Agua de efluentes mineros

PROCEDENCIA : Puno, San Antonio de Putina
 LUGAR : Puno San Antonio de Putina Ananea la Rinconada
 INTERESADO : Bach. Wilfredo Mamani Chipana
 MOTIVO : Análisis de agua de efluentes Mineros de aguas ácidas
 ANÁLISIS : 8/05/018
 MUESTRA TOMADA : 7/05/18 Por el interesado

RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICO	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Unidad de medida
C.E.	451874	451924	451780	
C.N.	8383422	8383634	8383623	
Temperatura	13.00	13.00	13.00	°c
pH	2.35	2.92	2.85	pH
Turbidez	19.30	60.40	56.40	NTU
Potencial Redox (Eh)	245.90	214.90	219.10	mV
Conductividad Eléctrica (CE)	2.62	1843.00	2.23	µS/cm
Salinidad	1320.00	920.00	1110.00	mg ^l
Sólidos disueltos totales TDS	1840.00	1290.00	1550.00	mg ^l

MÉTODOS DE ENSAYO:

- Los resultados obtenidos de la muestra son validados con las NTP. ECA S y Standard Methods for the examination of water and Wastewater 14 Th edition 1975 20th edition 2005
- APHA-AWWA-WPCF
- El presente Informe de Ensayos, sólo es válido únicamente para la Muestra analizada.
- No deben inferirse a la Muestra otros parámetros que no estén consignados en el presente informe de Ensayos.
- En caso de que el producto haya sido muestreado por el cliente, el laboratorio, no se responsabiliza si las condiciones de muestreo no fueron las adecuadas.
- Este Informe de Ensayos no es un certificado de conformidad, ni certificado del sistema de calidad del productor.

Puno, 9 de mayo del 2018

Dr. Martin Choque Yucra

Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente
CIP. 86183

Ciudad Universitaria - Teléfono (051) 599430 Anexo 31102

Fuente: Mega laboratorio de Investigación Ambiental – Suelos y Aguas UNA-PUNO.

Anexo 9. Análisis de los metales pesados disueltos de las muestras en Megalaboratorio

UNA-PUNO

Página 1 de 3

wilfredo mamani chipana II 10-05. Informe Tabular 25/06/2018, 02:06:22 p.m.

Parámetros método

Líneas de análisis

Nombre	El	Long. Onda	Tipo	I/S	Modo fondo	PPP	OBCL	OBCR
Al 396.152	Al	396.152	Analito	-	Adaptado	2		
As 188.980	As	188.980	Analito	-	Adaptado	2		
Ba 233.527	Ba	233.527	Analito	-	Adaptado	2		
Cd 214.439	Cd	214.439	Analito	-	Adaptado	2		
Co 238.892	Co	238.892	Analito	-	Adaptado	2		
Cr 267.716	Cr	267.716	Analito	-	Adaptado	2		
Cu 324.754	Cu	324.754	Analito	-	Adaptado	2		
K 769.897	K	769.897	Analito	-	Adaptado	2		
Mn 257.610	Mn	257.610	Analito	-	Adaptado	2		
Mo 202.032	Mo	202.032	Analito	-	Adaptado	2		
Ni 231.604	Ni	231.604	Analito	-	Adaptado	2		
Pb 220.353	Pb	220.353	Analito	-	Adaptado	2		
Se 196.026	Se	196.026	Analito	-	Adaptado	2		
Sr 407.771	Sr	407.771	Analito	-	Adaptado	2		
Zn 206.200	Zn	206.200	Analito	-	Adaptado	2		

Grupo condiciones (Todas las líneas comparten conjunto de condiciones)

Pot.(kW)	PlasFlujo(L/min)	Flujo aux. (L/min)	NebFlujo(L/min)	Tiempo réplica(s)	Tiempo estab. (s)
1.00	15.0	1.50	0.70	10.000	15

Multi Marco
Enc.

Introducción muestra

Toma muestra (s)	Tiempo lavado(s)	Vel. bomba (rpm)	Bombeo rápido
30	60	15	Enc.

Cond. generales
Réplicas
3

Cond. de calibración

Modo Calib.	Nº patrones	Límite Coef Corr	Ajustes pend.
Cuantitativo	1	0.995000	Apag.

Concentración patrón

El	Unidades	Patrón 1
Al	mg/L.	5.00000
As	mg/L.	5.00000
Ba	mg/L.	5.00000
Cd	mg/L.	5.00000
Co	mg/L.	5.00000
Cr	mg/L.	5.00000
Cu	mg/L.	5.00000
K	mg/L.	50.00000
Mn	mg/L.	5.00000
Mo	mg/L.	5.00000
Ni	mg/L.	5.00000
Pb	mg/L.	5.00000
Se	mg/L.	5.00000
Sr	mg/L.	5.00000
Zn	mg/L.	5.00000

Fuente: Megalaboratorio de Investigación Ambiental – Suelos y Aguas UNA-PUNO.

wilfredo mamani chipana II 10-05. Informe Tabular 25/06/2018, 02:06:22 p.m.

Parámetros Calib.

Nombre	Por Ble.	P/Ajus	tipo de curv.	Error máx	Conc Min	Conc máx	E/Curva %	J / Curva %
Al 396.152	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
As 188.980	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Ba 233.527	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Cd 214.439	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Co 238.892	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Cr 267.716	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Cu 324.754	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
K 769.897	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Mn 257.610	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Mo 202.032	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Ni 231.604	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Pb 220.353	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Se 196.026	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Sr 407.771	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400
Zn 206.200	Apag.	Apag.	Lineal	5.0	0.00000	100.00000	25	400

Unidades

Unidades Multip. Dividir
mg/L 1 1E6



Columnas

Columna

Al 396.152
As 188.980
Ba 233.527
Cd 214.439
Co 238.892
Cr 267.716
Cu 324.754
K 769.897
Mn 257.610
Mo 202.032
Ni 231.604
Pb 220.353
Se 196.026
Sr 407.771
Zn 206.200



Mostrar Marcas Columnas

Columna	o	QC	S	e	uncal	I	n	a	u	v	x	b	p	m	d
Al 396.152	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
As 188.980	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ba 233.527	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cd 214.439	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Co 238.892	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cr 267.716	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cu 324.754	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
K 769.897	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mn 257.610	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mo 202.032	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ni 231.604	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Pb 220.353	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x



Fuente: Megalaboratorio de Investigación Ambiental – Suelos y Aguas UNA-PUNO

wilfredo mamani chipana II 10-05. Informe Tabular 25/06/2018, 02:06:22 p.m.

Columna	o	QC	S	e	uncal	I	n	a	u	v	x	b	p	m	d
Se 196.026	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Sr 407.771	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Zn 206.200	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Nombre muestra	Al 396.152 mg/L	As 188.980 mg/L	Ba 233.527 mg/L	Cd 214.439 mg/L	Co 238.892 mg/L
Blanco	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Patrón 1	5.00000	5.00000	5.00000	5.00000	5.00000
WMCH 01	3.56237	0.071309	0.044874	0.003544	0.242064
WMCH 02	10.7327	0.361001	0.028802	0.005269	0.215459
WMCH 03	64.8198	0.473097	0.085086	0.027470	1.06399



Nombre muestra	Cr 267.716 mg/L	Cu 324.754 mg/L	K 769.897 mg/L	Mn 257.610 mg/L	Mo 202.032 mg/L
Blanco	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Patrón 1	5.00000	5.00000	50.0000	5.00000	5.00000
WMCH 01	0.012009	0.082534	6.35849	19.3757	0.096587
WMCH 02	0.012827	0.147343	2.83811	4.31899	0.020428
WMCH 03	0.030872	0.407324	8.04880	12.1724	0.010909



Nombre muestra	Ni 231.604 mg/L	Pb 220.353 mg/L	Se 196.026 mg/L	Sr 407.771 mg/L	Zn 206.200 mg/L
Blanco	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Patrón 1	5.00000	5.00000	5.00000	5.00000	5.00000
WMCH 01	0.477370	0.040813	0.011107	1.15901	3.95014
WMCH 02	0.557882	0.009275	0.005601uv	2.75222	1.05479
WMCH 03	2.64418	0.095417	-0.006237uv	2.05151	6.13053



Fuente: Megalaboratorio de Investigación Ambiental – Suelos y Aguas UNA-PUNO.

Anexo 10: Análisis de los parámetros físico-químico de las muestras de aguas en laboratorio de FIM.



Universidad Nacional del Altiplano
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ENSAYO N° 18007

SOLICITANTE : Bach. WILFREDO MAMANI CHIPANA
 TIPO DE MUESTRA : Agua Superficial
 PROCEDENCIA DE LA MUESTRA : Aguas de los efluentes de la mina la Rinconada
 Distrito de Ananea
 Provincia de San Antonio de Putina
 Departamento de Puno
 MUESTRA TOMADO : Bach. WILFREDO MAMANI CHIPANA

DATOS DE LA MUESTRA

DATOS	PUNTOS DE MUESTREO			
	P - 01	P-02	P-03	P-04
PROCEDENCIA	Mina la Rinconada / Ananea / San Antonio de Putina / Puno	Mina la Rinconada / Ananea / San Antonio de Putina / Puno	Mina la Rinconada / Ananea / San Antonio de Putina / Puno	Mina la Rinconada / Ananea / San Antonio de Putina / Puno
COORDENADAS – SISTEMA WGS-84	E: 451693 N: 8383041	E: 451718 N: 8383448	E: 451650 N: 8383196	E: 451395 N: 8383075
ZONA	19	19	19	19
CARTA	30 - Y	30 - Y	30 - Y	30 - Y
FECHA DE MUESTREO	12/11/2017	12/11/2017	12/11/2017	12/11/2017
HORA DE MUESTREO	8:30:30	9:30:30	10:30:30	11:30:30
FECHA DE ANALISIS	13/11/2017	13/11/2017	13/11/2017	13/11/2017

PROPIEDADES FISICAS

Parámetros	unidades	PUNTOS DE MUESTREO			
		P-01	P-02	P-03	P-04
Potencial de Hidrogeno	pH	4.25	3.35	3.25	3.59
Conductividad Eléctrica	µs/cm	2240	1510	1700	1760
Solidos Totales Disueltos	mg/l	1120	750	850	880
Turbidez	NTU	89	98.1	99.6	102
Temperatura	Celsius	11.5	12.1	9.7	10.7
Caudal	L/s	1.0	20.2	35.6	42.3

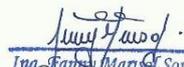
Nota: La medición de análisis de muestras se realizó in situ.



Ing. OWAL A. VELASQUEZ VIZA
 Jefe de Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental



Ing. Owal A. Velásquez Viza
 Jefe de Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental



Ing. Jany Marcel Sonco Justo
 Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental
 FIM UNA

Fuente: Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la FIM

Anexo 11: Análisis de metales pesados disueltos de las muestras de aguas en laboratorio de FIM.



Universidad Nacional del Altiplano
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ENSAYO N° 18008

SOLICITANTE : Bach. WILFREDO MAMANI CHIPANA
 TIPO DE MUESTRA : Agua Superficial
 PROCEDENCIA DE LA MUESTRA : Aguas de los efluentes de la mina la Rinconada
 Distrito de Ananea
 Provincia de San Antonio de Putina
 Departamento de Puno
 MUESTRA TOMADO : Bach. WILFREDO MAMANI CHIPANA

DATOS DE LA MUESTRA

DATOS	MUESTRAS PM - 04
PROCEDENCIA	Mina la Rinconada / Ananea / San Antonio de Putina / Puno
COORDENADAS – SISTEMA WGS-84	E: 451395.00 N: 8383075.00
ZONA	19
CARTA	30 - Y
FECHA DE MUESTREO	10/08/2018
HORA DE MUESTREO	11:35:30
FECHA DE ANALISIS	13/08/2018

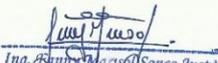
PROPIEDADES QUÍMICAS

RESULTADOS DE ANALISIS				
ANALISIS	Método analítico	Límite de cuantificación	Resultado	Unidades
Cobre RA	fotométrico	5	0.21	mg/l
Hierro RA	fotométrico	5	4.55	mg/l
Aluminio RA	fotométrico	20	16	mg/l
Zinc RA	fotométrico	5	4.5	mg/l
Níquel RA	fotométrico	10	10	mg/l
Manganeso RA	fotométrico	10	9	mg/l





Ing. DWAL A. VELASQUEZ VIZA
 Jefe de Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental



Ing. Ramiro Mariscal Sonco Justo
 Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental
 FIM UNA

Fuente: Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la FIM

Anexo 12: Análisis de metales pesados disueltos de las muestras de aguas ya tratadas en laboratorio de FIM.



Universidad Nacional del Altiplano
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MONITOREO Y EVALUACION AMBIENTAL



INFORME DE ENSAYO N° 18009

SOLICITANTE : Bach. WILFREDO MAMANI CHIPANA
 TIPO DE MUESTRA : Agua Superficial
 PROCEDENCIA DE LA MUESTRA : Aguas de los efluentes de la mina la Rinconada
 Distrito de Ananea
 Provincia de San Antonio de Putina
 Departamento de Puno
 MUESTRA TOMADO : Bach. WILFREDO MAMANI CHIPANA

DATOS DE LA MUESTRA

DATOS	MUESTRAS PM - 04
PROCEDENCIA	Mina la Rinconada / Ananea / San Antonio de Putina / Puno
COORDENADAS – SISTEMA WGS-84	E: 451395.00 N: 8383075.00
ZONA	19
CARTA	30 - Y
FECHA DE MUESTREO	10/08/2018
HORA DE MUESTREO	11:35:30
FECHA DE ANALISIS	13/08/2018

PROPIEDADES QUIMICAS

PARÁMETROS	Unidades	MUESTRAS TRATADAS					
		N° 01 Muestra de agua tratada	N° 02 Muestra de agua tratada	N° 03 Muestra de agua tratada	N° 04 Muestra de agua tratada	N° 05 Muestra de agua tratada	N° 06 Muestra de agua tratada
Potencial de Hidrógeno	pH	4.4	5.25	6.5	8.5	10.1	11.2
Hierro (Fe)	mg/l	4.01	3.79	0.28	0.1	0.09	0
Cobre (Cu)	mg/l	0.2	0.16	0.04	0	0	0
Aluminio (Al)	mg/l	16	0.2	0.01	0.1	0.27	-
Zinc (Zn)	mg/l	4.5	4.2	0.84	0.59	0.15	0.12
Níquel (Ni)	mg/l	9.91	9.92	9.89	8.97	0.07	0.05
Manganeso (Mn)	mg/l	9	7.7	3.38	0.4	0.1	0.1



Ing. OWAL A. VELÁSQUEZ VIZA
 Jefe de Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental



Ing. Benny Matsol Solco Justo
 Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental
 FIM UNA

Fuente: Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental de la FIM.

Anexo 13: Análisis de porcentaje de pureza de la cal (óxido de calcio) en laboratorio de FIQ

Universidad Nacional del Altiplano - Puno
 FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

LQ-2018 **N° 0606**

Certificado de Análisis

ASUNTO : Análisis Físico Químico de CAL: CEMENTO CARACOTO

PROCEDENCIA : PROVINCIA DE SAN ROMAN, DISTRITO DE CARACOTO

INTERESADO : Bach. Wilfredo MAMANI CHIPANA

MOTIVO : PORCENTAJE DE PUREZA DE CAL

MUESTREO : 12/12/2018, por el interesado

ANÁLISIS : 12/12/2018

COD. MUESTRA : B009-000094

CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS

PARAMETROS	UNIDAD	RESULTADOS	METODO ANALITICO
Porcentaje de pureza de cal	%	58.62	Volumétrica

Puno, C.U. 14 de diciembre del 2018.
 VºBº

Ing. Edith Tello Palma
 DECAÑA
 FACULTAD ING. QUÍMICA
 UNA - PUNO

JEFATURA
 Laboratorio de Control de Calidad
 Puno Perú
 FACULTAD INGENIERIA QUIMICA
 UNA - PUNO

ING. LUZ MARINA TEVES PONCE
 ANALISTA DE LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD
 FIQ - UNA - CIP - 182393

Ciudad Universitaria Av: Floral s/n Facultad de Ing. Química - Pabellón 94 - Telefax (051)366142 -352992.

Fuente: Laboratorio de control de calidad de la FIQ.

Anexo 14. toma de datos en los puntos de muestreo



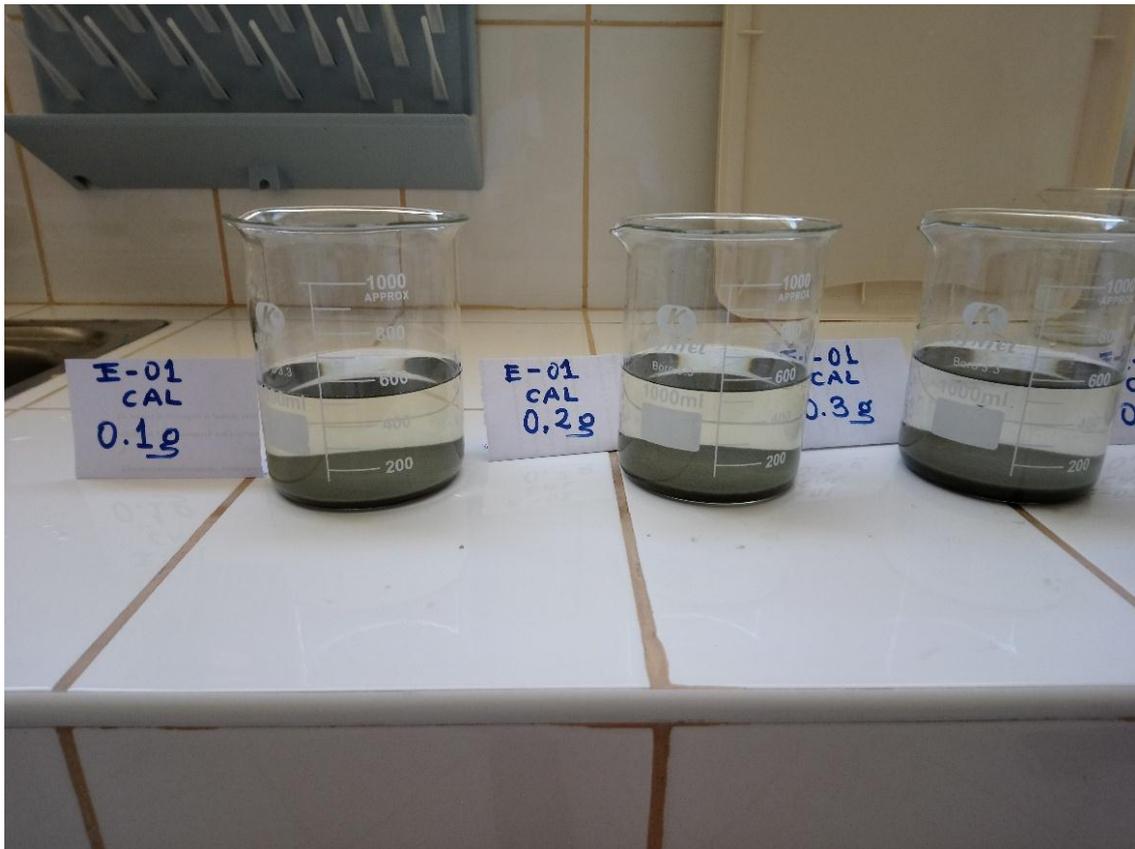
Anexo 15: Lectura de los parametros fisico-quimico de la muestra y preparacion de lechada de cal.



Anexo 16: Agitacion magnetica de las aguas ácidas, lectura de las muestras en tratamiento y analisis de metales pesados disueltos.



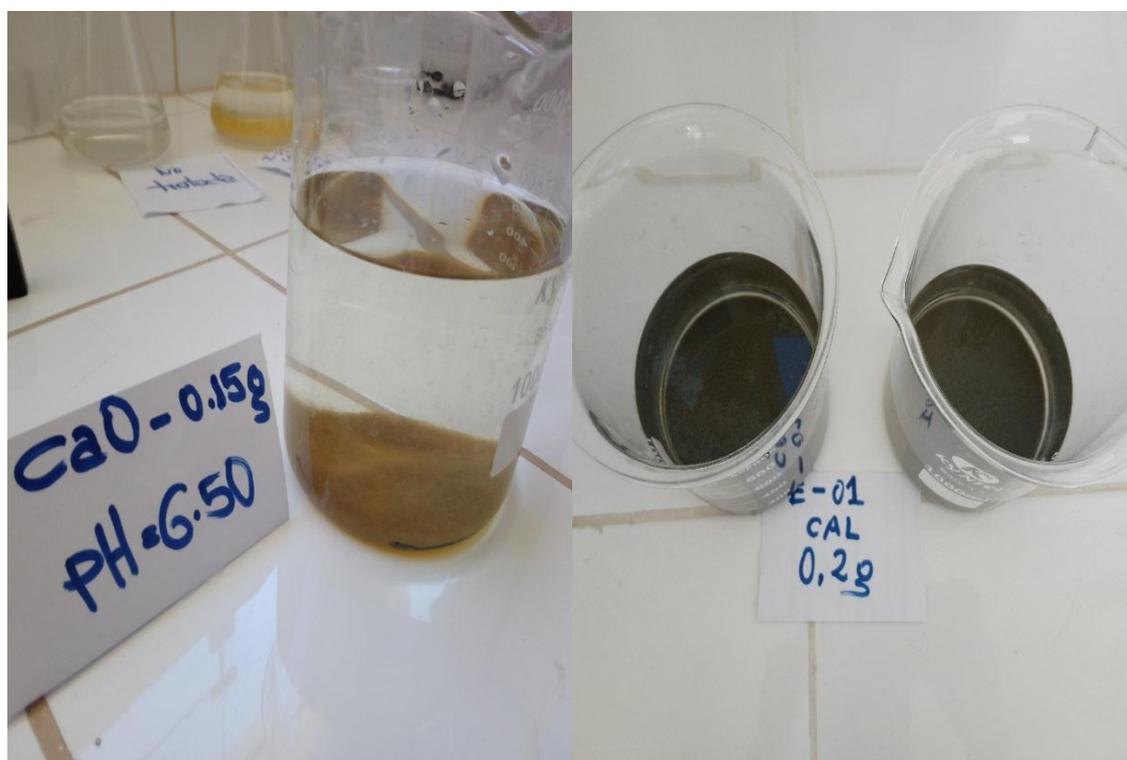
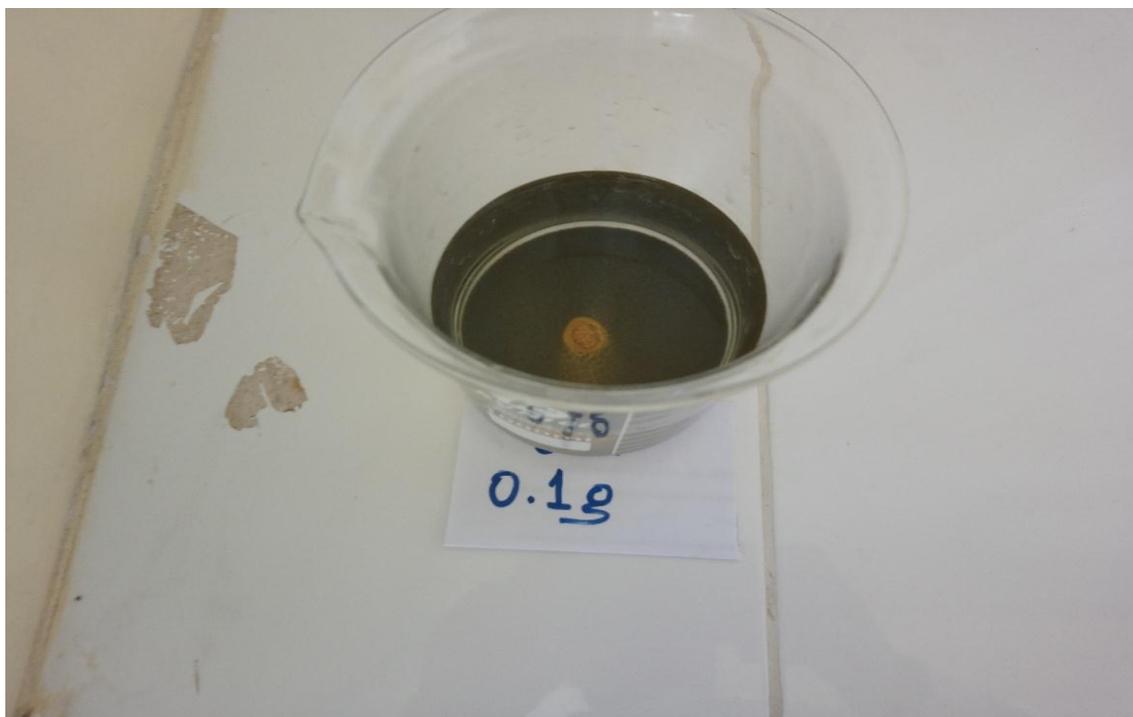
Anexo 17. Neutralización y decantación de las muestras de agua ácida



Anexo 18. Análisis de los metales pesados disueltos de las muestras en tratamiento por neutralización-precipitación con cal (lechada de cal)



Anexo 19. Precipitación/decantación de los metales pesados disueltos primero del hierro, cobre luego del aluminio y manganeso, zinc y níquel



Anexo 20. Matriz de consistencia

1.- Problema	2.- Objetivos	3.- Hipótesis	4.- Variables	5.- Metodología
<p>Descripción del problema.</p> <p>Por la actividad minera que se realiza, se evidencia que los efluentes de mina producto de las actividades mineras son aguas ácidas causados por un proceso natural de oxidación de los sulfuros, causados por el drenaje, bombeo y aguas del deshielo tienen un pH bajo y altas concentraciones de metales pesados tóxicos como Fe, Cu, Al, Mn, Zn y otros, vertidos al medio ambiente sin tratamiento alguno contaminan las cuencas, ríos lagunas a la fauna, flora, aguas superficiales y subterráneas.</p> <p>Formulación de problema</p> <p>¿Cuáles son las caracterizaciones y el diseño de tratamiento de los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno?</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Evaluar la caracterización y el diseño de tratamiento de los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la caracterización de los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada - Puno. • Determinar la técnica de tratamiento que se emplea en los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno. • Diseñar la planta piloto de tratamiento a emplearse en los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno 	<p>Hipótesis general</p> <p>La contaminación ambiental en la zona de estudio es muy alta de acuerdo a la caracterización y el diseño de tratamiento de los efluentes de aguas ácidas porque no cumplen con los estándares de calidad ambiental para agua categoría 3, riego de vegetales y bebida de animales en la mina La Rinconada – Puno.</p> <p>Hipótesis específico</p> <ul style="list-style-type: none"> • De acuerdo a la caracterización de los efluentes de aguas ácidas poseen un bajo pH y su exposición es generadora de acidez en la mina La Rinconada – Puno. • La técnica de tratamiento por neutralización con cal, neutraliza la acidez en los efluentes de aguas ácidas en la mina La Rinconada – Puno. • Con la adecuada caracterización de los efluentes de aguas ácidas es posible diseñar la planta piloto de tratamiento en la mina La Rinconada – Puno. 	<p>Variable independiente</p> <p>Las aguas ácidas de los efluentes de la mina La Rinconada.</p> <p>Variabes dependientes</p> <p>Neutralización</p> <p>Variable interviniénte</p> <p>pH.</p>	<p>El diseño de investigación es experimental mediante las pruebas de jarras de neutralización con cal, en ese sentido la realización de las pruebas experimentales con técnica de activos que se fundamenta en un método químico que es un proceso de oxidación con álcalis (cal), se demostró la reducción de las concentraciones de los metales pesados disueltos, a través de los ensayos de neutralización, precipitación, decantación y sedimentación de los efluentes de la mina, lo que constituyó un procedimiento para la eliminación y/o mitigación de los metales pesados y que se encuentren dentro de los límites máximos permisibles y del D.S. N° 004-2017-MINAN. Para la categoría 3, riego de vegetales y bebida de animales.</p>