

**UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS**

**EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA  
EMPLEANDO RESIDUO AGROINDUSTRIAL, A NIVEL DE LABORATORIO -  
2021**

**PRESENTADO POR:**

**ALAN APAZA UMIÑA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**PUNO – PERÚ**

**2022**



Repositorio Institucional ALCIRA by [Universidad Privada San Carlos](#) is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional License](#).

**UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**  
**TESIS**

**EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA  
EMPLEANDO RESIDUO AGROINDUSTRIAL, A NIVEL DE LABORATORIO -  
2021**

**PRESENTADO POR:**

**ALAN APAZA UMIÑA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

  
: \_\_\_\_\_  
MSc JULIO WILFREDO CANO OJEDA

PRIMER MIEMBRO

  
: \_\_\_\_\_  
M.Sc. KATIA ELIZABETH ANDRADE LINAREZ

SEGUNDO MIEMBRO

  
: \_\_\_\_\_  
Dr. MILDER ZANABRIA ORTEGA

ASESOR DE TESIS

  
: \_\_\_\_\_  
M.Sc. ELVIRA ANANI DURAND GOYZUETA

Área: Ingeniería, Tecnología

Disciplina : Minería y Procesamiento de Minerales

Especialidad: Contaminación y Mitigación Ambiental Minero – Metalúrgica

Puno 25 de abril de 2022.

## DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación dedico a nuestro divino creador Dios a, quien me dio la fe, la fortaleza, la salud y la esperanza.

A mis queridos padres por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar, creer en mí y mis expectativas, Aretemio Apaza Vilca y Doris Umiña Ito.

A mis hermanos Balbin, Guido, Josue, Diana, por tenerme paciencia, enseñarme a luchar por mis seres queridos, los sueños que uno tiene no importando las circunstancias que uno pase en su vida, los sueño se pueden hacer realidad, por mostrarme lo bueno que es tener hermanos y siempre estar a mi lado en todo momento.

**Alan Apaza Umiña**

### AGRADECIMIENTO

- A la Universidad Privada San Carlos – Puno por brindarme la oportunidad de estudiar, formarme y ser un profesional.
- A mi asesora de tesis, M.Sc. Elvira Ananí Durand Goyzueta por su apoyo incondicional, por su esfuerzo y dedicación, quien, con su paciencia y su motivación durante mi permanencia en la universidad y sobre todo haber logrado que pueda terminar mi investigación con éxito.
- A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de esta Universidad, quienes nos exigieron e incentivaron cátedra en cátedra con sus amplias experiencias y sabias enseñanzas a seguir adelante y llegar a ser un profesional innovador.
- A todas las personas e instituciones que permitieron la culminación de la presente investigación, siendo muy importante por su exigencia, apoyo a mi hermano Balbin Apaza Umiña y también a mi amigo y compañero incondicional que siempre estuvo durante el desarrollo y culminación de esta investigación Jesús Huaraya Canllahui.

**Alan Apaza Umiña**

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTO	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ANEXOS	9
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>

### CAPÍTULO I

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>15</b>
<b>1.2. ANTECEDENTES</b>	<b>18</b>
<b>1.3. OBJETIVOS</b>	<b>23</b>

### CAPÍTULO II

#### MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

<b>2.1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>24</b>
<b>2.2. MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>34</b>
<b>2.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>35</b>

### CAPÍTULO III

#### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

<b>3.1. ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>36</b>
<b>3.2. TAMAÑO DE LA MUESTRA</b>	<b>38</b>

<b>3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS</b>	<b>38</b>
<b>3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES</b>	<b>50</b>
<b>3.5. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO</b>	<b>50</b>
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>91</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>101</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Volumen y peso de los materiales usados en el sistema en la etapa DAS-Ca	41
Tabla 2. Volumen y pesos de los materiales usados en el sistema en la etapa DAS-Mg	43
Tabla 3. Fechas de muestreo realizadas con sus respectivos códigos asignados por el laboratorio - LAS (Laboratorio Analíticos del Sur)	47
Tabla 4. Estadística de muestras emparejadas	51
Tabla 5. Prueba de muestras emparejadas	53
Tabla 6. Eficiencia, respecto a pH	55
Tabla 7. Eficiencia, respecto a la conductividad eléctrica	57
Tabla 8. Eficiencia, respecto a Sulfato	58
Tabla 9. Eficiencia, respecto a Dureza	59
Tabla 10. Eficiencia, respecto a SST	60
Tabla 11. Eficiencia, respecto a aluminio	61
Tabla 12. Eficiencia, respecto al arsénico	62
Tabla 13. Eficiencia, respecto a cadmio	63
Tabla 14. Eficiencia, respecto a cobre	64
Tabla 15. Eficiencia, respecto a cromo	65
Tabla 16. Eficiencia, respecto a hierro	66
Tabla 17. Eficiencia, respecto a Magnesio	67
Tabla 18. Eficiencia, respecto a Manganeso	68
Tabla 19. Eficiencia, respecto al mercurio	69
Tabla 20. Eficiencia, respecto a plomo	70
Tabla 21. Eficiencia, respecto a Zinc	71
Tabla 22. Resultado de la variación de pH en las 6 fechas	72
Tabla 23. Resultado de la variación de conductividad eléctrica en las 6 fechas	74
	5

Tabla 24. Resultado de la variación de sulfato en las 6 fechas	75
Tabla 25. Resultado de la variación de dureza en las 6 fechas	76
Tabla 26. Resultado de la variación de Sólidos totales en suspensión (SST) en las 6 fechas	78
Tabla 27. Resultado de la variación de aluminio en las 6 fechas	79
Tabla 28. Resultado de la variación de arsénico en las 6 fechas	80
Tabla 29. Resultado de la variación de cadmio en las 6 fechas	81
Tabla 30. Resultado de la variación de cobre en las 6 fechas	82
Tabla 31. Resultado de la variación de cromo en las 6 fechas	83
Tabla 32. Resultado de la variación de hierro en las 6 fechas	84
Tabla 33. Resultado de la variación de magnesio en las 6 fechas	85
Tabla 34. Resultado de la variación de manganeso en las 6 fechas	86
Tabla 35. Resultado de la variación de mercurio en las 6 fechas	87
Tabla 36. Resultado de la variación de plomo en las 6 fechas	88
Tabla 37. Resultado de la variación de zinc en las 6 fechas	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama del proceso convencional del tratamiento activo de drenaje ácido de mina	28
Figura 2. Variación de la concentración metálica en equilibrio con el hidróxido metálico	32
Figura 3. Ubicación de la zona de estudio	37
Figura 4. Diagrama de flujo del Sistema de Sustrato Alcalino (DAS)	40
Figura 5. Sistema de Sustrato Alcalino (DAS)	40
Figura 6. Filtro DAS-Ca	41
Figura 7. Medidas del Filtro DAS-Ca	42
Figura 8. Filtro DAS-Mg.	43
Figura 9. Medidas del Filtro DAS-Ca	44
Figura 10. Aspecto de agua a lo largo del tratamiento en el sistema DAS	47
Figura 11. Variación de pH	73
Figura 12. Variación de la conductividad	74
Figura 13. Variación de Sulfato	76
Figura 14. Variación de la Dureza	77
Figura 15. Variación de SST	78
Figura 16. Variación de Aluminio	79
Figura 17. Variación de Arsénico	80
Figura 18. Variación de Cadmio	81
Figura 19. Variación de Cobre	82
Figura 20. Variación de Cromo	84
Figura 21. Variación de Hierro	85
Figura 22. Variación de Magnesio	86
Figura 23. Variación de Manganeso	87
	7

Figura 24. Variación de Mercurio	88
Figura 25. Variación de Plomo	89
Figura 26. Variación de Zinc	90

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01. Matriz de consistencia	102
Anexo 02. Panel fotográfico de la zona de estudio y toma de muestra	103
Anexo 03. panel fotográfico de la preparación del sustrato alcalino	105
Anexo 04. Panel fotográfico módulo del sistema das	107
Anexo 05. Panel fotográfico módulo del sistema das	108
Anexo 06. Panel fotográfico de toma de muestras y envío a laboratorio	110
Anexo 07. Constancia de disposición de residuos	117
Anexo 08. Límites Máximos Permisibles DS. N° 010-2010 MINAM.	118
Anexo 09. ECA-Categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales D.S 004-2017-MINAM	118
Anexo 10. Tablas completas de resultados de eficiencia de parámetros analizados en la investigación	119

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

**D.S.:** Decreto Supremo.

**DAM:** Drenaje ácido de Mina

**DAR:** Drenaje ácido de rocas

**DAS:** Sustrato alcalino disperso

**DAS-Ca:** Sustrato alcalino disperso cálcico

**DAS-Mg:** Sustrato alcalino disperso magnésico

**DIGESA:** Dirección General de Salud Ambiental

**ECA:** Estándar de calidad ambiental.

**LMP:** Límites Máximos Permisibles.

**MINAM:** Ministerio del Ambiente

**MINEM:** Ministerio de Energía y Minas.

**mg/L:** Miligramos por litro

**mS/cm:** Milisiemens por centímetro

**NFOL:** Laguna natural oxidante de hierro

**pH:** Potencial Hidrógeno

**P1:** Punto 1 de Muestreo

**P2:** Punto 2 de Muestreo

**P3:** Punto 3 de Muestreo

**P4:** Punto 4 de Muestreo

**SST:** Sólidos Totales en Suspensión

## RESUMEN

La presente investigación titulada “Eficiencia en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial, a nivel de laboratorio – 2021”, tuvo como objetivo principal evaluar la eficiencia del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial a nivel de laboratorio, donde se utilizó el modelo estadístico T- Student de muestras relacionadas. El trabajo es de enfoque cuantitativo, tipo aplicada y un alcance explicativo en el diseño experimental. El sistema DAS se compone en etapa 1 DAS-Ca, con una composición 25% (v/v) de cáscaras de huevo como fuente de carbonato de calcio y 75% (v/v) de virutas de madera de pino; la etapa 2 DAS-Mg, con una composición 12,5% (v/v) de óxido de magnesio y 87,5% (v/v) de virutas de madera de pino. El sistema de tratamiento operó con un caudal de 1.5 L/día, con un tiempo de retención total del sistema de 10 días. El resultado, en el DAM fue caracterizado de acuerdo a los siguientes parámetros iniciales: pH (2.85); CE (2,378 mS/cm), sulfato (1575 mg/L), dureza (507 mg/L), SST (4.5 mg/L), Aluminio 45.7 mg/L; Arsénico; Cadmio 1.2967 mg/L; Cobre 2.054 mg/L; Cromo 0.01704; hierro 132 mg/L; Magnesio 28.53 mg/L; Manganeso 70.208 mg/L; Mercurio 0.00041 mg/L; Plomo 1.685 mg/L; Zinc 10 mg/L. Los datos obtenidos en el efluente del DAS, valieron para determinar la eficiencia de los parámetros, reportando los siguientes resultados, tanto para la etapa 1 y etapa 2: Ph (8,21) aumento ; CE (5.27) aumento; Sulfato (2963 mg/L) ; Dureza 2755 mg/L ; SST, 80%. Además, se analizaron los siguientes metales: Aluminio 99.9%; Arsénico 99.87; Cadmio 99.96%; Cobre ,99.9 %; Cromo 97%; Hierro 99.2%; Magnesio 221.47 mg/L; Manganeso 99.06%; Mercurio 9.76 %; Plomo 99.8 %; Zinc 96.7%. Se llegó a la conclusión que el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial es significativamente eficiente a nivel de laboratorio.

**Palabras claves:** Carbonato, calcio, cáscara de huevo, residuo, sistema, tratamiento.

## ABSTRACT

The present research entitled "Efficiency in the treatment of acid mine water using agro-industrial waste, at laboratory level - 2021", had as main objective to evaluate the efficiency of the Dispersed Alkaline Substrate System (DAS) in the treatment of acid mine water using agro-industrial waste at laboratory level, where the T-Student statistical model of related samples was used. The work has a quantitative approach, applied type and an explanatory scope in the experimental design. The DAS system is composed in stage 1 DAS-Ca, with a composition 25% (v/v) of eggshells as a source of calcium carbonate and 75% (v/v) of pine wood chips; stage 2 DAS-Mg, with a composition 12.5% (v/v) of magnesium oxide and 87.5% (v/v) of pine wood chips. The treatment system operated at a flow rate of 1.5 L/day, with a total system retention time of 10 days.

The result in the DAM was characterized according to the following initial parameters: pH (2.85); CE (2,378 mS/cm), sulphate (1575 mg/L), hardness (507 mg/L), SST (4.5 mg/L), aluminium 45.7 mg/L; arsenic; cadmium 1.2967 mg/L; copper 2.054 mg/L; Chromium 0.01704; iron; 132 mg/L; Magnesium 28.53 mg/L; Manganese 70.208 mg/L; Mercury 0.00041 mg/L; Lead 1.685 mg/L; Zinc 10 mg/L. The data obtained in the effluent of the DAS were valid to determine the efficiency of the parameters, reporting the following results, both for stage 1 and stage 2: Ph (8.21) increase ; CE (5.27) increase; Sulfate (2963 mg/L) ; Hardness 2755 mg/L ; SST, 80%. In addition, the following metals were analyzed: Aluminum 99.9%; Arsenic 99.87%; Cadmium 99.96%; Copper ,99.9%; Chromium 97%; Iron 99.2%; Magnesium 221.47 mg/L; Manganese 99.06%; Mercury 9.76%; Lead 99.8%; Zinc 96.7%. It was concluded that the Dispersed Alkaline Substrate System (DAS) in the treatment of acidic mine waters using agro-industrial waste is significantly efficient at the laboratory level.

**Keywords:** Carbonate, calcium, eggshell, waste, system, treatment.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso limitado, único e imprescindible para la vida en conjunto porque permite la interacción y funcionamiento de los diferentes ecosistemas, es por ello que se debe brindar un cuidado cuantioso y racional a dicho recurso , ya que en el planeta el 70% de su superficie está constituida por agua con una disponibilidad anual de 1,386 millones km<sup>3</sup> aproximadamente en el mundo de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es dulce que se encuentra en los distribuida en lagos, lagunas, ríos, glaciares, en la atmósfera y el subsuelo (Fuentes, 2021).

La minería ha desempeñado un papel importante en la historia y el desarrollo económico de muchas naciones a lo largo de los tiempos. Sin embargo, como toda actividad productiva, ha tenido una importante influencia negativa en el medio ambiente. Cuando se realiza la extracción de metales o carbón, uno de los problemas más graves que se plantean es la formación de drenaje ácido de mina, que se crea cuando los sulfuros metálicos se oxidan en presencia de oxígeno y agua del entorno.

Ya generado el drenaje ácido de minas, el proceso de su formación es cíclico e irreversible que puede durar años o décadas hasta que se elimina uno de los principales agentes responsables del mismo. Además, es costoso y difícil de controlar, y los efectos de la contaminación son duraderos, ya que afectan a las aguas subterráneas y superficiales al reducir el pH, provocar la disolución de metales pesados en el agua y hacer que las partículas en suspensión se acumulen y depositen en el agua (Jiménez, 2000).

Debido a lo anterior, esta investigación se centró en la evaluación de la eficiencia del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina

utilizando residuo agroindustrial a nivel laboratorio. Se determinó la eficiencia de los residuos agroindustriales utilizados en el tratamiento de las aguas ácidas de mina en el DAS, así como la variación de los valores de los parámetros fisicoquímicos del agua ácida de mina a lo largo del proceso de tratamiento en el DAS empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgO}$ .

Este trabajo de investigación se divide en cuatro capítulos: El primer capítulo se plantean los problemas: Introducción. Problema: general y objetivo; Antecedentes: Internacional y nacional; Objetivos, general y específicos. El Segundo capítulo presenta la revisión literaria mostrando conceptos, información teórica de temas; planteamiento de la hipótesis. Tercer capítulo se desarrolla la metodología empleada para la investigación, zona de estudio población y muestra; tipo y diseño de la investigación. Cuarto capítulo se muestran la exposición y análisis de los resultados; terminando con conclusiones y recomendaciones.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua se considera uno de los recursos de abundancia mayor e importante para el desarrollo de vida en la Tierra, encontrándose en diferentes estados, distribuidos en aguas superficiales, subterráneas y en la estructura de cada una de las maneras de vida siendo indispensable para el desarrollo de los ecosistemas.

La minería, por siglos, conformó parte de la historia y desarrollo económico de las naciones. No obstante, como cualquier actividad provechosa vino generando monumentales impactos en el medio ambiente. Uno de los más importantes inconvenientes originados en la minería de metales y carbón es la formación de drenaje ácido de minas (Blight, 2011); el drenaje ácido de minas se crea cuando los sulfuros metálicos, en particular los sulfuros de hierro como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), se oxidan en presencia de agua y oxígeno atmosférico. Uno de los aspectos más relevantes de la DAM referente a los efectos de la minería es que su producción es recurrente e irreversible, durando años o décadas a menos que se suprima uno de los principales agentes responsables de la misma (Chaparro, 2015).

Prevenir y remediar el drenaje ácido es más difícil tras el cierre de una mina que cuando está en funcionamiento, ya que conlleva grandes costes y dificultades técnicas para recuperar los recursos dañados, es decir, el suelo y agua (Kirschbaum et al., 2012).

En nuestro país, el subsector minero ha sido catalogado regularmente como el sector industrial más contaminante en cuanto a las masas de agua subterráneas y superficiales, sobre todo en cuanto a las cargas contaminantes de metales pesados y otros contaminantes emitidos al medio ambiente (Neira & Chambilla, 2019)

El vertido de efluentes no tratados o insuficientemente tratados de las empresas mineras abandonadas y en funcionamiento es una fuente importante de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en la zona de Puno. (Zavala & Guerrero, 2006)

El agua que lixivia relave minero metalúrgico de la planta de beneficio Tiquillaca, UNA –Puno, considerado relave que se encuentra en un estado de costra superficial (por resequedad), en consecuencia se produce erosión, lixiviación del mismo y este finalmente por acción del viento es transportado a diferentes biotopos llegando a la conclusión que se tiene un riesgo ambiental por el relave del CIP Tiquillaca como pasivo ambiental en estado inactivo; obteniendo como resultado en base a los ya mencionados dos impactos significativos negativos y un impacto negativo moderado relevante; las muestras de agua fueron sometidas a análisis fisicoquímicos; los resultados indican que el agua contiene un nivel alto de acidez que deriva de la lixiviación, meteorización y oxidación de los sulfuros metálicos los cuales son captador en dos pozas dispuestas en serie; si bien el impacto es moderado relevante, los niveles de toxicidad que drenan hacia el subsuelo donde hay las pasturas y la proximidad del río Challamaya (Juárez, 2020).

En el caso de las aguas ácidas que drenan de la pozas de acumulación, no se ajustaría a los valores establecidos en las normas legales aplicables (LMP para el vertido de efluentes líquidos de ocupaciones minero-metalúrgicas D.S N° 010-2010-MINAM y ECAS

para el Agua D.S N° 004-2017-MINAM, Categoría 3 - Bebida de Animales ), debido a la presencia de índices de concentración de metales pesados que esta contiene y a los efectos sobre el medio ambiente causados por el drenaje de agua de calidad mala sin ningún tipo de tratamiento.

Esta investigación se llevó a cabo para la remoción de metales pesados del drenaje ácido de las minas mediante el tratamiento de tipo DAS utilizando residuos agroindustriales (cáscara de huevo) como sustituto de la calcita, con el objetivo de reducir la contaminación por metales pesados y mejorar la calidad del agua, evitando así los daños medioambientales.

### **1.1.1 PROBLEMA GENERAL**

¿Será eficiente el tratamiento de aguas ácidas de mina mediante el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial, a nivel de laboratorio 2021?

### **1.1.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS**

¿El residuo agroindustrial será una alternativa eficiente para sustituir la calcita en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS), a nivel de laboratorio - 2021?

¿Cómo varían los valores de los parámetros físico químicos del drenaje ácido de mina (DAM) a lo largo del tratamiento en el sistema Sustrato Alcalino Disperso (DAS) empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$ , a nivel de laboratorio - 2021?.

## 1.2. ANTECEDENTES

### 1.2.1. A NIVEL INTERNACIONAL

Larraguibel (2020), define al Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) como una tecnología pasiva de remediación robusta mostrando elevados niveles de rendimiento en el tratado de DAM, y en su investigación optimiza la utilización de witherita ( $\text{BaCO}_3$ ) como material reactivo en los tratamientos DAS que dan lugar a la retención de sulfatos. También han sido probados otros materiales carbonatados alternativas al de calcita. Se ha validado que las conchas marinas son sustitutos adecuados de la calcita en la fase  $\text{CaCO}_3$ -DAS. Durante los primeros seis meses de manejo, las columnas de la fase  $\text{BaCO}_3$ -DAS alcanzaron una concentración de sulfato inferior a 500 mg/L a la salida del sistema, desde los 1234-2468 mg/L iniciales.

Becerro et al (2019), sostienen que en el sistema de sistema Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS), Al añadir polvo de óxido de magnesio como reactivo para remover componentes tóxicos de nivel potencial, la mayoría de los contaminantes disueltos en el lixiviado ácido fueron precipitados e inmovilizados. De hecho, durante los primeros 20 días de experimento, el procedimiento propuesto obtuvo porcentajes de remoción cercanos al 100% para  $\text{PO}_4$ , F, Fe, Zn, Cu, Al Cr y U. Así como porcentajes de supresión en torno al 90% para As, a lo largo de los primeros 5 días.

Cisneros (2017), da a conocer una propuesta de metodología de un procedimiento pasivo Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS), en el experimento se utilizó óxido de magnesio y cáscara de huevo de un nivel técnico como sustratos alcalinos. Se llevó a cabo a nivel de laboratorio, y el sistema consistió en dos columnas conectadas en serie, y una piscina de sedimentación intermedia con un caudal tratado de un litro por día, que funcionó durante un período de retención de ocho días; obteniendo una eficiencia de

remoción de metales: Al (95,8-98,7%), Cu<sup>2+</sup> (97,6-99,3%), Fe<sub>T</sub> (99,8%), Fe<sup>3+</sup> (99,6%), Fe<sup>2+</sup> (99,9%) Mn<sup>2+</sup> (93-94,4%), Ni<sup>2+</sup> (97,8-100%), y Zn<sup>2+</sup> (90,6-99,8%).

Larraguibel (2017) nos sugiere que el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) es una excelente opción para purificar las aguas ácidas porque combina un material inerte de grano grueso que proporciona una buena permeabilidad al sistema con un material reactivo de grano fino el cual incrementa el pH del agua y provoca la precipitación de metales, lo que constituye una excelente opción para purificar las aguas ácidas. Como objetivo de esta investigación es exponer una opción a la utilización de la calcita del en el sistema DAS, como alternativa a la calcita, se eligieron tres materiales reactivos sustentables: conchillas de almejas, choritos y cáscara de huevo. Los resultados de las columnas de laboratorio tipo DAS han generado resultados alentadores en cuanto a la eficacia de estos materiales reactivos alternativos, concluyendo que las conchillas marinas son una buena opción a la calcita para el sistema DAS.

Guayasamín (2016), da a conocer que su investigación se hizo para evaluar el funcionamiento de la implementación de un tratamiento tipo Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS), con la intención de cotejar la eficiencia obtenida para la remoción de metales divalentes como Fe<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> y Co<sup>2+</sup> además de metales trivalentes como Fe<sup>3+</sup> y Al<sup>3+</sup>; tratando un flujo de 1,8 L/día, con resultados logrados que indican un crecimiento del pH hasta 7,59 y 9,17 para el DAS-Ca y DAS-Mg correspondientemente, suficientes valores para causar la remoción total para la mayor parte de metales con valores mayores al 95,0 %; Una vez clasificados, los residuos creados pueden considerarse no peligrosos para el medio ambiente y no necesitan ningún tipo de previo tratamiento preparatorio antes de ser eliminados en cualquier tipo de vertedero.

Kastyuchik et al.,(2016), indica en su estudio que el uso de residuos agroalimentarios y subproductos industriales que vienen a ser ricos en carbonato cálcico u óxidos e hidróxidos de calcio resulta atractivo como una caliza alternativa. Estudiaron el impacto

de la suma de 5 tipos diferentes de enmiendas alcalinas. Realizaron 2 series de experimentos de laboratorio sobre los relaves de minas de sulfuro (SMT) para evaluar el uso de residuos de cáscaras de huevo procedente de la gallina (CES) solos o en mezcla con agentes neutralizadores para neutralizar la acidez y evitar la movilización de oligoelementos en la SMT; esta investigación demostró que las muestras de residuos enmendadas con óxido de magnesio o cemento tienen un nivel alto de amortiguación y resistencia a la re-acidificación antropogénica que las muestras de residuos enmendadas con CES, CAL o DOL.

Sgier et al.,(2015), describen el diseño de una planta de tratamiento pasivo con base en las propiedades fisicoquímicas del DAM de la mina Monte Romero. Dicha planta fue diseñada con el objetivo de ajustarse a las limitadas condiciones topográficas de la superficie. Su capacidad permitiría manejar 2 L/seg (172,8 m<sup>3</sup>/día) de DAM. Dependiendo de las características del DAM a tratar, es posible modificar este diseño para su uso en diversas fuentes de contaminación, así como en diferentes lugares. El diseño fue llevado a cabo para que, en ningún instante a lo largo de futuras tareas de aseo, el DAM fluya de manera directa al cauce natural, puesto que al estar estructurado en 2 subtanques paralelos equivalentes que trabajan independientemente, el sistema seguiría funcionando cuando se limpie uno de los subtanques.

Choi y Lee (2015), analizan en su investigación la utilización de cáscaras de huevo calcinadas y microalgas para la supresión de metales pesados del drenaje ácido de minas (DAM) y el crecimiento simultáneo de la productividad de la biomasa. En los resultados presentó que la productividad de la biomasa incrementó a ~8,04 veces sobre su la inicial concentración de 0,367 g/L, medida por un fotobiorreactor de panel óptico (OPPBR) y tuvo una transmitancia de luz del 95 % a una profundidad de 305 mm. Por otro lado, la supresión simultánea del porcentaje de Fe, Cu, Zn, Mn, As y Cd, se localizó que el efluente del DAM era del 99,47 al 100 %. Los resultados indican que el sistema

híbrido con cáscaras de huevo calcinadas y las microalgas han sido bastante eficaces para la supresión de metales pesados en la DAM.

Caraballo et al.,(2010) , señalan en su investigación que varios de los sistemas de tratamiento pasivo presentan graves inconvenientes de obstrucción o pérdida de reactividad una vez que se está expuesto al DAM con altas concentraciones de metales. Para superar todos dichos inconvenientes desarrollaron el Sustrato Alcalino Disperso (DAS) basado en una combinación de virutas de madera y un sustrato reactivo alcalino. Dicho sistema estuvo funcionando a lo largo de 20 meses con un flujo medio de entrada de 0,5 L/s. El sistema eliminó una acidez neta media de 1500 mg/L como  $\text{CaCO}_3$  del agua de entrada y consiguiendo una relativa supresión del 100% de Al, As, Cu, Pb, Cd y V, el 40% de Fe y el 15% de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

### 1.2.2. A NIVEL NACIONAL

Sánchez y Sánchez (2018) afirman en su investigación a escala experimental del sistema de tratamiento pasivo Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) Utilizando arena caliza como material reactivo para retener metales trivalentes y óxido de magnesio (MgO) para los metales divalentes, se demostró que era posible reducir significativamente la concentración de metales en 8 horas y 17 minutos, aumentar el pH de 2,02 a 7,2 y 7,34, y una disminución significativa de las características esenciales de la DAM, disminuyendo así la conductividad eléctrica e indicando una reducción de la cantidad de metales existentes en el efluente.

Zevallos (2016) en su estudio nos muestra que, las muestras de agua analizadas indican condiciones de acidez con un pH que oscila entre 4,38 y 4,25 y la conductividad eléctrica es menor conforme el pH aumenta, lo que indica que a medida que disminuye el pH se disuelven sales que liberan al medio acuoso sus iones respectivos.

Bejarano et al, (2016) determinó la influencia del tamaño de partícula de pectina de naranja (*Citrus sinensis*) y el tiempo de contacto en la disminución del contenido de hierro en aguas ácidas de los relaves mineros procedentes del centro minero de Quiruvilca, Departamento de la Libertad, cuya concentración inicial de Fe fue de 540,52 ppm. Tras someter los efluentes a los diferentes tratamientos, se obtuvo una mayor absorción del Fe con el mayor tamaño de partícula (malla # 50) y con el menor tiempo de contacto en agitación (4 horas), con una reducción del 54% con respecto a la concentración inicial de Fe. Concluyendo que se logra una considerable disminución del contenido de Fe en las aguas ácidas trabajando con un menor tiempo de contacto y un mayor tamaño de partícula de pectina.

### **1.2.3. A NIVEL LOCAL**

Jimenez, (2017) en su estudio de investigación determinó la eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización activo con lechada de Cal de la Unidad Minera Arasi – Puno, generado en el pie del Botadero Jessica. Los resultados obtenidos en la remoción de metales pesados en el efluente a nivel campo a un pH de 8.1, C.E de 5.14 mS/cm y O.D de 5.54mg/l arroja resultados de remoción de 99.96% de Al, 0 % de As, 99.7% de Be, 99.8% de B, 98.9% de Cd, 99.9% de Co, 99.9% de Cu, 99.5% Cr, 99.98% de Fe, 83.5% de Mg, 98.7% de Mn, 99.9% de Ni, 0% de Pb, 0% de Se, y 99.95% de Zn. En conclusión, al neutralizar el drenaje ácido con lechada de cal existe una eficiencia de remoción considerable de los parámetros físico químico e inorgánico.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la eficiencia del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial a nivel de laboratorio - 2021.

#### 1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la eficiencia de residuo agroindustrial usado en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS), a nivel de laboratorio - 2021.
- Analizar la variación de los valores de los parámetros físico químicos del agua ácida de mina a lo largo del tratamiento en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$ , a nivel de laboratorio - 2021.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1. MARCO TEÓRICO

##### 2.1.1. DRENAJE DE ÁCIDOS DE MINA (DAM)

DAM es la abreviatura de Drenaje Ácido de Minas. No existe una descripción precisa de la estructura que debe poseer un agua para ser clasificada como DAM, sin embargo se puede conceptualizar como un agua con un pH ácido y una alta concentración de metales disueltos (Larraguibel, 2017).

Los DAM se clasifican en dos tipos: antropogénicos y naturales. Aunque el DAM natural (conocidos también como DAR, Acid Rock Drainage) es poco común, el método por el que se produce no es diferente al del ADM antropogénico. Para que se considere un DAM, el agua debe tener una alta concentración de protones disueltos y su generación a través de un proceso de oxidación de sulfuros. Es en este punto donde se hace la distinción entre DAM antropogénico y natural, ya que el DAM natural sucede sin participación antropogénica donde la acidez liberada por los sulfuros se produce de forma natural, mientras que un DAM antropogénico es producido en un sector intervenido por el hombre donde se alteran las condiciones en las que se forman los sulfuros y debido a ese cambio se activa la oxidación (Larraguibel, 2017)

La acidez se genera cuando la oxidación de los minerales de sulfuro están expuestos al agua y aire, lo que provoca la producción de acidez, sulfatos y la separación de los metales. No todos los minerales de sulfuro son igualmente reactivos, y no toda la acidez se produce en proporciones iguales. También, no todos los minerales de sulfuro o las rocas que lo contienen son generadores de ácido. La tendencia de una muestra de roca a generar acidez neta está determinada por el equilibrio de los minerales productores de ácido (sulfuro) y consumidores de ácido (alcalinos) (MINEM, 2009).

La formación de DAM o DAR es un proceso que depende del tiempo que involucra procesos de oxidación química y biológica, así como fenómenos fisicoquímicos asociados como la precipitación y la encapsulación (MINEM, 2009), y también depende de la composición mineralógica del material, como indica (Larraguibel, 2020) En tal sentido, cada sustancia tiene la capacidad de crear acidez (PA) así como la capacidad de neutralizar la acidez (PN). Esto puede pensarse alternativamente como la capacidad de un material para liberar protones ( $H^+$ ) e hidróxido ( $OH^-$ ); en un sentido simplificado, la PA está determinada por la presencia de sulfuros y metales que se hidrolizan, mientras que la PN está determinada por la presencia de silicatos y carbonatos. La disposición de los ingredientes, así como la interacción entre PA y PN, vendrá a ser determinante para la viabilidad del desarrollo de la DAM (Larraguibel, 2017).

### **2.1.2. CLASIFICACIÓN DE DRENAJE ÁCIDOS DE MINA**

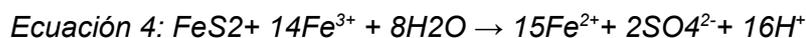
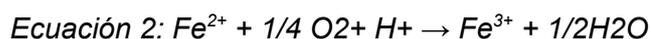
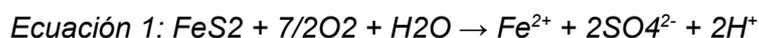
El DAM es conformado cuando sucede la oxidación de sulfuros minerales, como la marcasita, piritita y la pirrotita, entre otros, cuando tienen contacto con el oxígeno del aire o del agua, y esto depende de una serie de factores a la hora de clasificar el drenaje minero, por lo que tienen la opción de clasificar el drenaje según su pH y la potencial acidez o alcalinidad de los minerales presentes en el drenaje: Ácido  $< 6$  (Acidez generada por oxidación de minerales, particularmente de sulfuros). Alcalino  $> 9$  o  $10$  (Alta alcalinidad generada por disolución de minerales básicos, particularmente óxidos,

hidróxidos y algunos silicatos), Casi neutro 6-9 o 10 (Dependiendo de la abundancia de los minerales y Otros Irrelevante (Podría afectar la concentración de metales) (Aduvire, 2006).

### 2.1.3. FORMACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDOS DE MINA

La oxidación de la pirita incrementa el proceso para que así se forme agua ácida. Una vez que el mineral se expone a los procesos de excavación, su exposición aumenta, dando lugar al mencionado impacto gracias al contacto de la pirita con el oxígeno; ciertos efectos tienen el potencial de influir en la producción, entre los que destacamos el volumen, el tamaño de grano, la concentración, y la distribución espacial de la pirita (Pamo et al., 2002, p. 202).

El análisis que se muestra a continuación estima a la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), y es el sulfuro más común en la mayor parte de los yacimientos minerales. La liberación de acidez (proceso de formación del DAM) desde pirita pasa por etapas, las cuales tenemos la posibilidad de ver detalladas en las ecuaciones siguientes (Larraquibel, 2020).



### 2.1.4. FACTORES CONTRIBUYENTES EN LA FORMACIÓN DEL DAM

La dinámica del drenaje ácido de minas en el medio ambiente es complicada y puede considerarse como un componente de los ciclos biogeoquímicos, que incluyen una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos, ya sean antropogénicas o naturales (Guayasamín, 2016).

Una variable crítica es la velocidad de reacción, ya que un proceso lento, influencia en el medio es estimado despreciable. Sin embargo, la cuestión se agrava cuando los residuos

Líquidos ácidos se generan a gran velocidad y contaminan el medio ambiente (Aduvire, 2006)

La formación de la DAM es un proceso que depende del tiempo y en el que intervienen procesos de oxidación química y biológica, así como fenómenos fisicoquímicos asociados como la precipitación y la encapsulación, que consiste en atrapar óxidos y sulfuros que no se degradan al entrar en contacto con el agua y que, por tanto, continúan en el drenaje, dando lugar a la formación de nueva DAM cuando se rompe la molécula (Morales, 2018).

#### **2.1.5. EFECTOS AMBIENTALES DEL DAM**

El Drenaje Ácidos de Mina se puede tener en cuenta como un contaminante singular a causa de elementos tóxicos y descarga de acidez que tienen la posibilidad de exponerse cuando cesa la actividad minera. Su presencia perjudica a la flora y fauna, como también la vida acuática (Baldigo & Lawrence, 2001).

El impacto medioambiental más importante se produce en las masas de agua dulce, denominadas sistemas lóticos (ríos). La introducción de DAM en una masa de agua degrada los bicarbonatos presentes, reduciendo la función de taponamiento de la masa de agua y bajando el pH a entre 4-5, lo que provoca falla en el balance ácido-base de los organismos y la reducción de la diversidad de especies debido a la eliminación de las más susceptibles (Gray, 1997).

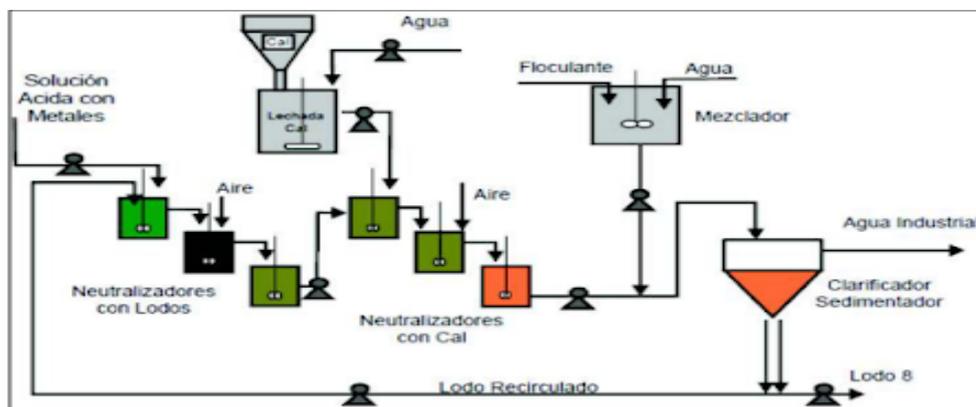
#### **2.1.6. TRATAMIENTOS DE REMEDIACIÓN DE DRENAJE ÁCIDOS DE MINA**

El tratamiento y/o remediación de DAM en el agua es un conjunto de procedimientos biológicos, químicos y físicos a tal manera que cambien de forma conveniente del agua contaminada. Los fluidos ácidos tienen un pH bajo, una alta concentración de sólidos disueltos y un alto contenido en metales (Pamo et al., 2002).

### 2.1.6.1. TRATAMIENTOS ACTIVOS

Esta técnica necesita un control continuo del sistema de electricidad, remoción de subproductos e insumos químicos (Chaparro, 2015). La figura 1 representa un esquema del proceso convencional de tratamiento activo de la DAM, destacando las operaciones unitarias o procesos fundamentales involucrados en este tipo de tratamiento.

La adición continua de aportes alcalinos, junto con los hidróxidos generados, provoca dificultades de corrosión en los sistemas de bombeo. Para solucionar este problema, es necesario diseñar un sedimentador al interior de la mina, antes de utilizar los residuos líquidos en un tratamiento (Calvo et al., 2013).



**Figura 1.** Diagrama del proceso convencional del tratamiento activo de drenaje ácido de mina.

Fuente : Cisneros (2017)

### 2.1.6.2. TRATAMIENTOS PASIVOS

El tratamiento pasivo se trata de los métodos que no necesitan una interacción humana continua, un mantenimiento rutinario o un funcionamiento. Los materiales de construcción naturales (rocas, arcillas y suelos) materiales naturales (estiércol, compost, virutas de madera, y residuos vegetales como paja). El agua se mueve a través de sistemas de tratamiento pasivo que utilizan el flujo por gravedad (Cisneros, 2017).

### **2.1.7. PREVENCIÓN Y CONTROL DE LOS DRENAJE ÁCIDOS DE MINA**

La formación de DAM puede anticiparse o regularse para que no tenga un mayor impacto; para ello es necesario mantener el control de la acidez generada y así minimizar el coste que representa al tratamiento posterior y los impactos asociados al medio ambiente; varias técnicas de control de DAM demostraron ser 100% efectivas debido a que reducen la acidez y evitan la disolución de metales (Guayasamín, 2016).

Como expresa (Johnson & Hallberg, 2005) , Para evitar el Drenaje Ácido de Minas se utilizan los siguientes tratamientos: inundación/sellado de la mina, almacenamiento de relaves bajo agua de residuos mineros, almacenamiento que se basa en tierra de los residuos sellados, mezcla de residuos, solidificación completa de los residuos, uso de surfactantes aniónicos y microencapsulación (revestimiento).

### **2.1.8. REMEDIACIÓN DE LOS DRENAJE ÁCIDOS DE MINA**

Con las desventajas de establecer un proceso que evite la formación de DAM, también es necesario minimizar su vertido en los cauces de los ríos y corrientes de río. En la mayoría de los casos, los tratamientos pueden clasificarse como activos o pasivos; ambos implican el uso de un material alcalino que neutraliza la acidez y disminuye la concentración de metales pesados; la diferencia entre ambos es la frecuencia con la que se utiliza el material alcalino pues en los tratamientos activos es requerida la aplicación continua de este material por lo cual el funcionamiento de grandes volúmenes estos resultan ser de un costo alto, en lo que en sistemas donde se tengan bajos flujos como es la situación de las minas en estado de abandono, los tratamientos pasivos tienen un resultado efectivo (Roy Chowdhury et al., 2015).

Como señala (RoyChowdhury et al., 2015), los métodos activos, por su parte, requieren una constante supervisión sobre el sistema, eliminación de subproductos, electricidad e

insumos químicos, mientras que los métodos pasivos, por el contrario, son una de las herramientas más atractivas para las empresas mineras, sobre todo durante las fases de abandono y desmonte, porque requieren una intervención humana mínima, en algunas ocasiones exigen el manejo de subproductos y no requieren el uso de electricidad o reactivos químicos.

### **2.1.9. SISTEMA TIPO SUSTRATO ALCALINO DISPERSO**

El tratamiento con sustrato alcalino disperso (DAS) es un sistema pasivo que mejora la calidad del agua sin utilizar reactivos sintéticos, ya que no necesita energía externa ni un mantenimiento recurrente (bastante frecuente). También es un método rentable para descontaminar el DAM (Sgier et al., 2015).

El sistema DAS se diseñó en respuesta a la insuficiencia de otros métodos para tratar la DAM que contiene altas concentraciones de metales, en particular de aluminio. Otro problema de los sistemas pasivos es pérdida de reactividad y problemas de obstrucción (Caraballo, Macías, Rötting, Nieto, et al., 2010).

El DAS es un proceso que utiliza un reactivo alcalino de grano fino en forma de arena caliza (DAS-caliza) o polvo de óxido de magnesio (magnesia cáustica; DAS-magnesia) combinado con una matriz inerte de grano grueso, como las virutas de madera. Debido a la rápida velocidad de disolución del reactivo de grano fino, éste tiene una alta reactividad, lo que mitiga una de las desventajas de la pasivación, que es la pérdida de reactividad. Debido al gran tamaño de los poros que concede la mezcla las virutas poseen una permeabilidad alta y así reducen los inconvenientes de saturación (Sgier et al., 2015).

#### **2.1.9.1. SISTEMA DAS-Ca**

El DAS-Ca es un filtro de lecho empaquetado que utiliza una combinación de 75-80% (v/v) de virutas de madera y 20-25% (v/v) de roca caliza como suministro de carbonato de

calcio. Este filtro posee un sobrenadante, y su altura debe examinarse en relación con el caso de tratamiento y su altura de estabilidad. Tras el tratamiento de este filtro, se instalan una o dos piscinas de decantación con oxidación en cascada (Caraballo, Macías, Rötting, Nieto, et al., 2010)

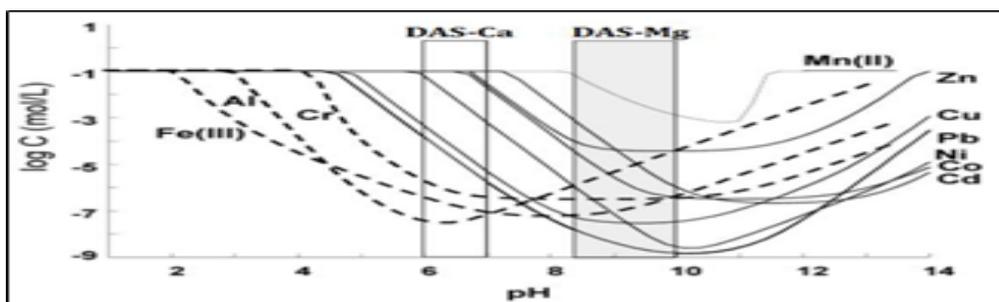
#### **2.1.9.2. SISTEMA DAS-Mg**

Al igual que el DAS-Ca, el DAS-Mg es un filtro de lecho compuesto por un 12,5 - 25% (v/v) de óxido de magnesio MgO y un 75-87,5% (v/v) de virutas de madera. El filtro produce un sobrenadante el cual su altura debe considerarse en relación con el tratamiento que se realiza y su altura de estabilidad asociada. Tras el tratamiento de este filtro, se instalan una o dos piscinas de decantación con oxidación en cascada (Rötting et al., 2008).

#### **2.1.10. SOLUBILIDAD DE HIDRÓXIDOS METÁLICOS**

En la Figura 1, indica la teórica solubilidad que poseen los hidróxidos metálicos bajo un DAS en funcionalidad del pH. Presentan las líneas lo menos de solubilidad para un valor de pH característico. Para la situación de metales trivalentes es observada la precipitación a valores de pH inferiores que para la situación de disolventes. Los rectángulos presentan los valores de operación de pH del sistema, como para el DAS-Ca, así también para el DAS-Mg (Cortina et al., 2003).

La solubilidad de los hidróxidos metálicos aumenta con el incremento de los valores de pH, especialmente en el caso de los metales divalentes, que precipitan a valores de pH superiores a 8,0. La forma "U" de la línea teórica indica una serie de metales, como el Zn y el Cr, los cuales son anfóteros, es decir son solubles tanto en situaciones ácidas y básicas (Guayasamín, 2016).



**Figura 2.** Variación de la concentración metálica en equilibrio con el hidróxido metálico.

Fuente: Cortina et al (2003)

## 2.1.11. PARÁMETROS FÍSICOS – QUÍMICOS

### 2.1.11.1. SST (SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES)

Como indica Jiménez (2000) , el agua puede incluir como partículas en suspensión y compuestos solubilizados. El total de ambos se denomina Sólidos Suspendidos Totales. Los SST son el material que queda en un filtro estándar después de filtrar una muestra de agua mezclada; dichos sólidos se secan a continuación a una temperatura de 103 - 105 °C (Garay et al., 2003).

### 2.1.11.2. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

El pH significa potencial de hidrógeno y se utiliza para detectar si alguna sustancia es básica, ácido o neutra. Se determina por la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una determinada escala que va de 0 a 14, donde 7 indica neutralidad. Los valores de pH inferiores a 7 indican que una sustancia es ácida, mientras que los valores de pH superiores a 7 nos indica que es básica. En el caso de que alguna sustancia sea neutra, tendría la misma cantidad de átomos de hidrógeno e hidroxilo. La acidez se produce cuando la cantidad de átomos de hidrógeno (H<sup>+</sup>) supera el número de átomos de oxidrilo (OH<sup>-</sup>) (DIGESA, 2005).

### 2.1.11.3. CONDUCTIVIDAD

La conductividad es una representación numérica de la capacidad que posee una solución para conducir una corriente eléctrica. Dicha capacidad va depender de su concentración en total y la presencia de iones, así como de su movilidad, concentraciones relativas y valencia, y también temperatura de medición.

### 2.2.11.4. DUREZA

Es otro método para referirse al contenido iónico de un agua, que hace referencia a la concentración total de iones de calcio, bario, estroncio y magnesio, pero los dos primeros son los responsables de la mayor parte de la concentración. La existencia de estos iones en el agua es casi siempre natural, y algunas veces es antropogénica (Jiménez, 2000).

### 2.1.11.5. SULFATO

El sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) es abundante en la naturaleza y es posible encontrarse en cantidades que van desde unos pocos hasta varios miles de miligramos por litro en los cursos de agua naturales. Los residuos del drenaje minero pueden producir volúmenes significativos de  $\text{SO}_4^{-2}$  como resultado de la oxidación de la pirita (DIGESA, 2005).

### 2.1.11.6. SULFUROS

Minerales que se encuentran conformados por el enlace de elementos metálicos y azufre, tales como el zinc, plomo, hierro, plomo y otros. La calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ , bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelina ( $\text{CuS}$ ) y enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) son los minerales sulfurados más frecuentes. Minerales que se encuentran conformados por el enlace entre el azufre y elementos metálicos, tales como el cobre, hierro, plomo, y zinc, entre otros. Los minerales sulfurados de cobre más comunes son calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ , bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelina ( $\text{CuS}$ ) y enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) (Guillen, 2017).

### 2.1.12. PARÁMETROS INORGÁNICOS

#### 2.1.12.1 METALES TOTALES

El término "metales totales" se refiere a la proporción de metales presentes en la solución y en las partículas en suspensión. Las concentraciones de metales totales nunca deben ser inferiores a las de los metales disueltos. Son todos los iones metálicos de una muestra no filtrada (Al, B, Ca, Mg, Ag, Ni, K, Si, Ba, Cd, Cr, Pb, Zn, Mn, Fe, Cu Hg y As) (SIARPUNO, 2016)

### **2.1.13. GENERALIDADES DE LA CÁSCARA DE HUEVO**

La cáscara de huevo es un material biocerámico conformado por dos fases: orgánica e inorgánica. Está compuesta por un 1,6 % de agua, un 95,1% de minerales, un 93,6 % de carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  en forma de calcita, un 0,8 % de carbonato de magnesio  $\text{MgCO}_3$ , un 0,73 por ciento de fosfato tricálcico  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  y, por último, un 3,3 % de MO (Fernández & Arias, 2000).

## **2.2. MARCO CONCEPTUAL**

### **SUSTRATO DAS**

Compuesto por un reactivo alcalino de grano fino, como arena caliza (DAS-caliza) o polvo de MgO (magnesia cáustica; DAS-magnesia) y una matriz inerte de grano grueso (por ejemplo, virutas de madera) (Sánchez & Sánchez, 2018).

### **AGUAS ÁCIDAS**

Las aguas ácidas de mina se producen cuando la pirita sufre una oxidación química y biológica. Cuando las rocas que contienen estos sulfuros entran en contacto con el aire o el agua, se produce este fenómeno. Además, el agua ácida derivada de las rocas y los minerales contiene varios metales en disolución, que contribuyen significativamente a la toxicidad del efluente (Condorchem Envitech, 2012).

### **RESIDUO AGROINDUSTRIAL**

Los residuos agroindustriales ofrecen un gran potencial de reutilización en diversos procesos, como el desarrollo de nuevos bienes, la mejora de los existentes y la recuperación de las condiciones ambientales modificadas (Corredor & Pérez, 2018).

### **ÓXIDO DE MAGNESIO**

Compuesto químico blanco formado por la combinación de salmuera residual con dolomita. El Grado Cáustico y el Doble Calcinado contienen más del 97% de óxido de magnesio y del 98,6% de óxido de magnesio, respectivamente. El Grado Eléctrico se produce por electrofusión y tiene cualidades superiores de aislamiento térmico y transmisión de calor (Peñoles, 2021).

### **CARBONATO DE CALCIO**

El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es un compuesto químico natural que es el componente principal de minerales y rocas como la caliza (La Atmósfera, 2021).

## **2.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.3.1. HIPÓTESIS GENERAL**

- El Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial es significativamente eficiente a nivel de laboratorio - 2021.

### **2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS**

- El residuo agroindustrial es una alternativa eficiente en la sustitución de calcita en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS), a nivel de laboratorio - 2021.
- Es significativa la variación de los valores de los parámetros físico químicos del DAM a lo largo del tratamiento en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$ , a nivel de laboratorio - 2021.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio de la investigación está localizado al Sur Oeste del departamento de Puno, en el centro poblado de "Sonsori", perteneciente a la comunidad de Paxa, distrito de Tiquillaca, en donde la planta concentradora y su cancha de relave del cual lixivian aguas ácidas hacia pozas con una dimensión de 8 de largo por 6 metros de ancho, los cuales están en dispuestos en serie, dicho lugar se encuentra a una altitud promedio de 3920 m.s.n.m., Según la carta de Puno 32-V y Pichacani 33-V (INGEMMET), está en las siguientes coordenadas UTM Norte: 82465663, Este: 372925, zona 19 S.

El acceso hacia la zona de investigación es a través de de la vía interoceánica de Puno - Juliaca, en la zona de Yanamayo se tiene el desvío de carretera afirmada que conduce de Puno a Tiquillaca, con una distancia de 20 km y de Tiquillaca a zona de estudio- planta concentradora CIP Tiquillaca de 7.5 km y el tiempo estimado de 1 hora aproximadamente.

La planta concentradora de Tiquillaca empezó a operar por primera vez en 1985. De enero 1985 a junio de 1990 la planta trató 1 023 804 TM., de mineral polimetálico (plata,

plomo y zinc); haciendo un promedio anual de 1 706 TM/año. A partir de esa fecha (1990) la planta se encuentra paralizada. Las consecuencias que produjo fueron el abandono total. En 1993 es entregada a la Universidad Nacional del Altiplano y se hace acreedora de las plantas de "Crucero" y "Tiquillaca", el 24 de marzo de 1993 por D.S. N° 025-PCM/93. Los trabajos que se realizan en la actualidad, es el mantenimiento, pruebas al vacío en forma esporádica y visitas técnicas por parte de docentes y estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y áreas afines, esto debido a la falta de energía eléctrica.

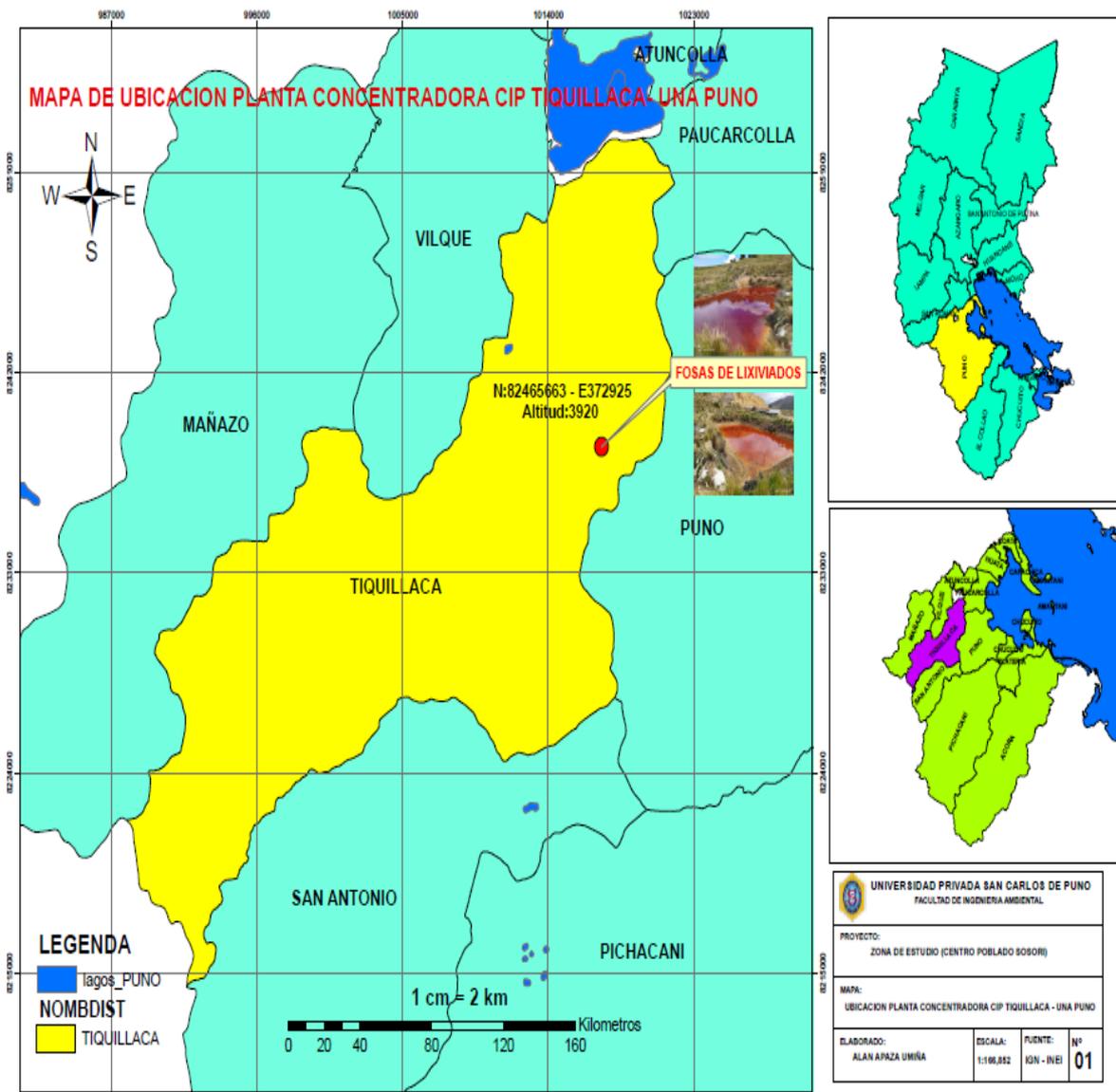


Figura 3. Ubicación de la zona de estudio

### **3.2. TAMAÑO DE LA MUESTRA**

#### **3.2.1. Población**

La población de la presente investigación son los efluentes de aguas ácidas generados por lixiviación de la cancha de relave de planta concentradora de la CIP Tiquillaca, el cual se encuentra a la intemperie sin ningún tipo de recubrimiento el cual pueda mitigar dicha lixiviación, más aún por la época de lluvias y estas discurren a una pozas las cuales no cuentan con la capacidad e impermeabilidad adecuadas permitiendo la infiltración y posible rebose, y esta pudiera impactar negativamente en el ambiente en especial en el río que pasa a muy poco metros de las pozas.

#### **3.2.2. Muestra**

Las muestras de agua ácida fueron obtenidas de las pozas en planta concentradora, en donde lixivian aguas ácidas de cancha de relave hacia dos pozas dispuestas en serie con una dimensión de 8m de largo por 6m de ancho; dichas muestras se almacenaron bajo condiciones de temperatura ambiente en recipientes de 20 L, y se envió al laboratorio donde se le asignaron el código para para realizar los análisis correspondiente, con el objeto de caracterizar la muestra del DAM y tener una dimensión clara de los niveles de contaminación que ésta tiene, previo al tratamiento; los parámetros analizados sirven además para efectuar cálculos analíticos y precisar los porcentajes de inmovilización de metales del sistema tipo sustrato alcalino disperso (DAS).

### **3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS**

#### **3.3.1. El método**

Para el cumplimiento de los objetivos específicos del proyecto de investigación se desarrolló con el siguiente procedimiento metodológico.

### 3.3.1.1. Objetivo específico 1: Obtención de fuente de carbonato de calcio

Para el sistema de tratamiento en esta investigación se usó cáscaras de huevo como fuente de carbonato de calcio. Se usó este sustrato alcalino ya que según estudios previos como (Fernández & Arias, 2000), indica que existe un 93.6% de carbonato de calcio en las cáscaras de huevo de gallina. Además, tiene un costo cero ya que pueden ser obtenidos como desecho de industrias, restaurantes, pastelerías etc.

Para la presente investigación, las cáscaras de huevos de gallina fueron obtenidas en casa, las cuales pasaron por un proceso antes de ser usadas en el filtro DAS-Ca, y se lo detalla a continuación:

- Como primer paso del proceso se retira la membrana interior que tienen las cáscaras, para evitar posibles interferencias en el tratamiento que pueden ser causadas por las proteínas de la membrana.
- Las cáscaras fueron secadas por tres a cuatro días a temperatura ambiente.
- Una vez secas, se procedieron a triturarlas hasta polvo en un molino.
- Por último, el polvo obtenido del proceso de molienda se ingresa en una estufa por dos horas a una temperatura de 105 °C, para eliminar posible presencia de salmonella y evitar un contagio biológico en el tratamiento de retención de metales.

### Instalación y Operación del Sistema Tipo Sustrato Alcalino Disperso

Se usaron dos recipientes o columnas de polipropileno, fueron instalados en serie con una piscina de sedimentación intermedia, el trasvase de agua ácida entre los recipientes ya sea de decantación o de filtro será tipo cascada por gravedad. El sistema de tratamiento fue operado con un caudal de 1.5 L/día, con un tiempo de retención total del sistema de 10 días.

Antes del ingreso del DAM al sistema de tratamiento DAS, se instaló una piscina NFOL de aireación natural inicial , como es caso de la piscina intermedia entre la etapa de

DAS-Ca y DAS-Mg, también se instaló una piscina al final del tratamiento. Ver figura 4 y 5.

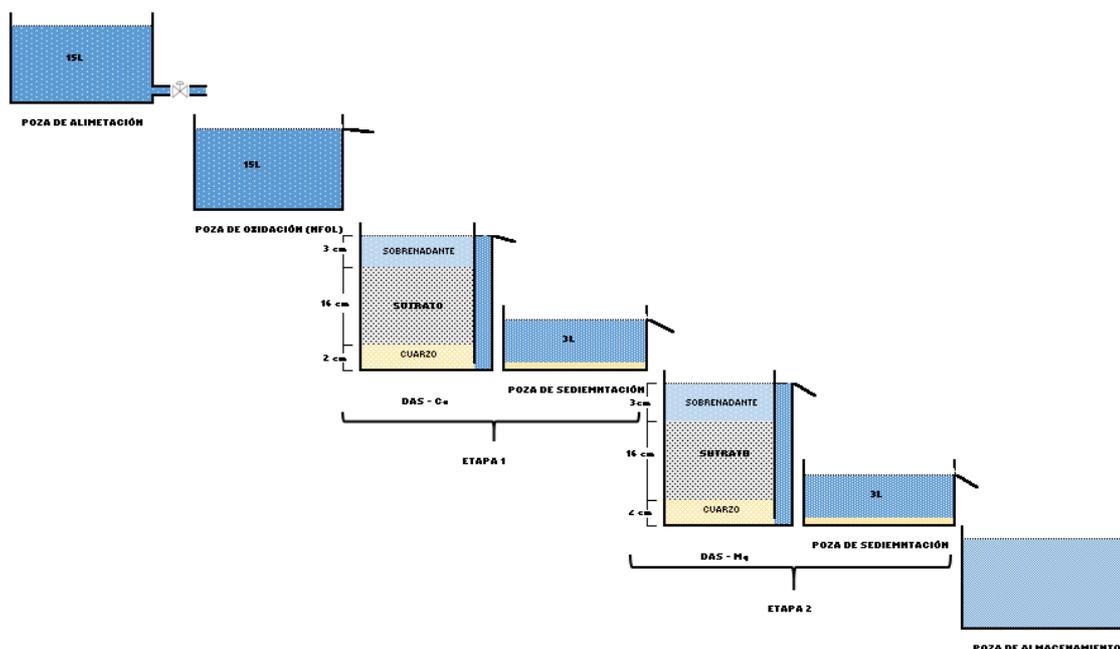


Figura 4. Diagrama de flujo del Sistema de Sustrato Alcalino (DAS)



Figura 5. Sistema de Sustrato Alcalino (DAS)

### a) Filtro DAS-Ca

En la etapa DAS-Ca consiste en un recipiente de 4.5 litros, dividido en dos partes; la primera parte tiene 3 L de volumen, conformado con una base de cuarzo (2 cm de altura), y el resto rellena con una mezcla que consta de un 75 % de virutas de madera de pino no mayor a 2 cm (2.25 L) y 25 % de cáscaras de huevo en polvo (0.75 L) como fuente de carbonato de calcio, ya que según estudios previos como ( Fernández y Arias, 2000) , indica que existe un 93.6% de carbonato de calcio en las cáscaras de huevo de gallina y la segunda parte consta de 1.5 litros para la salida del agua; teniendo un ingreso inferior y una salida superior que alimenta a la siguiente fase de la primera etapa, el cual consta de una poza de 3L con nombre experimental sedimentador, en el que será posible sedimentar los metales trivalentes como Fe y Al; asimismo, es aquí donde termina la primera etapa DAS-Ca, la composición y peso de los materiales y reactivo empleados en este filtro se detalla en la tabla 1.

**Tabla 1.** Volumen y peso de los materiales usados en el sistema en la etapa DAS-Ca.

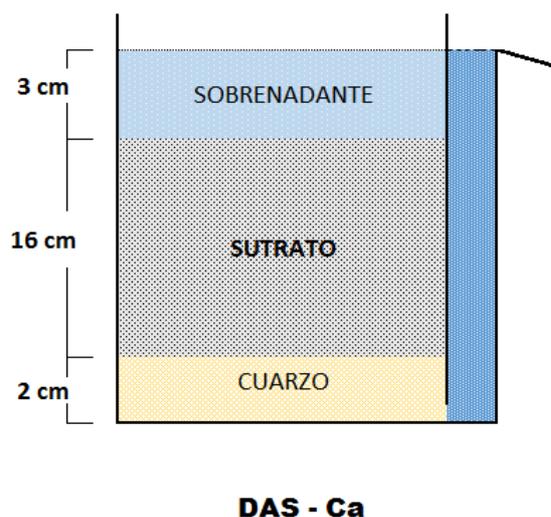
Material	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)
Cáscara de Huevo	750	546
Virutas de Madera	2250	150
Cuarzo	290	340



**Figura 6.** Filtro DAS-Ca

Las cáscaras de huevo en polvo y las virutas de madera de pino fueron combinadas con el fin de obtener un sustrato uniforme bien distribuido, en el cual se pueda dar un adecuado funcionamiento del sistema de tratamiento para retener metales. Las virutas de madera de pino proporcionan una buena conductividad hidráulica al sistema por su textura que posee, disminuyendo significativamente los problemas de pérdida de permeabilidad principalmente; mientras que, el pequeño tamaño de los granos del polvo de la cáscara de huevo proporciona una superficie específica, tal que disminuye la pasivación del material, significando un incremento en la capacidad de reacción del filtro.

El tiempo de retención en el cual funcionó este filtro fue de 3 días. Las dimensiones del filtro DAS-Ca se pueden observar en la Figura 7.



**Figura 7.** Medidas del Filtro DAS-Ca

El funcionamiento del filtro DAS-Ca, básicamente consiste en la adición de carbonato de calcio mezclado en composición volumétrica con virutas de madera, dicho sustrato proporciona un medio de precipitación de metales trivalente como el hierro férrico, aluminio, siendo posible su precipitación debido a la evacuación del pH a valores de 6 (Guayasamín, 2016).

### b) Filtro DAS-Mg

Para poder seguir con el tratamiento, el efluente de la primera etapa es conectado al filtro del sistema DAS-Mg y su ensamblaje, consiste en un recipiente de 4.5, dividido en dos partes; la primera parte tiene 3 L de volumen, conformado con una base de cuarzo (2 cm de altura), con la diferencia en su composición volumétrica con una mezcla que consta de un 87.5% de virutas de madera de pino no mayor a 2cm (2.625 L) y 12.5 % de óxido de magnesio (0.375 L) y la segunda parte consta de 1.5 litros para la salida del agua; teniendo un ingreso inferior y una salida superior que alimenta a la siguiente fase de la segunda etapa el cual consta de una poza de 3L con nombre experimental sedimentador, en el que será posible precipitar los metales divalente como el cobre, hierro soluble, níquel, zinc, entre otros. La precipitación de metales en este filtro es posible debido a que el sustrato alcalino usado óxido de magnesio (MgO) eleva el pH a valores de 8, potencial considerado óptimo en la precipitación de metales divalentes, la composición y peso de los materiales y reactivo empleados en este filtro se detalla en la tabla 2.

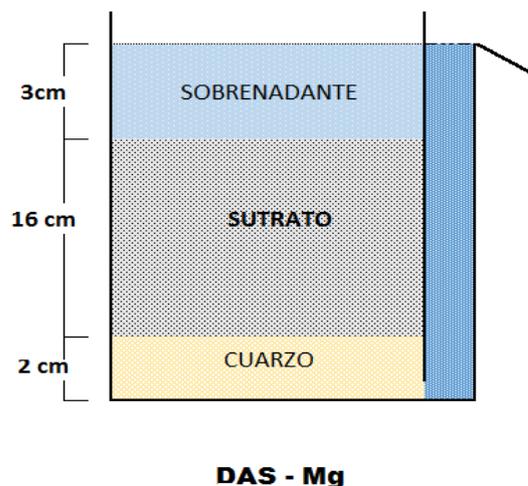
**Tabla 2.** Volumen y pesos de los materiales usados en el sistema en la etapa DAS-Mg

Material	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)
Óxido de Magnesio	375	32
Virutas de Madera	2625	150
Cuarzo	290	340



**Figura 8.** Filtro DAS-Mg.

El tiempo de retención en el cual funcionó este filtro fue de 3 días. Las dimensiones del filtro DAS-Mg se pueden observar en la Figura 9.



**Figura 9.** Medidas del Filtro DAS-Mg.

El efluente generado en este filtro es considerado como efluente del tratamiento, por lo que también se realizaron los respectivos análisis con el propósito de caracterizar el efluente, y determinar si es posible descargar a cuerpos de agua dulce.

El sistema DAS inició el tratamiento el jueves 08 de abril de 2021, la Figura 5 muestra el sistema que trató un caudal de 1.5 L/día con un tiempo de retención de 10 días, usando en total 140 litros de drenaje ácido de mina proveniente de planta concentradora del CIP –Tiquillaca en donde de la lixivian las aguas ácidas de la cancha de relave y se colectan en dos pozas. El tratamiento culminó el jueves 08 de julio de 2021, finalizando con el último muestreo (muestreo 6).

#### **Determinación de eficiencia del sistema tipo DAS**

La determinación de la eficiencia de remoción de metales fue analizada mediante la ecuación 5 en la cual intervienen las concentraciones iniciales Muestreo en el tratamiento, las concentraciones del punto P1-P2 (DAS-Ca) P3 y P4 (DAS-Mg) del tratamiento, es decir, el efluente final del sistema de tratamiento tipo DAS.

Ecuación 5 
$$Ef(\%) = \left( \frac{Ci - Cf}{Ci} \right) * 100$$

Donde:

$Ef$  = Eficiencia en %

$Ci$  = Concentración inicial

$Cf$  = Concentración final

### 3.3.1.2. Objetivo específico 2: Muestreo discrecional o por juicio

El método de muestreo discrecional (muestreo por juicio) es un método de muestreo no probabilístico. Los sujetos se seleccionan a base del conocimiento y juicio del investigador.

El investigador selecciona a los individuos a través de su criterio profesional. Puede basarse en la experiencia de otros estudios anteriores o en su conocimiento sobre la población y el comportamiento de esta frente a las características que se estudian.

#### a) Fase de campo

Las muestras del drenaje ácido de mina fueron obtenidas de las pozas de la planta concentradora CIP Tiquillaca de la UNA-PUNO, las cuales se almacenaron bajo condiciones de temperatura ambiente en envases de 20 L. considerando los criterios generales del Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales con R.J. N° 010-2016-ANA

#### b) Fase de laboratorio

**Caracterización, análisis de parámetros físico químicos y determinación de concentración de metales del drenaje ácido de mina.**

Las muestras se enviaron al laboratorio para ser analizadas, tomando en consideración los criterios generales del Protocolo Nacional para el Monitoreo de la

Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales con R.J. N° 010-2016-ANA., con el fin de caracterizar, analizar los parámetros físico químicos iniciales y determinar la concentración de metales del DAM y poder tener claro los niveles de contaminación que esta posee, antes al tratamiento, dicho datos nos servirán también para poder realizar los cálculos y poder establecer los porcentajes de remoción de metales del sistema de tratamiento tipo DAS, de esta forma se puede establecer la eficiencia de remoción del sistema de tratamiento propuesto en cada etapa y en su efluente final, todo esto usando material reactivo alternativo.

### **Límites Máximos Permisible utilizados en la evaluación de las aguas/ECA-Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales**

Para la evaluación de los parámetros físico químicos del agua se utilizó los Límites máximos permisibles (LMP) establecido para la descarga de efluentes líquidos de actividades Minero Metalúrgicas DS. N° 010-2010 MINAM ( ver anexo 7) y para valores no comprendidos en los LMP, tomándose como referencia el ECA-Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales D.S 004-2017-MINAM ( ver anexo 8) .

### **Caracterización de las muestras obtenidas a lo largo del tratamiento**

#### **Toma de muestras**

Se tomaron 24 muestras con un periodo de 15 días desde el inicio del tratamiento, hasta los tres meses en su término, en 4 puntos de muestreo de interés esto con el fin de poder determinar el comportamiento del sistema en la duración del tratamiento, 2 puntos en la etapa DAS-Ca, 2 puntos en la etapa DAS-Mg.

#### **Análisis de parámetros físico químicos y determinación de la concentración de metales**

Los análisis de parámetros se realizaron a las 24 muestras, con un intervalo de 15 días, en 4 puntos de interés, que se obtuvieron durante todo el tratamiento, fueron los mismos que se hicieron para la caracterización de la muestra inicial, con el objetivo de ver el comportamiento de cada parámetro en la línea del sistema de tratamiento a excepción

de algunos parámetros que con valores muy por debajo de los límites de detección y poder observar la evolución con el avance del tiempo durante la duración del tratamiento que fue de tres meses. En la figura 10, se puede observar el aspecto de las 4 muestras del tratamiento.

**Tabla 3.** Fechas de muestreo realizadas con sus respectivos códigos asignados por el laboratorio - LAS (Laboratorio Analíticos del Sur)

Fecha	Código de Muestras				
	P1	P2	P3	P4	
Inicio del tratamiento	08/04/2021	-	-	-	-
Muestreo 1	23/04/2021	AG21000293	AG21000294	AG21000295	AG21000296
Muestreo 2	08/05/2021	AG21000311	AG21000312	AG21000313	AG21000314
Muestreo 3	22/05/2021	AG21000411	AG21000412	AG21000413	AG21000414
Muestreo 4	08/06/2021	AG21000421	AG21000422	AG21000423	AG21000424
Muestreo 5	23/06/2021	AG21000510	AG21000511	AG21000512	AG21000513
Muestreo 6	08/07/2021	AG21000540	AG21000541	AG21000542	AG21000543



**Figura 10.** Aspecto de agua a lo largo del tratamiento en el sistema DAS

Los cuatro puntos de muestreo se denominan P1, P2, P3, y P4, donde:

- P1: de la piscina NFOL (laguna natural oxidante de hierro). Su muestra fue obtenida con un vaso de precipitado y colocada en una botella de muestreo proporcionada por el laboratorio.
- P2: efluente del DAS-Ca. Su muestra fue obtenida directamente a la salida del filtro, antes de que el efluente llegue a la poza de sedimentación.
- P3: es a la salida de la poza de sedimentación intermedia que se encuentra antes del DAS-Mg. La muestra fue obtenida por medio de una jeringa de 50ml y colocada en una botella de muestreo proporcionada por el laboratorio.
- P4: efluente del DAS-Mg, que a la vez es el efluente del sistema de tratamiento. La muestra fue obtenida en la poza de sedimentación a la salida. Las 24 muestras que se obtuvieron a lo largo del tratamiento fueron ingresadas al Laboratorio LAS (Laboratorios Analíticos del Sur), donde se les asignó un código del laboratorio, los códigos asignados para cada muestra se los puede observar en la Tabla 5.

## **Materiales, Reactivos y Equipos**

### **Materiales**

- Frascos de polietileno de boca ancha de 1 litro
- Recipientes de metacrilato de diferentes volúmenes.
- Bolsas plásticas, marcadores indelebles
- Etiquetas para la identificación de frascos y recipientes
- Cadena de custodia, lapicero, balde
- Cooler, guantes descartables, libreta de campo
- pH metro
- Vaso de precipitados de 1000 ml

**Reactivos**

- Ácido nítrico
- Óxido de magnesio
- Carbonato de calcio

**Equipos**

- GPS
- Cámara fotográfica
- Multiparámetro Hanna HI 9829
- Módulo de DAS
- Balanza Digital.

**Disposición de residuos generados**

En la presente investigación en una vez culminado los 3 meses de experimentación del tratamiento del sistema DAS, los residuos generados que comprenden los sustratos que forman parte de los filtros de la etapa 1 (DAS-Ca) y etapa 2 (DAS-Mg); residuos otros como guantes de nitrilo, papel toalla usados a lo largo del tratamiento y demás envases utilizados en el sistema se realizó su disposición final mediante la empresa EPS-RS PETRAMAS, con registro EPNG-737.12-DIGESA; esto a través de la EO-RS ECOCENTURY S.A.C., dicha empresa presta el servicio de recepción, de residuos sólidos peligrosos y no peligrosos para su correcta disposición y no causar algún inconveniente durante su disposición (Ver anexo 07).

**3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES**

Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología	Estadística
<b>Variable Independiente</b>	Proceso del sistema DAS	Desarrollo de un método pasivo DAS	Cuantitativo	
<b>Variable dependiente</b>	Características fisicoquímicas del agua ácida.	Metales totales removidos % Conductividad ((µS/cm) pH (0- 14) SST (mg/l) Sulfatos (mg/l)	Aplicada Experimental explicativo	Descriptivo- Analítico

**3.5. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO**

Para determinar la eficiencia del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial a nivel de laboratorio. Se utilizó el modelo estadístico T- Student de muestras relacionadas, por que se ha tomado la muestras en 2 tiempos diferentes, antes y después del tratamiento, donde se ha obtenido un nivel de significancia de dichos resultados, todo esto procesado con el IBM SPSS Statistics. Este programa otorga herramientas que permiten consultar datos y formular hipótesis de forma instantánea, detectar tendencias y ejecutar predicciones. A continuación, se mencionan los criterios que se consideraron.

### Formulación de la hipótesis estadística

**H1=** El Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial es significativamente eficiente a nivel de laboratorio - 2021.

**H0=** El Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial no es significativamente eficiente a nivel de laboratorio - 2021.

- Nivel de significancia = 5 % = 0,05  $\alpha$
- Prueba Estadística de normalidad de datos: T- Student
- Estimador:

Si la probabilidad obtenida p-valor  $\leq 0.05$ , rechace  $H_0$  (se acepta  $H_1$  )

Si la probabilidad obtenida p-valor  $> 0.05$ , no rechace  $H_0$  (se acepta  $H_0$  )

**Tabla 4.** Estadística de muestras emparejadas

Estadísticas de muestras emparejadas					
	Parámetros	Media	N	Desviación estándar	Media de error estándar
1	Conductividad-inicial	2,3780	24	0,00000	,00000
	Conductividad - final	2,3140	24	,0627133	,0128013
2	Arsénico - inicial	0,8929	24	0,0000000	,0000000
	Arsénico - final	0,0158	24	0,0312069	,0063701
3	Mercurio - inicial	0,000410	24	0,0000000	,0000000
	Mercurio - final	0,000410	24	0,0000000	,0000000
4	Aluminio - inicial	45,700	24	0,0000000	,0000000

	Aluminio - final	10,2789	24	17,4601994	3,5640483
5	Cadmio - inicial	1,296700	24	0,0000000	,0000000
	Cadmio - final	0,640550	24	0,8136300	,2348747
6	Cromo - inicial	0,017040	24	0,0000000	,0000000
	Cromo -final	0,004626	24	0,0066291	,0013532
7	Cobre - inicial	2,84000	24	0,0000000	,0000000
	Cobre - final	1,042825	24	1,4702018	0,3001037
8	Hierro -inicial	132,000000	24	0,0000000	,0000000
	Hierro -final	10,018333	24	18,7180489	3,8208057
9	Magnesio -inicial	28,530000	24	0,0000000	,0000000
	Magnesio - final	25,100417	24	2,1372178	,4362578
10	Manganeso -inicial	70,241333	24	0,0481543	,0098295
	Manganeso - final	87,855167	24	113,5085073	23,1698270
11	Plomo - inicial	1,685000	24	0,0000000	,0000000
	Plomo - final	0,196129	24	0,3752006	,0765875
12	Zinc - inicial	10,000000	24	0,0000000	,0000000
	Zinc - final	5,669833	24	4,66443291	1,3465058
13	pH - inicial	2,850000	24	0,0000000	,0000000
	pH - final	2,649167	24	0,2370088	,0483792
14	Dureza -inicial	507,000000	24	0,0000000	,0000000
	Dureza - final	440,833	24	36,0780153	7,3643940
15	SST - inicial	4,500	24	0,0000000	,0000000
	SST- final	2,325000	24	1,0923648	,2229780
16	SO4 - inicial	1575,000000	24	0,0000000	,0000000
	SO4 - final	1347,958333	24	159,4096389	32,5393563

Fuente: Matriz de datos SPSS.

La tabla 4. Evidencia los datos estadísticos de muestras emparejadas, donde nos muestra la media, desviación estándar, de los valores obtenidos del Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial.

**Tabla 5.** Prueba de muestras emparejadas

Parámetros	Media	Desviación Estándar	Prueba de muestras emparejadas		t	gl	Sig. (bilateral)	
			Media de error	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior Superior				
1 C.E Inicial- Final	,0640000	,0627133	,012801	,037518	,090481	4,99	23	0,000
2. As Inicial- Final	,8770833	,0312069	,006370	,863905	,890260	137,6	23	0,000
3. Hg Inicial- Final	,000410	,0000000	,000000	,0000410	,0000410	14,3	23	0,000
4. Al Inicial- Final	35,42100	17,460199	3,56404	28,0482	42,7937	9,938	23	0,000
5. Cd Inicial- Final	,6561500	,8136300	,2348747	,1391942	1,173105	2,794	23	0,017
6. Cr Inicial- Final	,0124144	,0066291	,001353	,009615	,015213	9,174	23	0,000
7. Cu Inicial- Final	-771,571	1156,1688	236,001	-1259,7	-283,36	-3,269	23	0,003

8. Fe Inicial- Final	121,9816	18,718048	3,82080	114,077	129,885	31,926	23	0,000
9. Mg Inicial- Final	3,429583	2,1372178	,4362578	2,52711	4,33205	7,861	23	0,000
10. Mn Inicial- Final	-17,6138	113,51578	23,1713124	-65,547	30,3196	-,760	23	0,045
11. Pb Inicial- Final	1,488870	,3752006	,076587	1,33043	1,64730	19,440	23	0,000
12. Zn Inicial- Final	4,330166	4,6644329	1,3465058	1,36652	7,29380	3,216	23	0,008
13. PH Inicial- Final	,2008333	,2370088	,048379	,100753	,30091	4,151	23	0,000
14. Dureza Inicial- final	66,16666	36,078015	7,36439	50,9322	81,4010	8,985	23	0,000
15. SST Inicial-Final	2,175000	1,0923648	,222978	1,71373	2,63626	9,754	23	0,000
16. SO44 Inicial-Final	227,0416	159,40963	32,5393	159,728	294,354	6,977	23	0,000

---

Fuente : Matriz de datos SPSS

La tabla 5. Nos muestra que el P- valor, comparado con el valor alfa 0,05, es menor. Entonces aceptamos la hipótesis H1: El Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial es significativamente eficiente a nivel de laboratorio - 2021.

## CAPÍTULO IV

## EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

**4.1. OBJETIVO ESPECÍFICO N° 1: DETERMINAR LA EFICIENCIA DE RESIDUO AGROINDUSTRIAL USADO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA EN EL SISTEMA DE SUSTRATO ALCALINO DISPERSO (DAS), A NIVEL DE LABORATORIO - 2021.**

## 4.1.1. pH

**Tabla 6.** Eficiencia, respecto a pH

Muestreo	Residuo	C. Inicial	C. Final	LMP	Aumento / Disminución	
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>	2.89	6 - 9	0.04	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	6.51	6 - 9	3.66	
	P3	MgO	2.85	6.98	6 - 9	4.13
	P4	MgO	8.21	6 - 9	5.36	
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	2.81	6 - 9	0.04	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	2.85	6.43	6 - 9	3.58
	P3	MgO	6.9	6 - 9	4.05	
	P4	MgO	8.13	6 - 9	5.28	
23	P1	CaCO <sub>3</sub>	2.79	6 - 9	2.1	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	6.41	6 - 9	3.56	

Muestreo	Residuo	C. Inicial	C. Final	LMP	Aumento / Disminución	
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>	2.89	6 - 9	0.04	
	P2	CaCO <sub>3</sub>		6.51	6 - 9	3.66
Mayo	P3	MgO	2.85	6.98	6 - 9	4.13
	P3	MgO	2.85	6.88	6 - 9	4.03
	P4	MgO		8.11	6 - 9	5.26
	P4	MgO		8.21	6 - 9	5.36
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		2.75	6 - 9	- 0.10
	P2	CaCO <sub>3</sub>		6.11	6 - 9	3.26
	P3	MgO	2.85	6.4	6 - 9	3.55
	P4	MgO		8.08	6 - 9	5.23
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		2.71	6 - 9	0.14
	P2	CaCO <sub>3</sub>		5.81	6 - 9	2.96
	P3	MgO	2.85	5.91	6 - 9	3.06
	P4	MgO		7.97	6 - 9	5.12
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		2.67	6 - 9	-0.18
	P2	CaCO <sub>3</sub>		5.76	6 - 9	2.91
	P3	MgO	2.85	5.65	6 - 9	2.8
	P4	MgO		7.71	6 - 9	4.86

La tabla 6. Muestra los valores obtenidos en donde se registró un aumento del pH en la fecha 1, con carbonato de calcio de 2.85 a 6.51 y con óxido de magnesio 2.85 a 8.21; fecha 2, con carbonato de calcio 2.85 a 6.43 y con óxido de magnesio 2.85 a 8.13; fecha 3, con carbonato de calcio 2.85 a 6.41 y con óxido de magnesio 2.85 a 8.11; fecha 4, con carbonato de calcio de 2.85 a 6.11 y con óxido de magnesio 2.85 a 8.08 ; fecha 5, con carbonato de calcio de 2.85 a 5.81 y con óxido de magnesio de 2.85 a 7.97 ; fecha 6, con carbonato de calcio de 2.85 a 5.76 y con óxido de magnesio de 2.85 a 7.71. Comparado con el D.S 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles para descarga de efluentes

líquidos de actividades mineras-metalúrgicas. Se encuentra dentro del valor, excepto en la fecha 1, en el P1 ya que es la muestra antes del ingreso al sistema de tratamiento.

**4.1.2. Conductividad eléctrica**

**Tabla 7.** Eficiencia, respecto a la conductividad eléctrica

Muestreo	Residuo	C. Inicial (mS/cm)	C. Final (mS/cm)	ECAs Cat. 3 (mS/cm)	Eficiencia y/o Aumento	
				D1/D2		
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	2.537	2.500/5.000	0.159 mS/cm	
	P4	MgO	2.608	2.500/5.000	0.23 mS/cm	
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	3.45	2.500/5.000	1.072 mS/cm	
	P4	MgO	3.56	2.500/5.000	1.182 mS/cm	
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	2.378	4.12	2.500/5.000	1.742 mS/cm
	P4	MgO		3.24	2.500/5.000	0.862 mS/cm
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	4.29	2.500/5.000	1.912 mS/cm	
	P4	MgO	3.64	2.500/5.000	1.262 mS/cm	
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	3.69	2.500/5.000	1.312 mS/cm	
	P4	MgO	3.57	2.500/5.000	1.192 mS/cm	
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>	5.27	2.500/5.000	2.892 mS/cm	
	P4	MgO	3.65	2.500/5.000	1.272 mS/cm	

La tabla 7. Se muestra los valores obtenidos, en la fecha 1, se obtuvo un aumento de 2.378 a 2.537; mientras que en la fecha 2, aumento con carbonato de calcio de 2.378 a 3.45 y con el óxido de magnesio de 2.378 a 3.56; fecha 3, con carbonato de calcio de 2.378 a 4.12 y con carbonato de calcio de 2.378 a 3.24; fecha 4, carbonato de calcio de 2.378 a 4.29 y óxido de magnesio 3.64 ; fecha 5, carbonato de calcio de 2.378 a 3.69 y óxido de magnesio de 2.378 a 3.57 ; fecha 6 , carbonato de calcio de 2.378 a 5.27 y óxido de magnesio de 2.378 a 3.65. Comparado como referencia estos resultados con el

ECAs categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales D.S 004-2017-MINAM, sobrepasan el valor establecido en la norma.

#### 4.1.3. Sulfato (SO<sub>4</sub>)

**Tabla 8.** Eficiencia, respecto a Sulfato

Muestreo	Residuo	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	ECAs Cat.3 mg/L	Eficiencia y/o aumento	
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	1532 mg/L	1000	2.70 %	
	P4	MgO	1470 mg/L	1000	6.70 %	
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	2032 mg/L	1000	457 mg/L	
	P4	MgO	1970 mg/L	1000	395 mg/L	
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	1575 mg/L	2282 mg/L	1000	707 mg/L
	P4	MgO	2220 mg/L	1000	645 mg/L	
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	2157 mg/L	1000	582 mg/L	
	P4	MgO	2095 mg/L	1000	520 mg/L	
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	2257 mg/L	1000	682 mg/L	
	P4	MgO	2195 mg/L	1000	620 mg/L	
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>	2755 mg/L	1000	1180 mg/L	
	P4	MgO	2963 mg/L	1000	1388 mg/L	

La tabla 8. Nos muestra los valores de remoción, en la fecha 1, con carbonato calcio se ha obtenido una remoción de 2.70 % y con óxido de magnesio 6.70 % ; mientras que en la fecha 2 , con carbonato de calcio aumento de 1575 a 2032 y con óxido de magnesio de 1575 a 1970 ; fecha 3, con carbonato de calcio de 1575 a 2282 y con óxido de magnesio de 1575 a 2220; fecha 4, con carbonato de calcio de 1575 a 2157 y con óxido de magnesio de 1575 a 2095; fecha 5, con carbonato de calcio de 1575 a 2257 y con óxido de magnesio de 1575 a 2195 ; fecha 6, con carbonato de calcio de 1575 a 2755 y con óxido de magnesio. Comparado como referencia estos resultados con el ECAs categoría

3. Riego de vegetales y bebida de animales D.S 004-2017-MINAM, sobrepasan el valor establecido en la norma.

#### 4.1.4. Dureza

**Tabla 9.** Eficiencia, respecto a Dureza

Muestreo		Residuo	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	Cantidad que aumentó mg/L
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>		1493	986 mg/L
	P4	MgO		1744	1237 mg/L
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		2334	1827 mg/L
	P4	MgO		2585	2078 mg/L
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		3002	2495 mg/L
	P4	MgO	507	2625	2118 mg/L
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		3032	2525 mg/L
	P4	MgO		2655	2148 mg/L
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		2962	2455 mg/L
	P4	MgO		2605	2098 mg/L
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>		3262	2755 mg/L
	P4	MgO		2885	2378 mg/L

La tabla 9. Se muestra, en la fecha 1, se ha obtenido un aumento con carbonato de calcio de 507 a 1493 y con óxido de magnesio de 507 a 1744; fecha 2, carbonato de calcio de 507 a 2334 y con óxido de magnesio de 507 a 2585; fecha 3, con carbonato de calcio de 507 a 3002 y con óxido de magnesio de 507 a 2625; fecha 4, con carbonato de calcio de 507 a 3032 y con óxido de magnesio de 507 a 2655; fecha 5, con carbonato de calcio de 507 a 2962 y con óxido de magnesio de 507 a 2605; fecha 6, con carbonato de calcio de 507 a 3262 y con óxido de magnesio de 507 a 2885.

## 4.1.5. Sólidos Totales en Suspensión (SST)

Tabla 10. Eficiencia, respecto a SST

Muestreo	Residuo	C.Inicial mg/L	C.Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y aumento
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	7.3	50	2.8 mg/L
	P4	MgO	1.3	50	71.1 %
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	5.6	50	1.1 mg/L
	P4	MgO	1.2	50	73.3 %
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	3.9	50	13.3 %
	P4	MgO	4.5	1	50
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	1.9	50	57.8 %
	P4	MgO	0.9	50	80.0 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	1.8	50	60.0 %
	P4	MgO	1	50	77.8 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>	1.5	50	66.7 %
	P4	MgO	1	50	77.8 %

La tabla 10. Se muestra, en la fecha 1, se ha obtenido un aumento con carbonato de calcio de 4.5 a 7.3 (se registró un aumento en 2.8 mg/L respecto a la concentración inicial) y con óxido de magnesio una remoción de 71.1 %; fecha 2, carbonato de calcio de 4.5 a 5.6 (también se registró un aumento en 1.1 mg/L respecto a la concentración inicial) y con óxido de magnesio una remoción de 73.3 %; fecha 3, carbonato de calcio 13.3 % y con óxido de magnesio 77.8 %; fecha 4, carbonato de calcio 57.8 % y con óxido de magnesio 80 % ; fecha 5, con carbonato de calcio 60% y con óxido de magnesio 77.8 %; fecha 6 , con carbonato de calcio 66.7 % y con óxido de magnesio 77.8 %. Comparado con el D.S 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades mineras-metalúrgicas. Se encuentra dentro del valor establecido en la norma.

## 4.1.6. Aluminio

Tabla 11. Eficiencia, respecto a aluminio

Muestreo	Residuo	C.Inicial mg/L	C.Final mg/L	ECAs mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.103	5	99.8 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.201	5	99.6 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.729	5	98.4 %
	P4	MgO	45.7	5	99.9 %
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	1.902	5	95.8 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	4.52	5	90.1 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>	7.420	5	93.8 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %

La tabla 11. Nos muestra que, el valor obtenido de remoción del aluminio en la fecha 1, carbonato de calcio 99.8 % y óxido de magnesio 99.99%; fecha 2, carbonato de calcio 99.6 % y óxido de magnesio 99.9 %; fecha 3, carbonato de calcio 98.4 % y óxido de magnesio 99.9 % ; fecha 4, carbonato de calcio 95.8 % y óxido de magnesio 99.9 % ; fecha 5, carbonato de calcio 90.1 % y óxido de magnesio 99.9 %; fecha 6, carbonato de calcio 93.8 % y óxido de magnesio 99.9 %. Comparado como referencia estos resultados con el ECAs categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales D.S 004-2017-MINAM, hay algunos valores que sobrepasan lo establecido en la norma en el P2 de la última fecha de muestreo.

4.1.7. Arsénico

Tabla 12. Eficiencia, respecto al arsénico

Muestreo		Residuo	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y aumento
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0041	0.1	99.54 %
	P4	MgO		0.0012	0.1	99.87 %
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0029	0.1	99.68 %
	P4	MgO		0.0012	0.1	99.87 %
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0039	0.1	99.56 %
	P4	MgO	0.8929	0.0012	0.1	99.87 %
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0054	0.1	99.40 %
	P4	MgO		0.0012	0.1	99.87 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0098	0.1	98.90 %
	P4	MgO		0.0012	0.1	99.87 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0137	0.1	98.47 %
	P4	MgO		0.0013	0.1	99.85 %

La tabla 12. Se muestra que, en la fecha 1, con carbonato de calcio se ha obtenido un aumento de remoción en la muestra 1, para carbonato de calcio, el mayor porcentaje fue de 99.54 % y óxido de magnesio 99.87%; fecha 2 , carbonato de calcio 99.68% y óxido de magnesio 99.87 %; fecha 3,carbonato de calcio 99.56 % y óxido de magnesio 99.87%;fecha 4,carbonato de calcio 99.40 % y óxido de magnesio 99.87 % ;fecha 5,carbonato de calcio 98.90 % y óxido de magnesio 99.87 %; fecha 6, carbonato de calcio 98.47 % y óxido de magnesio 99.85 %. Comparado con el D.S 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades mineras-metalúrgicas. Se encuentra dentro del valor establecido en la norma.

## 4.1.8. Cadmio

Tabla 13. Eficiencia, respecto a cadmio

Muestreo		Residuo	C.Inicial mg/L	C.Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.2983	0.05	76.99 %
	P4	MgO		0.0005	0.05	99.96 %
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.2338	0.05	81.97 %
	P4	MgO		0.0009	0.05	99.93 %
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.7713	0.05	40.52 %
	P4	MgO	1.2967	0.0042	0.05	99.68 %
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		1.002	0.05	22.73 %
	P4	MgO		0.0059	0.05	99.54 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		1.885	0.05	0.5883 mg/L
	P4	MgO		0.9225	0.05	28.86 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>		2.4593	0.05	1.1626 mg/L
	P4	MgO		0.1029	0.05	90.05 %

La tabla 13. Nos muestra que, el valor que se ha obtenido de remoción en la fecha 1, Carbonato de calcio 76.99% y óxido de magnesio 99.96 %; fecha 2, carbonato de calcio 81.97 % y óxido de magnesio 99.93 %; fecha 3, carbonato de calcio 40.52 % y óxido de magnesio 99.68 %; fecha 4, carbonato de calcio 22.73 % y óxido de magnesio 99.54 % ; fecha 5, carbonato de calcio un aumento de 0.5883 mg/L respecto a la concentración inicial y óxido de magnesio y una remoción sólo del 28.86 %; fecha 6, carbonato de calcio un aumento de 1.1626 mg/L y óxido de magnesio una remoción del 90.05 %. Comparado con el D.S 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades mineras-metalúrgicas. Se encuentra dentro del rango en las fechas 1 al 4; se encuentran dentro del rango establecido y en las fechas 4 al 5 sobrepasan el valor establecido en la norma.

4.1.9. Cobre

Tabla 14. Eficiencia, respecto a cobre

Muestreo	Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.0208	0.5	99.0 %
	P4	MgO	0.0225	0.5	98.9 %
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.101	0.5	95.1 %
	P4	MgO	0.0498	0.5	97.6 %
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.309	0.5	84.9 %
	P4	MgO	2.054	0.021	0.5
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	1.55	0.5	24.5 %
	P4	MgO	0.0192	0.5	99.1 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	1.3020	0.5	36.6 %
	P4	MgO	0.0101	0.5	99.5 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.5035	0.5	75.5 %
	P4	MgO	0.0220	0.5	99.9 %

La tabla 14. Nos muestra que, el valor que se ha obtenido de remoción en la fecha 1, Carbonato de calcio 99% y óxido de magnesio 98.9 %; fecha 2, carbonato de calcio 95.1 % y óxido de magnesio 97.6% ; fecha 3, carbonato de calcio 84.9 % y óxido de magnesio 99 % ; fecha 4, carbonato de calcio 24.5 % y óxido de magnesio 99. 1 %; fecha 5, carbonato de calcio 36.6 % y óxido de magnesio 99.5 %; fecha 6, carbonato de calcio 75.5 % y óxido de magnesio 98.9 %. Comparado con el D.S 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades mineras-metalúrgicas. Se encuentra dentro del valor establecido, excepto en el punto 1, que hace referencia antes del inicio del tratamiento.

## 4.1.10. Cromo

Tabla 15. Eficiencia, respecto a cromo

Muestreo		Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00051	0.1	97.0 %
	P4	MgO		0.00382	0.1	77.6 %
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00059	0.1	96.5 %
	P4	MgO		0.00101	0.1	94.1 %
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00089	0.1	94.8%
	P4	MgO	0.01704	0.00110	0.1	93.5 %
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00092	0.1	94.6 %
	P4	MgO		0.00039	0.1	97.7 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00098	0.1	94.2 %
	P4	MgO		0.00039	0.1	97.7 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00196	0.1	88.5 %
	P4	MgO		0.00039	0.1	97.7 %

La tabla 15. Nos muestra que, el valor que se ha obtenido de remoción en la fecha 1, carbonato de calcio 97 % y óxido de magnesio 97.7 % ; fecha 2, carbonato de calcio 96.5 % y óxido de magnesio 94. 2 %; fecha 3 , carbonato de calcio 94.8 % y óxido de magnesio 94 %; fecha 4, carbonato de calcio 94.6 % y óxido de magnesio 97.7%; fecha 5 , carbonato de calcio 94.6 % y óxido de magnesio 97.7 %; fecha 6, carbonato de calcio 88.5 % y óxido de magnesio 97.7 %. Comparado con el D.S 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades mineras-metalúrgicas. Se encuentra dentro del valor establecido en la norma.

## 4.1.11. Hierro

Tabla 16. Eficiencia, respecto a Hierro

Muestreo	Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/LI	ECAs Cat.3 mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	4.42	5	96.7 %
	P4	MgO	1.05	5	99.2 %
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	8.86	5	93.3 %
	P4	MgO	1.92	5	98.5 %
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	3.96	5	97.0 %
	P4	MgO	132	5	98.6 %
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	8.2	5	93.8 %
	P4	MgO	1.84	5	98.6 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	14.1	5	89.3 %
	P4	MgO	1.9	5	98.6 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>	28.3	5	78.6 %
	P4	MgO	3.84	5	97.1 %

La tabla 16. Nos muestra que, el valor que se ha obtenido de remoción en la fecha 1, carbonato de calcio 96.7 % y óxido de magnesio 99.2 %; fecha 2, carbonato de calcio 93.3 % y óxido de magnesio 98.5 %; fecha 3, carbonato de calcio 97 % y óxido de magnesio 98.6 % ; fecha 4, carbonato de calcio 93.8 % y óxido de magnesio 98.6 %; fecha 5, carbonato de calcio 89.3 % y óxido de magnesio 98.6 %; fecha 6, carbonato de calcio 78.6 % y óxido de magnesio 97.1 %. Comparado como referencia estos resultados con el ECAs categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales D.S 004-2017-MINAM, Se encuentra dentro del rango establecido, pero se dan valores que sobrepasan el valor establecido en la norma en la fecha 2-4-5-6 en el P2.

## 4.1.12. Magnesio

Tabla 17. Eficiencia, respecto a Magnesio

Muestreo		Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	ECAs mg/L	Cantidad Que aumentó
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>		38.97	250	10.4 mg/L
	P4	MgO		249.1	250	220.6 mg/L
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		42.23	250	13.7 mg/L
	P4	MgO		124.7	250	96.1 mg/L
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		47.05	250	18.5 mg/L
	P4	MgO	28.53	128	250	99.5 mg/L
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		68.78	250	40.25 mg/L
	P4	MgO		130.4	250	101.87 mg/L
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		95.54	250	70.01 mg/L
	P4	MgO		145.9	250	117.35 mg/L
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>		141.2	250	112.67 mg/L
	P4	MgO		250	250	221.47 mg/L

La tabla 17. Nos muestra que, en la fecha 1, con carbonato de calcio se ha tenido un aumento 10.44 y óxido de magnesio 220.6; fecha2, carbonato de calcio aumentó 13.7 y óxido de magnesio 96.12 ; fecha 3, carbonato de calcio 18.52 y óxido de magnesio 99.47; fecha 4, carbonato de calcio 40.25 y óxido de magnesio 101.87; fecha 5, carbonato de calcio 70.01 y óxido de magnesio 117.35; fecha 6, carbonato de calcio 112.67 y óxido de magnesio 221.47. Comparado como referencia estos resultados con el ECAs categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales D.S 004-2017-MINAM, no sobrepasan el valor establecido en la norma.

## 4.1.13. Manganeso

Tabla 18. Eficiencia, respecto a Manganeso

Muestreo	Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	ECAs mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	81.888	0.2	11.68 mg/L
	P4	MgO	0.6568	0.2	99.06 %
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	84.244	0.2	14.036 mg/L
	P4	MgO	1.985	0.2	97.17 %
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	97.122	0.2	26.914 mg/L
	P4	MgO	70.208	0.2	97.06 %
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	114.22	0.2	44.013 mg/L
	P4	MgO	4.647	0.2	93.38 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	162.22	0.2	91.916 mg/L
	P4	MgO	8.01	0.2	88.60 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>	250	0.2	179.692 mg/L
	P4	MgO	32.73	0.2	53.45 %

La tabla 18. Nos muestra que, el valor que se ha obtenido en la fecha 1, con carbonato calcio ha aumentado 11.68 y con óxido de magnesio 99.06 % de remoción; fecha 2, carbonato de calcio ha tenido un aumento 24.61 y óxido de magnesio 97.17 % de remoción; fecha 3, carbonato de calcio se ha tenido un aumento de 26.91 y óxido de magnesio 97.06 % de remoción ; fecha 4, aumento con carbonato de calcio 44.013 y con óxido de magnesio se ha obtenido una remoción de 93.38 %; fecha 5, aumento con carbonato de calcio 91.916 y con óxido de magnesio se ha obtenido una remoción de 88.60 %; fecha 6, aumento con carbonato de calcio y con óxido de magnesio ha removido 53.45 %. Comparado como referencia estos resultados con el ECAs categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales D.S 004-2017-MINAM, sobrepasan el valor establecido en la norma.

## 4.1.14. Mercurio

Tabla 19. Eficiencia, respecto al mercurio

Muestreo	Residuo	C.Inicial mg/L	C.Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	b<0.00041	0.002	0.0%
	P4	MgO	b<0.00041	0.002	0.0%
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	b<0.00041	0.002	0.0%
	P4	MgO	b<0.00041	0.002	0.0%
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	b<0.00041	0.002	0.0%
	P4	MgO	b<0.00041	0.002	0.0%
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	b<0.00041	0.002	0.0%
	P4	MgO	b<0.00041	0.002	0.0%
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	b<0.00041	0.002	0.0%
	P4	MgO	b<0.00041	0.002	0.0%
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>	b<0.00041	0.002	0.0%
	P4	MgO	b<0.00041	0.002	0.0%

La tabla 19. muestra una eficiencia de remoción del 0.0%, eso dado porque los valores registrados están por debajo del límite de detección de la metodología empleada por el laboratorio . Comparado con el D.S 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades mineras-metalúrgicas. Se encuentra muy por debajo del valor establecido en la norma.

## 4.1.15. Plomo

Tabla 20. Eficiencia, respecto a plomo

Muestreo	Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.0053	0.2	99.7 %
	P4	MgO	0.0026	0.2	99.8 %
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.0098	0.2	99.4 %
	P4	MgO	0.0065	0.2	99.6 %
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.0114	0.2	99.3 %
	P4	MgO	1.685	0.2	99.5 %
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.0114	0.2	99.3 %
	P4	MgO	0.0084	0.2	99.5 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.0299	0.2	98.2 %
	P4	MgO	0.0041	0.2	99.8 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.0300	0.2	98.2 %
	P4	MgO	0.0039	0.2	99.8 %

La tabla 20. Nos muestra que, el valor que se ha obtenido de remoción en la fecha 1, con carbonato de calcio 99.7 % y óxido de magnesio 99.8%; fecha 2, carbonato de calcio 99.4% y óxido de magnesio 99.6 %; fecha 3, carbonato de calcio 99.3 % y óxido de magnesio 99.5 %; fecha 4, carbonato de calcio 99.3% y óxido de magnesio 99.5 %; fecha 5, carbonato de calcio 98.2 % y óxido de magnesio 99.8 %; fecha 6, carbonato de calcio 98.2 % y óxido de magnesio 99.8 %. Comparado con el D.S 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades mineras-metalúrgicas. Se encuentra muy por debajo del valor establecido en la norma.

## 4.1.16. Zinc

Tabla 21. Eficiencia, respecto a Zinc

Muestreo	Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Porcentaje de Remoción
23 Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO	0.334	1.5	96.7 %
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO	0.332	1.5	96.7 %
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO	10	0.336	1.5
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO	0.422	1.5	95.8 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO	2.144	1.5	78.6 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO	4.470	1.5	55.3 %

La tabla 21. Nos muestra que, el valor que se ha obtenido de remoción en la fecha 1, con carbonato de calcio se ha obtenido 0.0 % y óxidos de magnesio 96.7 %; fecha 2, carbonato de calcio 0.0 % y óxido de magnesio 96.7 % ; fecha 3, carbonato de calcio 0 % y óxido de magnesio 96.7 % ; fecha 4, carbonato de calcio 0 % y óxido de magnesio 95.8 %; fecha 5, carbonato de calcio 0.0 % y óxido de magnesio 78.6 % ; fecha 6, carbonato de calcio 0.0 % y óxido de magnesio 55.3 %. Comparado con el D.S 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades mineras-metalúrgicas. Se encuentra dentro del rango establecido en la norma, a excepción de las fechas 5 y 6 los cuales sobrepasan el valor establecido en la norma.

**4.2. OBJETIVO N° 2: ANALIZAR LA VARIACIÓN DE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y METALES DEL AGUA ÁCIDA DE MINA A LO LARGO DEL TRATAMIENTO EN EL SISTEMA DE SUSTRATO ALCALINO DISPERSO (DAS) EMPLEANDO RESIDUO AGROINDUSTRIAL RICO EN  $\text{CaCO}_3$  Y  $\text{MgO}$ , A NIVEL DE LABORATORIO - 2021.**

**4.2.1. pH**

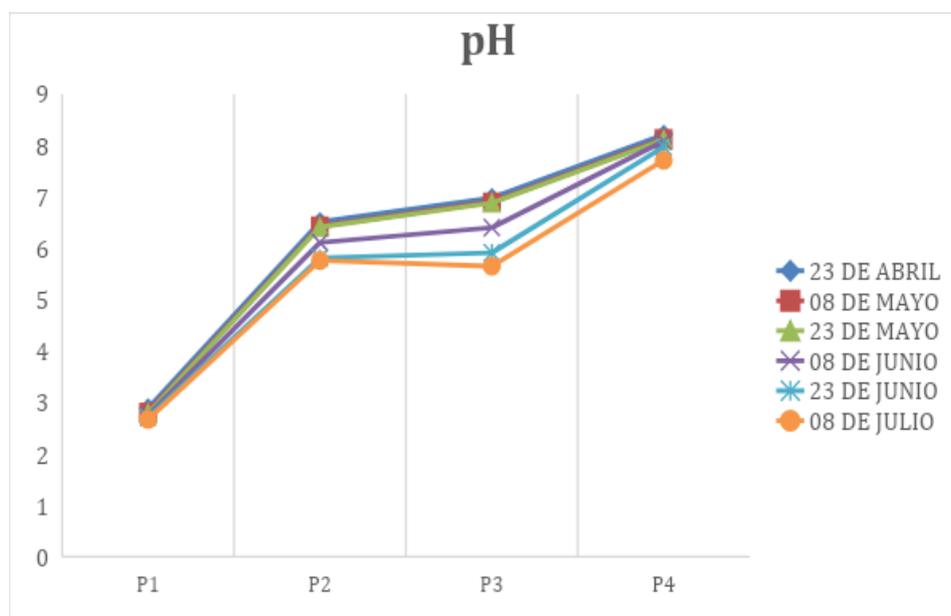
El pH es uno de los más importantes parámetros físico químicos en el sistema, debido a que la precipitación de los distintos metales presentes en el drenaje ácido de mina se da según a los valores del pH específicos como se puede observar en la figura 11.

**Tabla 22.** Resultado de la variación de pH en las 6 fechas

pH	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio
P1	2.89	2.81	2.79	2.75	2.71	2.67
P2	6.51	6.43	6.41	6.11	5.81	5.76
P3	6.98	6.90	6.88	6.40	5.91	5.65
P4	8.21	8.13	8.11	8.08	7.97	7.71

La tabla 22 . Presenta la variación pH en las 6 fechas del tratamiento que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en cuatro puntos de muestreo tanto en el afluente y efluente de cada etapa del sistema de sustrato alcalino disperso empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgO}$ . Como indica los estudios de Caraballo et al.,(2010), valores de pH de 6 a 7 favorecen la precipitación de metales como el hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), este metal precipita a modo de Schwertmanita, la cual más adelante se transforma en goethita . El aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) por su lado, precipita a valores semejantes de pH que el  $\text{Fe}^{3+}$ , así mismo Larraguibel (2017) en su estudio menciona que al incrementar el pH produce la precipitación de metales, así también nos indica Larraguibel (2020) el pH exacto en el que precipitan los metales sigue siendo un tema de investigación, pero ya se manejan

rangos en los cuales el metal ya no es soluble por ejemplo el Al a un pH de 5 y vuelve a ser soluble en valores de pH superiores a 9 y por otro lado el manganeso y el zinc requiere valores altos de pH para su precipitación (9-10) y por consiguiente tiende a ser un problema debido a que varios metales vuelve a disolverse en un pH alcalino.



**Figura 11.** Variación de pH.

La Figura 11. Muestra la evolución del pH a lo largo del sistema tratamiento donde se observa un claro aumento del mismo, debido al contacto que tiene el drenaje ácido de mina con los sustratos alcalinos presentes en el sistema DAS.

El contacto del drenaje ácido de mina (DAM) con las cáscaras de huevo del filtro DAS-Ca, eleva el valor del pH a partir de 2.89 que tiene el agua ácida de mina, hasta valores entre 5.76 a 6.51 la salida del dicho filtro, datos correspondientes al P2 de muestreo. Este incremento del pH se debería a que las cáscaras de huevo son fuente de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), y al ser un material alcalino eleva el pH del agua por la liberación de iones  $\text{OH}^-$  que genera en la muestra de agua.

Y en el DAS-Mg también se genera un aumento de los valores de pH desde 6.51 a niveles 8.21 en el efluente de este filtro, esto debido a la adición de óxido de magnesio siendo una sustancia alcalina como el caso de la cáscara de huevo

4.2.2. Conductividad Eléctrica.

Tabla 23. Resultado de la variación conductividad eléctrica en las 6 fechas

CE	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	2.393	2.54	2.63	2.74	2.98	5.23	mS/cm
P2	2.537	3.45	4.12	4.29	3.69	5.27	mS/cm
P3	2.409	3.52	3.67	3.68	3.66	5.19	mS/cm
P4	2.608	3.56	3.24	3.64	3.57	3.65	mS/cm

La tabla 23. Se muestra la variación de la conductividad eléctrica en las 6 fechas de toma de muestra que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema del DAS empleando residuo agroindustrial rico en CaCO<sub>3</sub> y MgO, en los cuatro puntos de muestreo a lo largo del sistema de tratamiento. La conductividad en una solución líquida se refiere a la capacidad que tiene para transmitir corriente eléctrica, y es equivalente a la resistividad de la solución. Como indica Cisneros (2017) en su estudio, la conductividad es dependiente de la concentración de iones que tiene la muestra de agua, además de: Su concentración, temperatura, movilidad y valencia. Ejemplificando, las soluciones de compuestos inorgánicos como aniones de cloruro, nitrato, sulfato y fosfato.

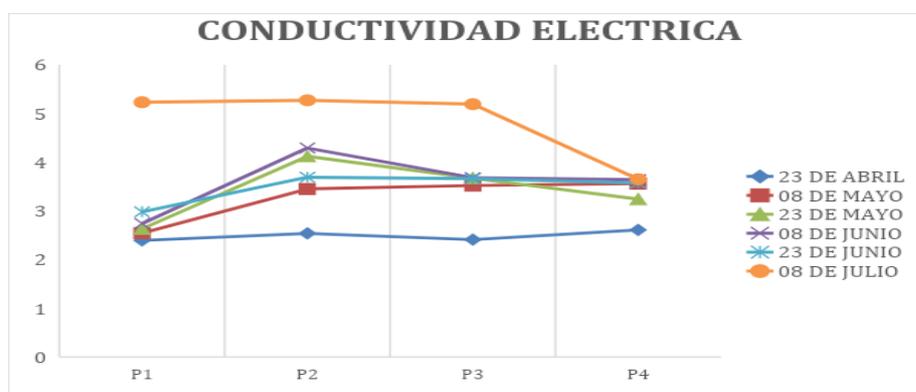


Figura 12. Variación de la conductividad

En la Figura 12. Nos observa el valor más alto el 08 de julio (última fecha de toma de muestra) y los valores mínimos se han obtenido el 23 de abril (primera fecha de toma de

muestra), evidenciándose un claro aumento en los niveles de conductividad de las muestras analizadas entre el inicio y final. Así como indica Cisneros (2017), en incremento en la concentración de los iones analizados es debe a que se añadieron los sustratos alcalinos añadidos ( $\text{CaCO}_3$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) y por el proceso de hidrólisis producido, se liberan iones de calcio y magnesio al agua en el sistema de tratamiento.

#### 4.2.3. Sulfato

**Tabla 24.** Resultado de la variación de sulfato en las 6 fechas

Sulfatos	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
<b>P1</b>	1783	2283	2533	2408	2508	3006	mg/L
<b>P2</b>	1532	2032	2282	2157	2257	2755	mg/L
<b>P3</b>	1493	1993	2243	2118	2218	2716	mg/L
<b>P4</b>	1470	1970	2220	2095	2195	2963	mg/L

La tabla 24. Muestra la variación de sulfato en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgO}$ . De acuerdo al estudio de Guayasamín (2016), la existencia de sulfatos en las muestras se debería a que son un subproducto directo de la oxidación del sulfuro. Por tal razón en el sistema no se espera una retención de sulfatos en el sistema de tratamiento. No obstante, es fundamental evaluar el parámetro para lograr establecer los niveles de ingreso y salida en el agua ácida de mina y en el agua tratada.

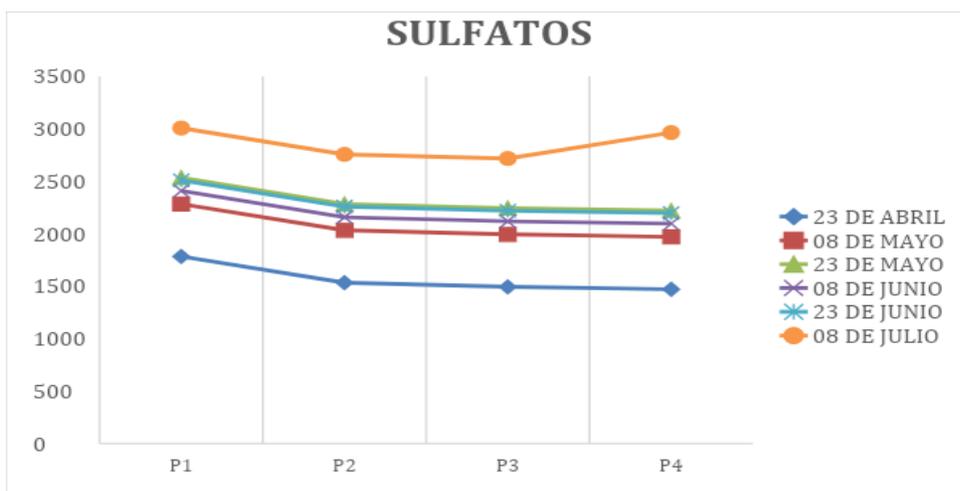


Figura 13. Variación de sulfatos

En la Figura 13. Se puede observar que el valor más alto se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) existe una ligera disminución, P3 (entrada), el valor es mínimo y en la salida disminuye. Además estudios realizados por Guayasamín (2016), demostraron que en experimentos con el sistema de sustrato alcalino disperso, se formaría una capa en la viruta de la madera la que desarrollarían bacterias sulfato reductoras capaces de disminuir ligeramente las concentraciones de sulfatos en el efluente y de acuerdo a experiencia en laboratorio (Rötting et al., 2008), menciona que algunos metales precipitan en sus formas sulfatadas tal es el caso del sulfato de zinc, sulfato de plomo y también en formas de hidrosulfato.

4.2.4. Dureza

Tabla 25. Resultado de la variación de dureza en las 6 fechas

DUREZ A TOTAL	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	546	1022	1031	1284	1298	1301	mg/L
P2	1493	2334	3002	3032	2962	3262	mg/L
P3	1606	2447	2899	2929	2859	3159	mg/L
P4	1744	2585	2625	2624	2605	2885	mg/L

La tabla 25. Muestra la variación de dureza en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgO}$ . en donde se evidencia un aumento en los valores respecto a la dureza el cual tienen relación y podrían explicar el aumento de la conductividad del agua en el tratamiento así como en su estudio Guayasamín (2016), determina la variación de la concentración de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), también puede ser justificado por el incremento en la concentración del ion magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), esto se debe a que, en el proceso de filtración se añadieron los sustratos alcalinos añadidos ( $\text{CaCO}_3$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) como indica Guayasamín (2016).

En la Figura 14. Nos muestra el valor mínimo se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) existe un incremento, P3 (entrada), el valor aumenta, así mismo en el P4, esto debido a que en el sistema se usó la cascara de huevo como fuente de carbonato de calcio el cual libera iones de calcio al agua, de manera similar el óxido de magnesio libera iones de magnesio al agua, el cual se puede comprender debido a la hidrólisis que se produce en el sistema Cisneros (2017).

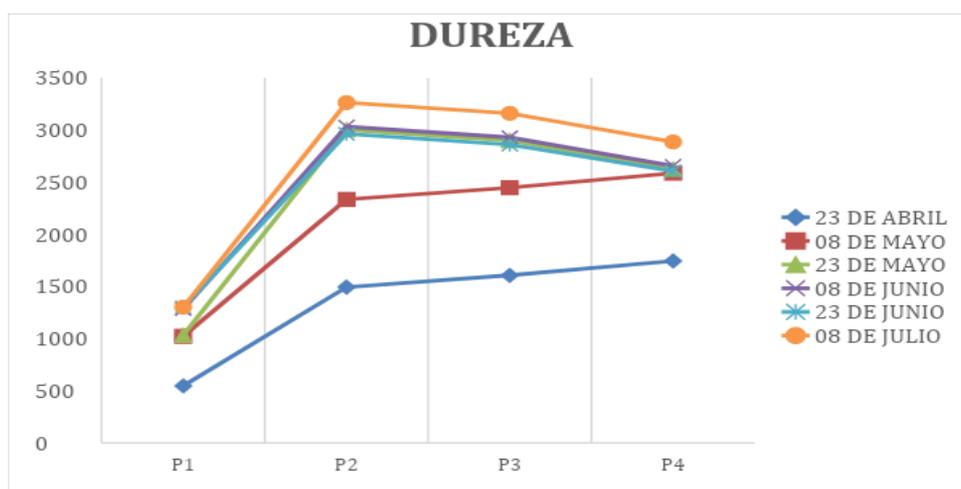


Figura 14. Variación de la dureza

4.2.5. Sólidos totales en suspensión (SST)

Tabla 26. Resultado de la variación de SST en las 6 fechas

SST	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	10.6	8.9	7.2	5.2	2.1	1.4	mg/L
P2	7.3	5.6	3.9	1.9	1.8	1.5	mg/L
P3	5.2	2.3	2.1	1.8	1.6	1.4	mg/L
P4	1.3	1.2	1	0.9	1	1	mg/L

La tabla 26. Muestra la variación de sólidos suspendidos totales en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial rico en CaCO<sub>3</sub> y MgO, registrando la disminución de valores esto da como lo menciona Guayasamín (2016), que por medio del uso de pozas de sedimentación se consigue además de incrementar el de permanencia del agua dentro del sistema facilitar la precipitación de los metales, en especial apreciable para el Fe<sup>3+</sup> y Al<sup>3+</sup> en la poza 1, Pb en la poza 2, y la presencia de cuarzo ejerce la función un filtro cuyo fin es retener los sólidos suspendidos y conseguir un efluente más transparente.

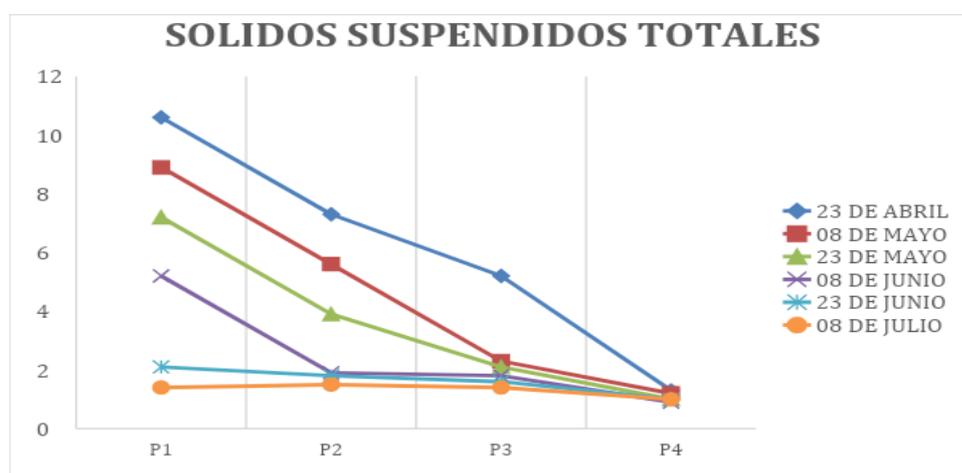


Figura 15. Variación de Sólidos Suspendidos Totales

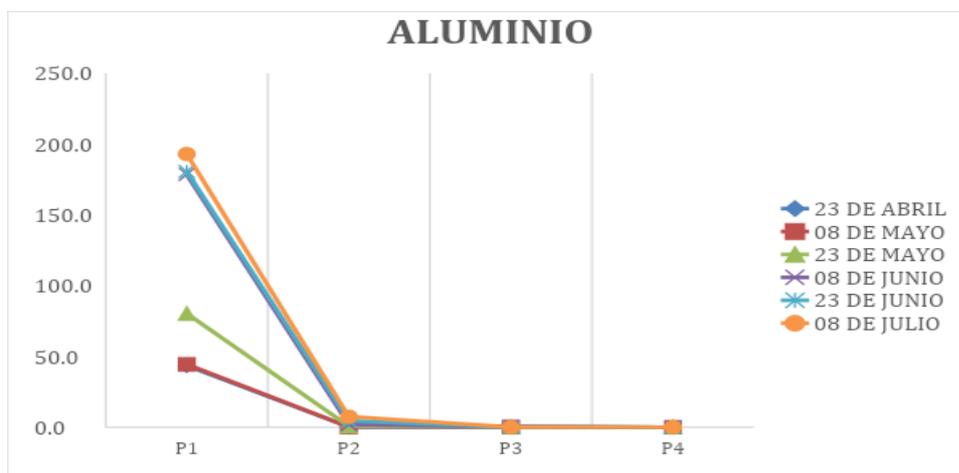
En la Figura 15. Se observa que el valor más alto se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) existe una disminución, P3 (entrada), el valor es mínimo y en la salida disminuye. Esto se debe a las pozas de sedimentación y el tiempo de permanencia del agua en el sistema.

**4.2.7. Aluminio**

**Tabla 27.** Resultado de la variación de aluminio en las 6 fechas

Al	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	43.4	44.4	80.3	178.6	180.6	193	mg/L
P2	1.103	0.201	0.729	1.902	4.52	7.420	mg/L
P3	0.100	0.209	0.302	0.305	0.091	0.043	mg/L
P4	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	mg/L

La tabla 27. Muestra la variación de aluminio en las 6 fechas de toma de muestra que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial rico en CaCO<sub>3</sub>. Así mismo indica Rötting et al.( 2008) en experiencias preliminares el aluminio precipita en forma de hidroxisulfatos Al<sub>4</sub>(SO<sub>4</sub>)(OH)<sub>10</sub>.5(H<sub>2</sub>O), lo cual indica que la precipitación más significativa se da en la etapa del DAS-Ca.



**Figura 16.** Variación del Aluminio

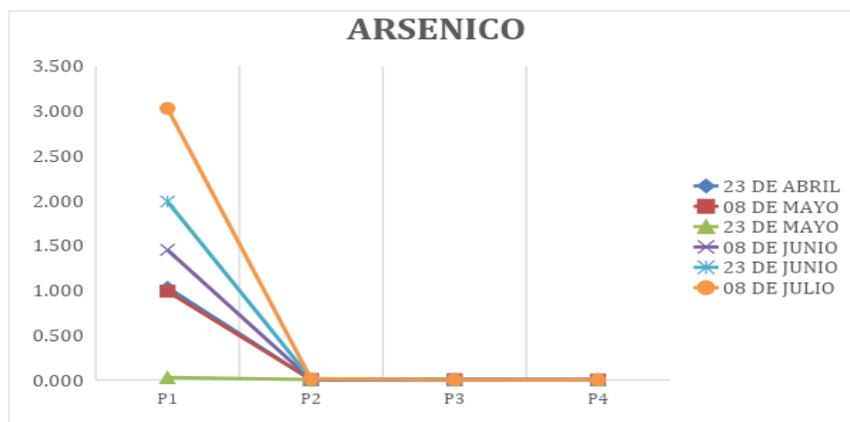
En la Figura 16. Se observa las variaciones de los valores presentes del aluminio en cada punto de muestreo a lo largo del sistema de tratamiento, en donde la retención casi en su totalidad en el P2, es decir en el DAS-Ca, el aluminio retenido se debe a la formación de precipitados por el nivel de pH adecuado generado en esta etapa del sistema de tratamiento DAS.

**4.2.8. Arsénico**

**Tabla 28.** Resultado de la variación de arsénico en las 6 fechas

As	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	1.030	0.988	0.0266	1.45	1.989	3.026	mg/L
P2	0.0041	0.0029	0.0039	0.0054	0.0098	0.0137	mg/L
P3	0.0043	0.0025	0.0030	0.0021	0.0022	0.0026	mg/L
P4	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0013	mg/L

La tabla 28. Muestra la variación de los valores del arsénico en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema DAS empleando residuo agroindustrial rico en CaCO<sub>3</sub> y MgO. Como sostiene Becerro et al (2019), sostienen que en el sistema (DAS), al añadir óxido de magnesio como reactivo remueve componentes tóxicos de nivel potencial, con porcentajes de remoción cercanos al 100%.Así como porcentajes de supresión en torno al 90% para As.



**Figura 17.** Variación de Arsénico

En la Figura 17. Nos muestra que el valor más alto se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) existe una disminución, P3 (entrada), el valor es mínimo y en la salida disminuye. Esto se debe porque, en el proceso de filtración se añadieron los sustratos alcalinos añadidos ( $\text{CaCO}_3$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ).

4.2.9. Cadmio

Tabla 29. Resultado de la variación de Cadmio en las 6 fechas

Cd	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	1.3345	1.3445	2.1761	2.256	3.0021	4.9474	mg/L
P2	0.29832	0.2338	0.77132	1.002	1.8854	2.4593	mg/L
P3	0.29158	0.31914	0.42733	0.85512	1.42148	2.7315	mg/L
P4	0.00058	0.00098	0.00424	0.00597	0.09245	0.10292	mg/L

La tabla 29. Nos muestra la variación de cadmio en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso.. Como indica Rötting et al.( 2008) en experiencias preliminares, se han demostrado que el uso del óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) en el DAS-Mg, favorece la precipitación de metales divalentes. En esta etapa también se da un aumento de pH, llegando hasta valores superiores a 8 . En la Figura 18 se puede observar que se da la precipitación de metales divalentes como zinc (Zn), manganeso (Mn), níquel (Ni), cobalto (Co) y cadmio (Cd), para valores de pH de 8-9 Cortina et al.( 2003).

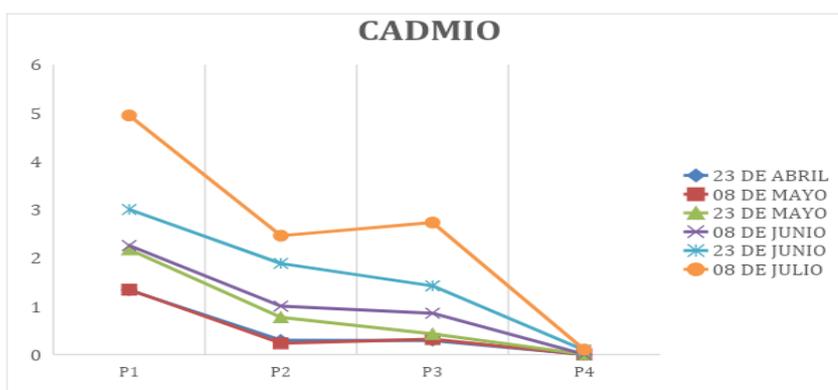


Figura 18. Variación de Cadmio

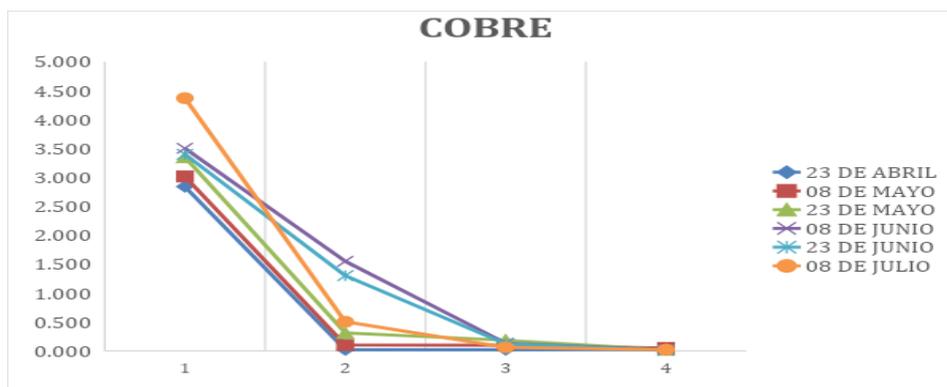
En la Figura 18. Muestra que el valor más alto se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) existe una disminución, P3 (entrada), el valor es mínimo y en la salida, lo cual se puede observar que se da la precipitación de metales divalentes como zinc (Zn), manganeso (Mn), níquel (Ni), cobalto (Co) y cadmio (Cd), para valores de pH de 8-9 como indica en su estudio Cortina et al.( 2003).

**4.2.10. Cobre**

**Tabla 30.** Resultado de la variación de cobre en las 6 fechas

Cu	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	2.840	3.014	3.350	3.502	3.398	4.369	mg/L
P2	0.0208	0.1010	0.3097	1.55	1.302	0.5035	mg/L
P3	0.0221	0.0989	0.1846	0.1326	0.1234	0.0616	mg/L
P4	0.0225	0.0498	0.0210	0.0192	0.0101	0.0220	mg/L

La tabla 30. Presenta la variación de cobre en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en cuatro puntos de muestreo tanto en el afluente y efluente de cada etapa del sistema de sustrato alcalino disperso empleando residuo agroindustrial rico en CaCO<sub>3</sub> y MgO. Asimismo Choi y Lee (2015) en los resultados encontraron que el sistema híbrido con cáscaras de huevo calcinadas y las microalgas han sido bastante eficaces para la supresión de metales pesados en la DAM.



**Figura 19.** Variación de cobre

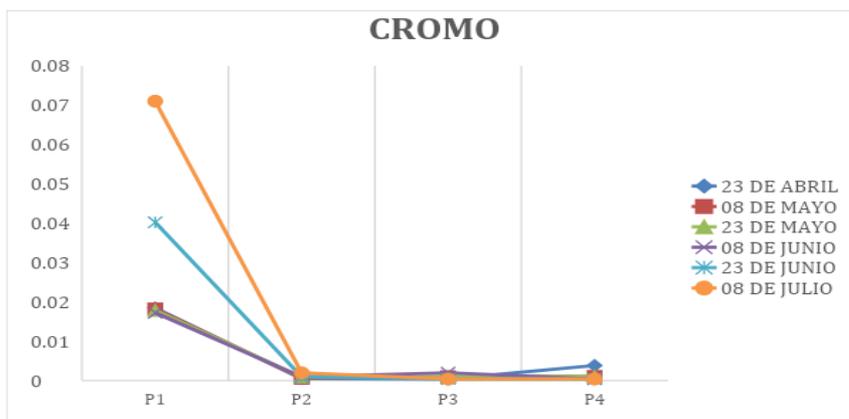
En la Figura 19 . Muestra la variación que tiene el cobre a lo largo del tratamiento del sistema DAS, donde se observa la primera disminución en el efluente del DAS-Ca, el cual se representa por P2 y P4 representa el efluente del DAS-Mg, donde se observa que la concentración de cobre disminuye a valores cero. Al comparar el P2 y P4 se deducir que la concentración de cobre que no se logra retener en el DAS-Ca, se retiene en su totalidad en el DAS-Mg, siendo el sistema DAS un tratamiento con alto rendimiento de remoción del cobre presente en aguas ácidas de mina.

#### 4.2.11. Cromo

**Tabla 31.** Resultado de la variación de cromo en las 6 fechas

Cr	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	0.01846	0.01821	0.01783	0.01724	0.0402	0.071	mg/L
P2	0.00051	0.00059	0.00089	0.00092	0.00098	0.00196	mg/L
P3	0.00039	0.00098	0.00103	0.00198	0.00039	0.00039	mg/L
P4	0.00382	0.00101	0.00110	0.00039	0.00039	0.00039	mg/L

La tabla 31. Muestra la variación de cromo en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgO}$ . Asimismo Choi y Lee (2015) en los resultados encontraron que el sistema híbrido con cáscaras de huevo calcinadas y las microalgas han sido bastante eficaces para la supresión de metales pesados en la DAS, también Rötting et al.( 2008) en experiencias preliminares, se han demostrado que el uso del óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) en el DAS-Mg, favorece la precipitación de metales divalentes que pueden experimentar valores máximos de precipitación a pH mayores a 8, metales como el cromo y Zinc y estos como señala Guayasamin (2016), al ser estos metales anfóteros pueden actuar como ácido o como base dependiendo de la sustancia con la que reacciona, son solubles tanto en condiciones ácidas como básicas.



**Figura 20.** Variación de Cromo

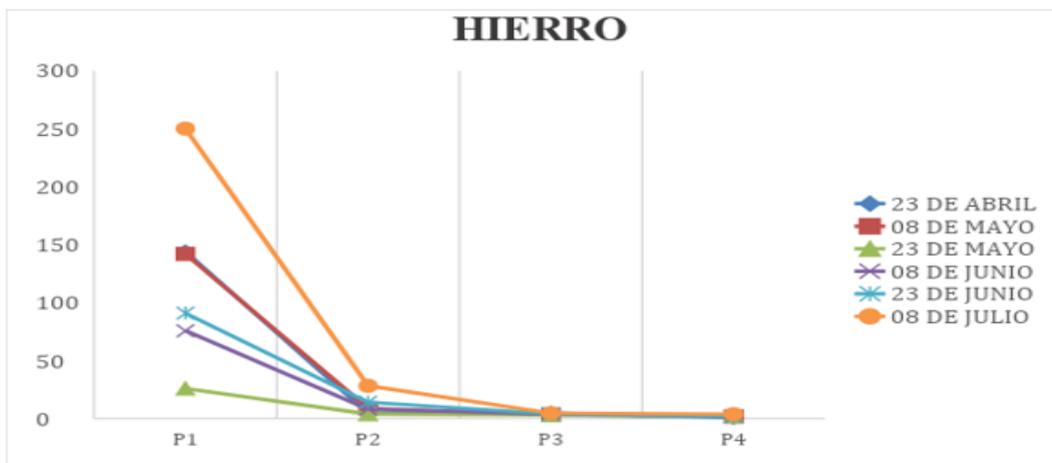
En la Figura 20. Muestra que el valor más alto se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) existe una disminución, P3 (entrada), el valor es mínimo y en la salida disminuye. Esto se debe al aumento del pH producto de los sustratos alcalinos añadidos ( $\text{CaCO}_3$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ).

**4.2.12. Hierro**

**Tabla 32.** Resultado de la variación de hierro en las 6 fechas

Fe	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
<b>P1</b>	144	142	26.0	75.8	90.9	250	mg/L
<b>P2</b>	4.42	8.86	3.96	8.2	14.1	28.3	mg/L
<b>P3</b>	4.79	3.42	3.15	3.98	4.09	4.71	mg/L
<b>P4</b>	1.05	1.92	1.83	1.84	1.9	3.84	mg/L

La tabla 32. Nos muestra la variación de hierro en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgO}$ . Como indica los estudios de Caraballo et al.,(2010), valores de pH de 6 a 7 favorecen la precipitación de metales como el hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), este metal precipita a modo de Schwertmanita, la cual más adelante se transforma en goethita.



**Figura 21.** Variación de hierro

En la Figura 21. Nos muestra que el valor más alto se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) existe una disminución, P3 (entrada), el valor es mínimo y en la salida disminuye. Esto se debe porque, en el proceso de filtración se añadieron los sustratos alcalinos añadidos ( $\text{CaCO}_3$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) y se puede observar cómo se ha precipitado el hierro.

**4.2.13. Magnesio**

**Tabla 33.** Resultado de la variación de magnesio en las 6 fechas.

Mg	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
<b>P1</b>	27.96	32.52	46.27	65.47	72.21	99.19	mg/L
<b>P2</b>	38.97	42.23	47.05	68.78	98.54	141.2	mg/L
<b>P3</b>	38.99	56.88	85.78	72.45	124.54	142.6	mg/L
<b>P4</b>	249.1	124.65	128.0	130.4	145.88	250.0	mg/L

La tabla 33. Nos muestra la variación de magnesio en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente en donde evidencia un incremento de los valores del magnesio esto se debe a que, en el proceso de filtración se añadieron los sustratos alcalinos añadidos ( $\text{CaCO}_3$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ) principalmente incrementando la concentración y por otro lado en su estudio cortina et al. (2003), indica la recurrencia al uso de  $\text{MgO}$  para elevar el pH a valores superiores a 8 y

así poder regular la solubilidad de los metales divalentes y también como indica caraballo (2010), en su estudios preliminares que el óxido de magnesio en DAS-Mg estabiliza la solución a un pH entre 8.50 y 10 , valores suficientes para la precipitación de metales divalentes.

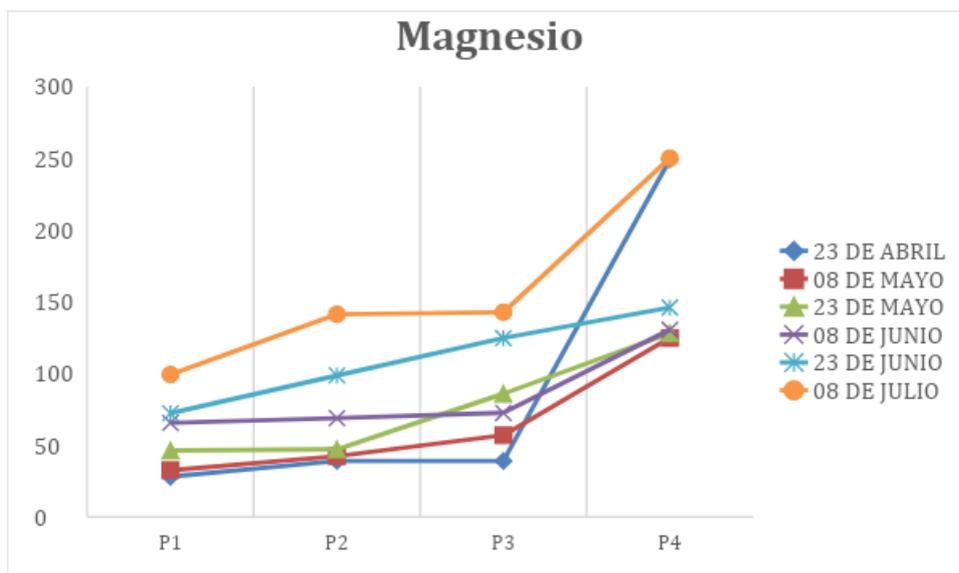


Figura 22. Variación de Magnesio

En la Figura 22. Nos muestra el valor mínimo se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) existe un incremento, P3 (entrada), el valor aumenta, así mismo en el P4. Esto se debe porque, en el proceso de la etapa de DAS-Mg se añadió el óxido de magnesio (MgO).

#### 4.2.14. Manganeso

Tabla 34. Resultado de la variación de magnesio en las 6 fechas

Mn	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	75.368	94.824	123.11	96.562	135.245	250	mg/L
P2	81.888	84.244	97.122	114.221	162.224	250	mg/L
P3	82.596	88.921	67.095	97.221	174.421	250	mg/L
P4	0.65683	1.985	2.0614	4.647	8.012	32.726	mg/L

La tabla 34. Nos muestra la variación de manganeso en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgO}$ . De acuerdo con Cortina et al. (2003), indica la recurrencia al uso de  $\text{MgO}$  para elevar el pH a valores superiores a 8 en donde el manganeso se oxida de  $\text{Mn}^{2+}$  a  $\text{Mn}^{3+}$ , precipitándose en forma de óxido de manganeso.

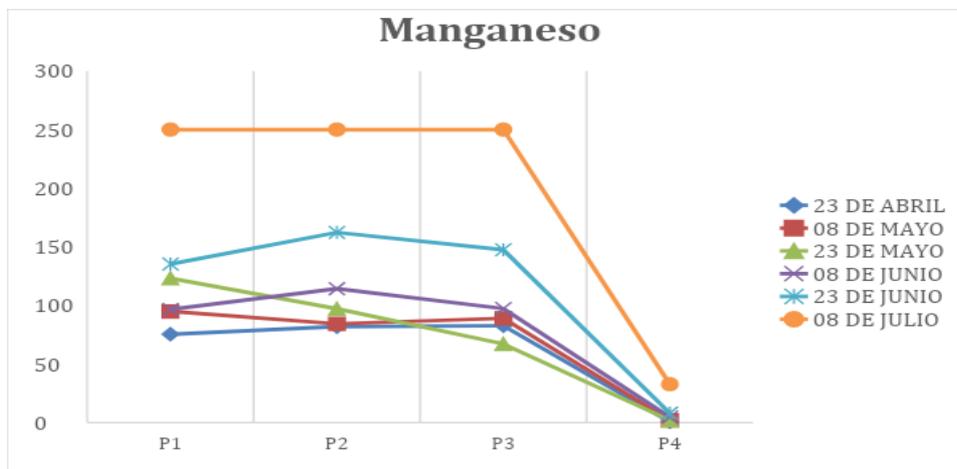


Figura 23. Variación de Manganeso

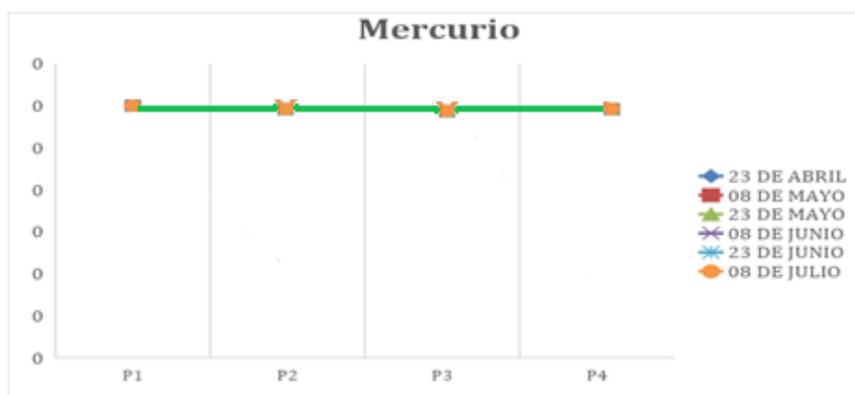
En la Figura 23. Muestra la variación en donde el valor más alto se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) existe una disminución, P3 (entrada), el valor es mínimo y en la salida disminuye, así también se destaca un incremento en la última fecha del muestreo es es dado por la pérdida de alcalinidad de los sustratos empleados en sistema.

4.2.15. Mercurio

Tabla 35. Resultado de la variación de mercurio en las 6 fechas

Hg	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041
P2	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041
P3	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041
P4	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041	<0.00041

La tabla 35. No es posible mostrar variación alguna de los valores de mercurio en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgO}$ .



**Figura 24.** Variación de mercurio

En la Figura 24. Se observa que no hay variación alguna puesto que la concentración de mercurio está muy por debajo del límite de cuantificación del método empleado por el laboratorio.

**4.2.17. Plomo.**

**Tabla 36.** Resultado de la variación de plomo en las 6 fechas

Pb	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	1.449	1.002	0.9925	0.5012	0.3102	0.226	mg/L
P2	0.0053	0.0098	0.0114	0.0189	0.0299	0.0300	mg/L
P3	0.0043	0.0069	0.0097	0.0089	0.0054	0.0040	mg/L
P4	0.0026	0.0065	0.0084	0.0045	0.0041	0.0039	mg/L

La tabla 36. Nos muestra la variación de plomo en las 6 fechas de toma de muestra desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial rico en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgO}$ , de acuerdo a

experiencia en laboratorio Rötting et al., (2008), menciona que algunos metales precipitan en sus formas sulfatadas tal es el caso del sulfato de zinc, sulfato de plomo y también en formas de hidrosulfato.

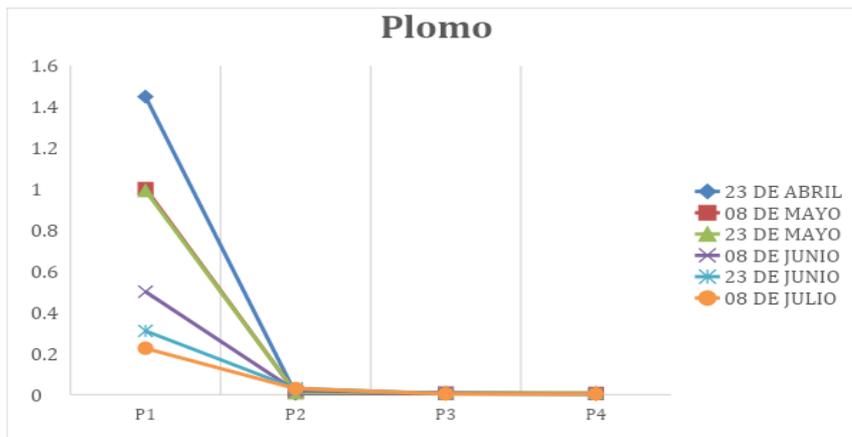


Figura 25. Variación de Plomo

En la Figura 25. Nos muestra que el valor más alto se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) existe una disminución, P3 (entrada), el valor es mínimo y en la salida disminuye. Esto se debe porque, en el proceso de filtración se añadieron los sustratos alcalinos añadidos ( $\text{CaCO}_3$ ) y óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ).

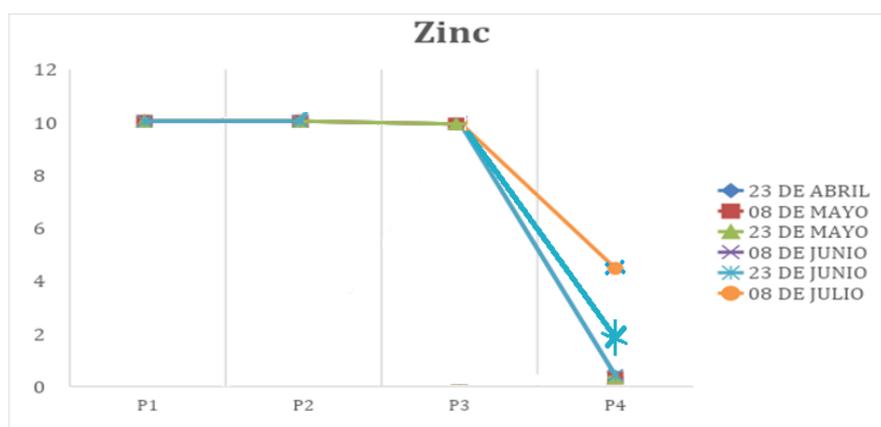
4.2.18. Zinc

Tabla 37. Resultado de la variación de zinc en las 6 fechas

Zn	23 de Abril	08 de Mayo	23 de Mayo	08 de Junio	23 de Junio	08 de Julio	Unidad
P1	>10	>10	>10	>10	>10	>10	mg/L
P2	>10	>10	>10	>10	>10	>10	mg/L
P3	>10	>10	>10	>10	>10	>10	mg/L
P4	0.3335	0.3322	0.3366	0.422	2.144	4.470	mg/L

La tabla 37. Nos muestra la variación de zinc en las 6 fechas de toma de muestras que se realizaron desde el mes de abril hasta julio en el afluente y efluente del Sistema de Sustrato Alcalino Disperso. Como indica Rötting et al.( 2008) en experiencias

preliminares, se han demostrado que el uso del óxido de magnesio (MgO) en el DAS-Mg, favorece la precipitación de metales divalentes. En esta etapa también se da un aumento de pH, llegando hasta valores superiores a 8 . En la Figura 18 se puede observar que se da la precipitación de metales divalentes como zinc (Zn) se da en el P4, para valores de pH de 8-9 como nos indica Cortina et al.( 2003), y Guayasamín (2016), indica que el zinc es un metal anfótero, es decir son solubles tanto en situaciones ácidas y básicas dándonos a entender el por qué no se registraron disminución en pH entre 6 a 7.



**Figura 26.** Variación de Zinc

En la Figura 26. Nos muestra que el valor más alto se ha obtenido en el P1 (entrada) en las 6 fechas de toma de muestras, P2 (salida) , P3 (entrada), el valor es mínimo y en la salida P4 disminuye .

## CONCLUSIONES

**PRIMERA:** El Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial como es la cáscara de huevo como fuente de carbonato de calcio y también el óxido de magnesio es significativamente eficiente a nivel de laboratorio, logrando una eficiencia de remoción óptima, permitiendo que el agua tratada por el sistema DAS aprueben los valores establecidos en el D.S 010-2010-MINAM, límites máximos permisibles para descarga de efluentes líquidos de actividades mineras-metalúrgicas.

**SEGUNDA:** Respecto a los residuos agroindustriales, la cáscara de huevo usado como fuente de carbonato de calcio es una alternativa eficiente en la sustitución de calcita tradicional que se emplea actualmente en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS), a nivel de laboratorio teniendo en cuenta el parámetro del pH , es muy importante en el tratamiento de aguas ácida y que la calcita o el carbonato de calcio en este caso tuvo un comportamiento óptimo en la elevación de dicho parámetro pH (6.51) en la etapa 1 y (8.21) en la etapa 2, con estos valores ha demostrado ser capaz de

reducir la cantidad de metales una remoción importante de las principales propiedades del agua ácida de mina

**TERCERA:** La variación de valores obtenidos de los parámetros físico químicos de DAM a lo largo del tratamiento en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) empleando residuo agroindustrial que es la cáscara de huevo rico en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgO}$ , se ha obtenido una variación significativa en los distintos parámetro analizados, uno de los parámetros muy importantes son el pH y la reducción de la concentración de los metales presentes en el agua ácida.

## RECOMENDACIONES

En base al estudio realizado y los resultados obtenidos en la presente investigación se recomienda lo siguiente :

- A la DREM - PUNO, tener en consideración esta investigación por la información muy valiosa que posee, poder difundir y puedan acceder a dicha información la población, la pequeña minería y minería artesanal pudiendo considerar como alternativa viable el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) por ser una tecnología pasiva de remediación robusta, tolerante en el uso de reactivos alternativos para su funcionamiento, así también muestra elevados niveles de rendimiento en el tratamiento del drenaje ácido de mina.
- A la Universidad Privada San Carlos, promover la investigación en el desarrollo de tecnologías alternativas ya sean de tipo activo o pasivo como el sistema DAS en el tratamiento de aguas ácidas de mina, tomando en cuenta los trabajos de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.
- A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la UPSC, realizar estudios de investigación en el desarrollo de materiales reactivos alternativos a los usados en la actualidad en los diferentes métodos de tratamiento de aguas ácidas así como

en el sistema DAS desarrollado en esta investigación, con el fin de optimizar el sistema de tratamiento y realizar las pruebas de experimentación en distintas zonas y épocas del año, considerando el estudio realizado en la presente investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aduvire, O. (2006). *Drenaje Ácido de Mina Generación y Tratamiento* (pp. 1-140) [Informe Final CRN-IGME]. Madrid - España: Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Recuperado de Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente [http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258\\_0000001.pdf](http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf)
- Blight, G. (2011). Mine Waste. En *Waste. Mine Waste: A Brief Overview of Origins, Quantities, and Methods of Storage* (3.ª ed., pp. 77-88). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381475-3.10005-1>
- Baldigo, B. P., & Lawrence, G. B. (2001). Effects of stream acidification and habitat on fish populations of a North American river. En *Aquatic Sciences* (Vol. 63, Número 2, p. 27).
- Becerro, R. M., Cánovas, C. R., López, R. P., y Macías, F. (2019). Aplicación de la tecnología Sustrato Alcalino Disperso (DAS) para tratar los lixiviados ácidos de la balsa de fosfoyesos de Huelva. *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 24, 42.
- Bejarano, J., Gonzales, O., Rodríguez, J., Abal, I., Rivera, C., Cruzado, M., y Huamán, K. (2016). Influence of contact time and particle size of pectin from orange (*Citrus sinensis*) in decreasing of iron (Fe) content in mining effluents. *Agroindustrial Science*, 2, 169-173. <https://doi.org/10.17268/agroind.science.2016.02.01>
- Blight, G. (2011). Mine Waste. En *Waste. Mine Waste: A Brief Overview of Origins, Quantities, and Methods of Storage* (3.ª ed., pp. 77-88). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381475-3.10005-1>
- Calvo, D., Casado, J., Zamora, G., y Alfonso, M. (2013). *Estudio para el tratamiento de las aguas ácidas por neutralización-precipitación en interior de la mina Santa Fé, Bolivia*. 297-310. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/20956>
- Caraballo, M. A., Macías, F., Rötting, T. S., y Nieto, J. M. (2010). *Tratamiento pasivo con*

*un sustrato alcalino disperso de drenajes ácidos de mina con alta carga metálica en la cuenca del río Odiel (Faja Pirítica Ibérica, SO España). 4.*

Caraballo, M. A., Macías, F., Rötting, T. S., Nieto, J. M., y Ayora, C. (2010). *Tratamiento pasivo con un sustrato alcalino disperso de drenajes ácidos de mina con alta carga metálica en la cuenca del río Odiel (Faja Pirítica Ibérica, SO España).*

<http://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/7914>

Chaparro, L. (2015). Drenajes ácidos de mina formación y manejo. *Revista ESAICA*, 1, 53. <https://doi.org/10.15649/24225126.272>

Choi, H., y Lee, S.-M. (2015). Heavy metal removal from acid mine drainage by calcined eggshell and microalgae hybrid system. *Environmental science and pollution research international*, 22. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4623-3>

Cisneros, D. F. (2017). *Propuesta metodológica de tratamiento pasivo basado en sustrato alcalino disperso para la remediación ambiental de metales pesados provenientes de drenaje ácido de mina.* <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18915>

Condorchem Envitech. (2012). *Tratamiento de aguas ácidas en minería.* Condorchem Envitech.

<https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-acidas-en-mineria/>

Corredor, Y. A. V., y Pérez, L. I. P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 59-72. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>

Cortina, J.-L., Lagreca, I., De Pablo, J., Cama, J., y Ayora, C. (2003). Passive In Situ Remediation of Metal-Polluted Water with Caustic Magnesia: Evidence from Column Experiments. *Environmental Science & Technology*, 37(9), 1971-1977.

<https://doi.org/10.1021/es026018m>

DIGESA. (2005). *INFORMES TÉCNICOS | DIGESA.*

<http://digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/informes.asp>

Fernández, M. S., y Arias, J. L. (2000). La cáscara del huevo: Un modelo de

- biomineralización. *Monografías de Medicina Veterinaria*, 20(2).  
<https://monografiasveterinaria.uchile.cl/index.php/MMV/article/view/5017>
- Fuentes, R. F. (2021). *Determinación de la concentración de nutrientes (nitratos y fosfatos) originados por los efluentes de contaminación en la bahía interior de Puno – 2020* [Universidad Privada San Carlos].  
<http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/4720>
- Garay, J., Ramírez, G., y Betancourt, J. (2003). *Manual de Técnicas Analíticas Para la Determinación de Parámetros Físicoquímicos y Contaminantes Marinos Aguas Sedimentos y Organismos – Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias*.  
<http://observatorio.epacartagena.gov.co/manual-de-tecnicas-analiticas-para-la-determinacion-de-parametros-fisicoquimicos-y-contaminantes-marinos-aguas-sedimentos-y-organismos/>
- Gray, N. F. (1997). Environmental impact and remediation of acid mine drainage: A management problem. *Environmental Geology*, 30(1), 62-71.  
<https://doi.org/10.1007/s002540050133>
- Guayasamín, J. D. (2016). *Implementación, a Nivel Laboratorio, de un Sistema de Tratamiento Pasivo Tipo Sustrato Alcalino Disperso, para la Remediación de Metales Pesados de Drenaje Ácido de Mina*.  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16501>
- Guillen, A. A. (2017). Estudio de investigación para controlar la activación de zinc en el circuito bulk en la Mina Huanzala. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5409>
- Jiménez, A. A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. *Revista interdisciplinaria de gestión ambiental*, 2(23), 12-19.
- Jimenez, C. C. (2017). Eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización activo con lechada de cal de la Unidad Minera Arasi – Puno. *Universidad Peruana Unión*.

<https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/856>

Johnson, D. B., y Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: A review. *Science of The Total Environment*, 338(1), 3-14.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>

Juárez, B. R. (2020). *Evaluación de Riesgo Ambiental del Relave Minero-Metalúrgico de la Planta de Beneficio Tiquillaca, UNA-PUNO*. Universidad Nacional del Altiplano-Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica.

Kastyuchik, A., Karam, A., y Aïder, M. (2016). Effectiveness of alkaline amendments in acid mine drainage remediation. *Environmental Technology & Innovation*, 6, 49-59.

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.06.001>

Kirschbaum, A., Murray, J., Arnosio, M., Tonda, R., y Cacciabue, L. (2012). Pasivos ambientales mineros en el noroeste de Argentina: Aspectos mineralógicos, geoquímicos y consecuencias ambientales. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 29(1), 248-264.

La Atmósfera. (2021). *Actividad Experimental 6B*. FlippingBook.

<http://centromariomolina.org/libro/libros/LibrodeQuimica/62/>

Larraguibel, A. T. (2017). *Materiales reactivos locales para un reactivo tipo DAS (Dispersed Alkaline Substrate) a utilizar en sistemas de tratamiento pasivo en Chile*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/150695>

Larraguibel, A. T. (2020). *Optimización de tecnología DAS en laboratorio para retención de sulfato y metales de drenaje ácido de minas andinas utilizando residuos agro-industriales ricos en CaCO<sub>3</sub> y Witherita (BaCO<sub>3</sub>)*.

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175231>

MINEM. (2009). *Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas*. DGAAM.

<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/manedrenaje.pdf>

Morales, E. (2018). *Determinación del contenido de metales pesados en suelos colindantes a un drenaje ácido de mina en el municipio de California, Santander*,

- Colombia. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/13009>
- Neira, A. C., y Chambilla, W. A. (2019). Historia de la contaminación de la bahía de Ite por la empresa minera Southern Perú. *La Vida & la Historia*, 10, 70-79.  
<https://doi.org/10.33326/26176041.2019.10.874>
- Pamo, E. L., Fraile, D. B., y Aduvire, O. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: Estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín geológico y minero*, 113(1), 3-21.
- Peñoles. (2021). *Óxido de Magnesio*. Industrias Peñoles.  
<https://penoles.com.mx/productos/oxido-de-magnesio/>
- Rötting, T. S., Caraballo, M. A., Serrano, J. A., Ayora, C., y Carrera, J. (2008). Field application of calcite Dispersed Alkaline Substrate (calcite-DAS) for passive treatment of acid mine drainage with high Al and metal concentrations. *Applied Geochemistry*, 23(6), 1660-1674. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.02.023>
- RoyChowdhury, A., Sarkar, D., y Datta, R. (2015). Remediation of Acid Mine Drainage-Impacted Water. *Current Pollution Reports*, 1(3), 131-141.  
<https://doi.org/10.1007/s40726-015-0011-3>
- Sánchez, M. A., y Sánchez, D. (2018). Desarrollo del sistema pasivo sustrato alcalino disperso (DAS) para el tratamiento de drenaje ácido de mina – Cajamarca 2018. *Revista de Formación en Investigación*, 6(2), 11-17.
- Sgier, H., Macías, F., Liñán, J. M. N., y Rötting, T. S. (2015). Diseño de una planta piloto para el tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina. *Tecnoaqua*, 11, 70-75.
- SIAR PUNO. (2016). *PROTOCOLO NACIONAL PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES | SIAR Puno| Sistema Regional de Información Ambiental*.  
<http://siar.minam.gob.pe/puno/documentos/protocolo-nacional-monitoreo-calidad-recursos-hidricos-superficiales>
- Zavala, B. L., y Guerrero, C. (2006). Estudio geoambiental de la cuenca del río

Ramis—[Boletín C 30]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET*.

<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/282>

Zevallos, J. (2016). *Estabilización del drenaje ácido de mina (DAM) de la empresa paraíso perdido Apata* [Universidad Nacional del Centro del Perú].

<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4587/Zevallos%20S..pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**ANEXOS**

## ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: "EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA EMPLEANDO RESIDUO AGROINDUSTRIAL A NIVEL DE LABORATORIO - 2021"

PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA	ESTADÍSTICA
<p><b>PROBLEMA GENERAL</b></p> <p>¿Será eficiente el tratamiento de aguas ácidas de mina mediante el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso empleando residuo agroindustrial, a nivel de laboratorio - 2021?</p>	<p><b>HIPÓTESIS GENERAL</b></p> <p>El sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de minas empleando residuo agroindustrial es significativamente eficiente a nivel de laboratorio - 2021.</p>	<p><b>OBJETIVO GENERAL</b></p> <p>Evaluar la eficiencia del Sistema Sustrato Alcalino Disperso (DAS) en el tratamiento de aguas ácidas de mina empleando residuo agroindustrial a nivel de laboratorio - 2021.</p>	<p><b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b></p> <p><math>V_i = V_1</math></p> <p>Residuo agroindustrial rico en <math>CaCO_3</math></p>	<p><b>INDICADORES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Desarrollo de un método pasivo tipo Sustrato Alcalino Disperso</li> </ul>		
<p><b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b></p> <p>1. ¿El residuo agroindustrial será una alternativa eficiente para sustituir la calca en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS), a nivel de laboratorio - 2021?</p> <p>2. ¿Cómo varían los valores de los parámetros físico-químicos del DAM a lo largo del tratamiento en el sistema Sustrato Alcalino Disperso (DAS) empleando residuo agroindustrial rico en <math>CaCO_3</math>, a nivel de laboratorio - 2021?</p>	<p><b>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</b></p> <p>1. El residuo agroindustrial es una alternativa eficiente en la sustitución de calca en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS), a nivel de laboratorio - 2021.</p> <p>2. Es significativo la variación de los valores de los parámetros físico-químicos del DAM a lo largo del tratamiento en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS) empleando residuo agroindustrial rico en <math>CaCO_3</math>, a nivel de laboratorio - 2021.</p>	<p><b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b></p> <p>1. Determinar la eficiencia de residuo agroindustrial usado en el tratamiento de aguas ácidas de mina en el Sistema de Sustrato Alcalino Disperso (DAS), a nivel de laboratorio - 2021.</p> <p>2. Analizar la variación de los valores de los parámetros físico-químicos del agua ácida de mina a lo largo del tratamiento en el Sistema (DAS) empleando residuo agroindustrial rico en <math>CaCO_3</math>, a nivel de laboratorio - 2021</p>	<p><b>VARIABLE DEPENDIENTE</b></p> <p><math>V_d = V_2</math></p> <p>Tratamiento de agua ácida de mina</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Metales pesados totales removidos %</li> <li>● Turbidez NTU</li> <li>● Conductividad (<math>\mu S/cm</math>)</li> <li>● pH (0 – 14)</li> <li>● SST (mg/l)</li> <li>● Sulfatos (mg/l)</li> </ul>	<p>Experimental explicativo</p>	<p>Descriptivo -Analítico</p>

**ANEXO 2. PANEL FOTOGRÁFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO Y TOMA DE MUESTRA**



**Figura 27** Pozas de aguas ácidas



**Figura 28.** Medición de parámetros in situ

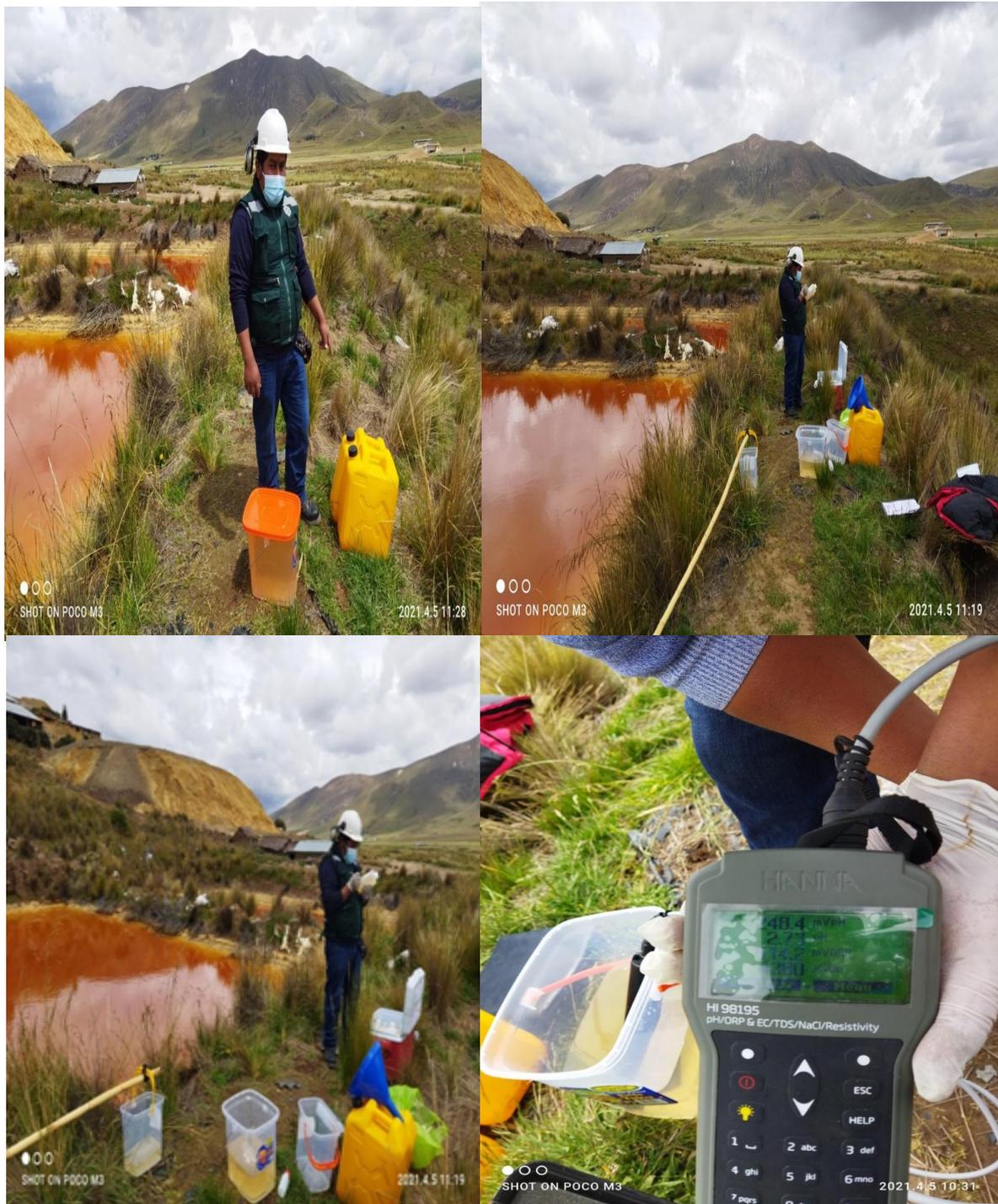


Figura 29. Recolección de muestras (bidones de 20 L)

ANEXO 3. PANEL FOTOGRÁFICO DE LA PREPARACIÓN DEL SUSTRATO  
ALCALINO



Figura 30 . Obtención y pesado de virutas de madera pino



Figura 31. Tamizado y pesado de la cáscara de huevo



**Figura 32.** Pesado del óxido de magnesio y cuarzo



**Figura 33.** Preparación del sustrato del filtro DAS

## ANEXO 4. PANEL FOTOGRÁFICO MÓDULO DEL SISTEMA DAS



Figura 34. Sistema de tratamiento

**ANEXO 5. PANEL FOTOGRÁFICO DE TOMA DE MUESTRAS Y ENVÍO A LABORATORIO.**



**Figura 35.** Toma de muestras, preservación y rotulado para el laboratorio



Figura 36. Frascos de la muestra para el laboratorio



Figura 37. Muestras de agua en el Cooler para el transporte

ANEXO 6. PANEL FOTOGRÁFICO DE INFORMES DE LABORATORIO

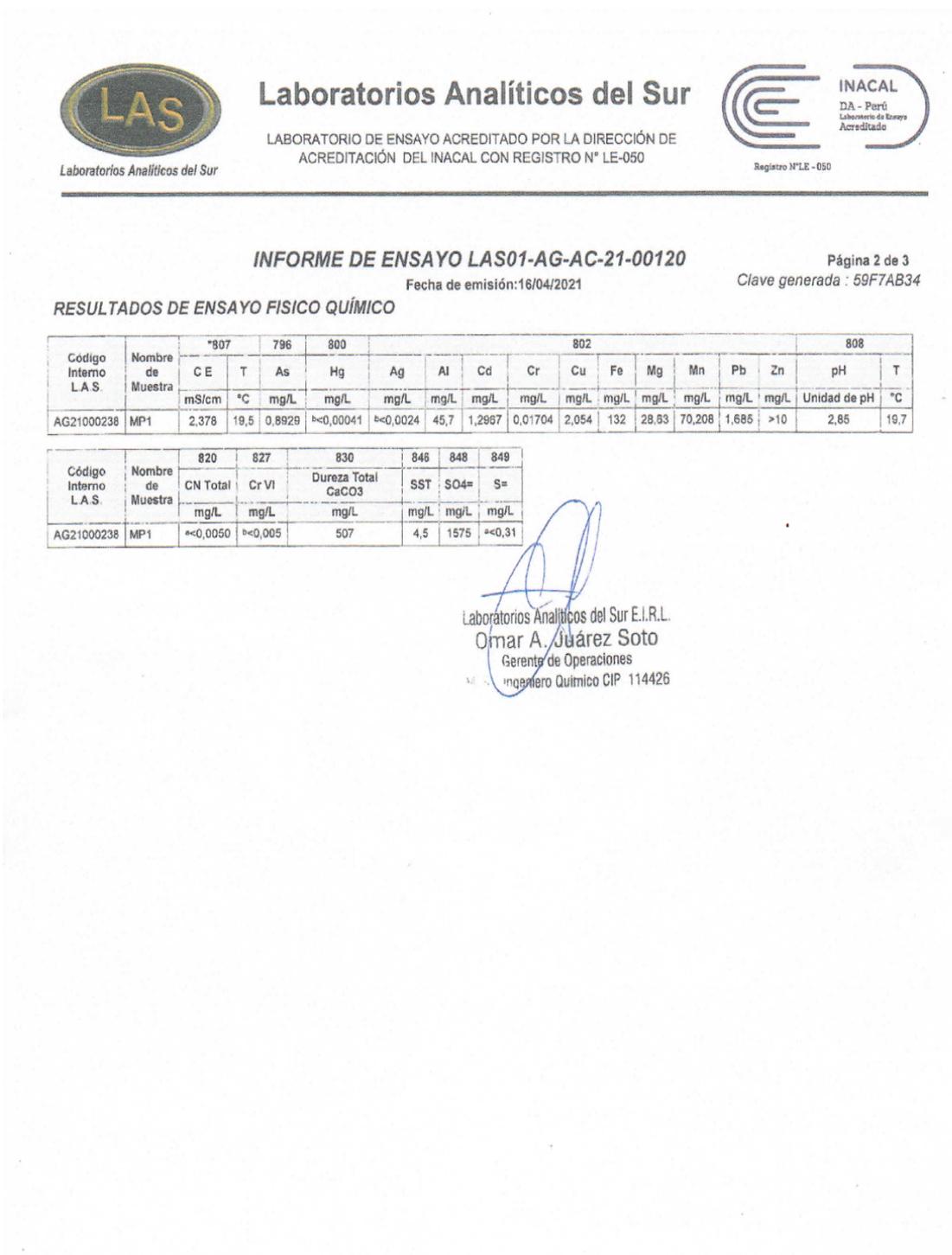


Figura 38 Resultado de muestras iniciales



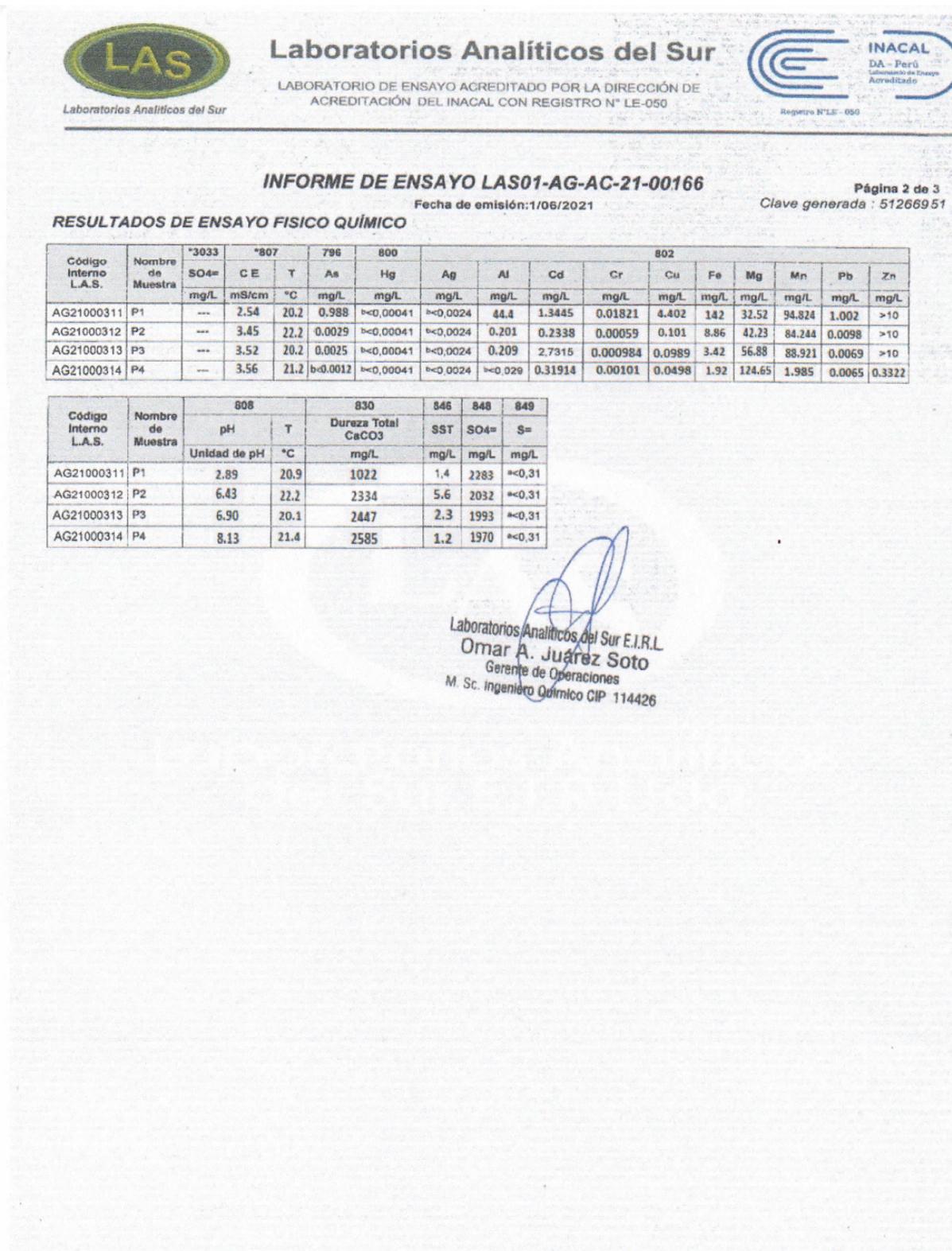


Figura 40. Resultados de la fecha 2

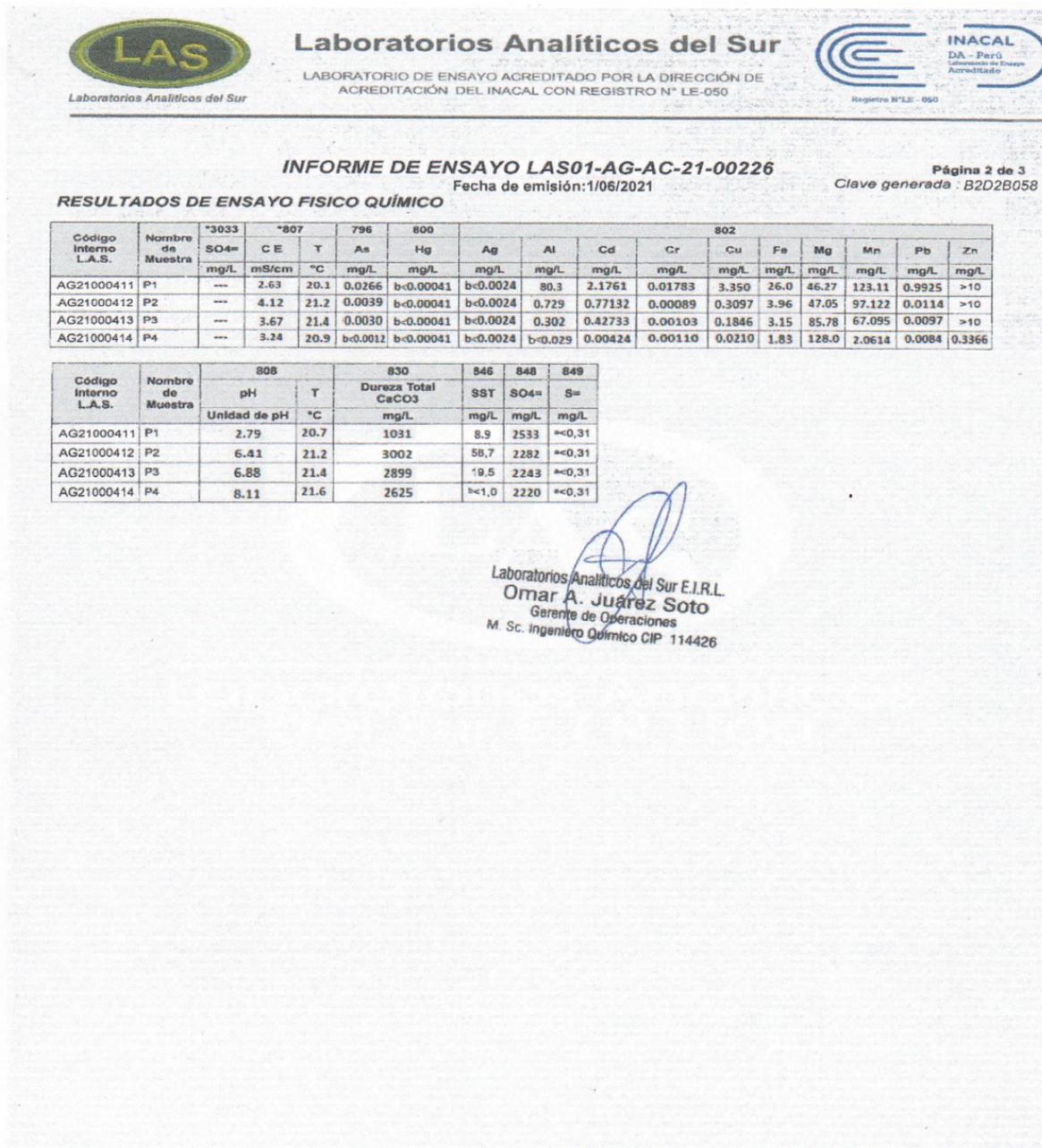


Figura 41. Resultado de la fecha 3

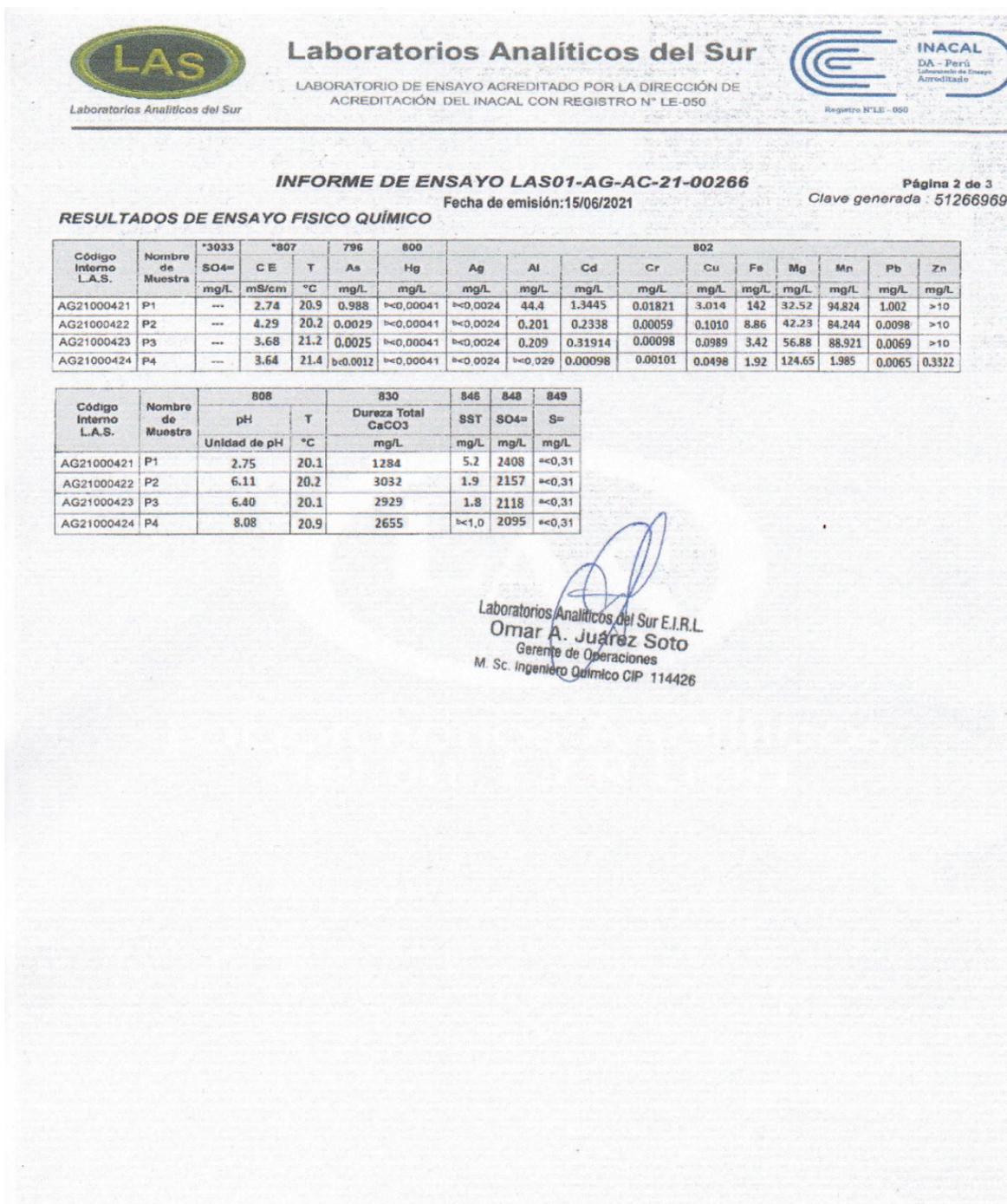


Figura 42. Resultados de la fecha 4

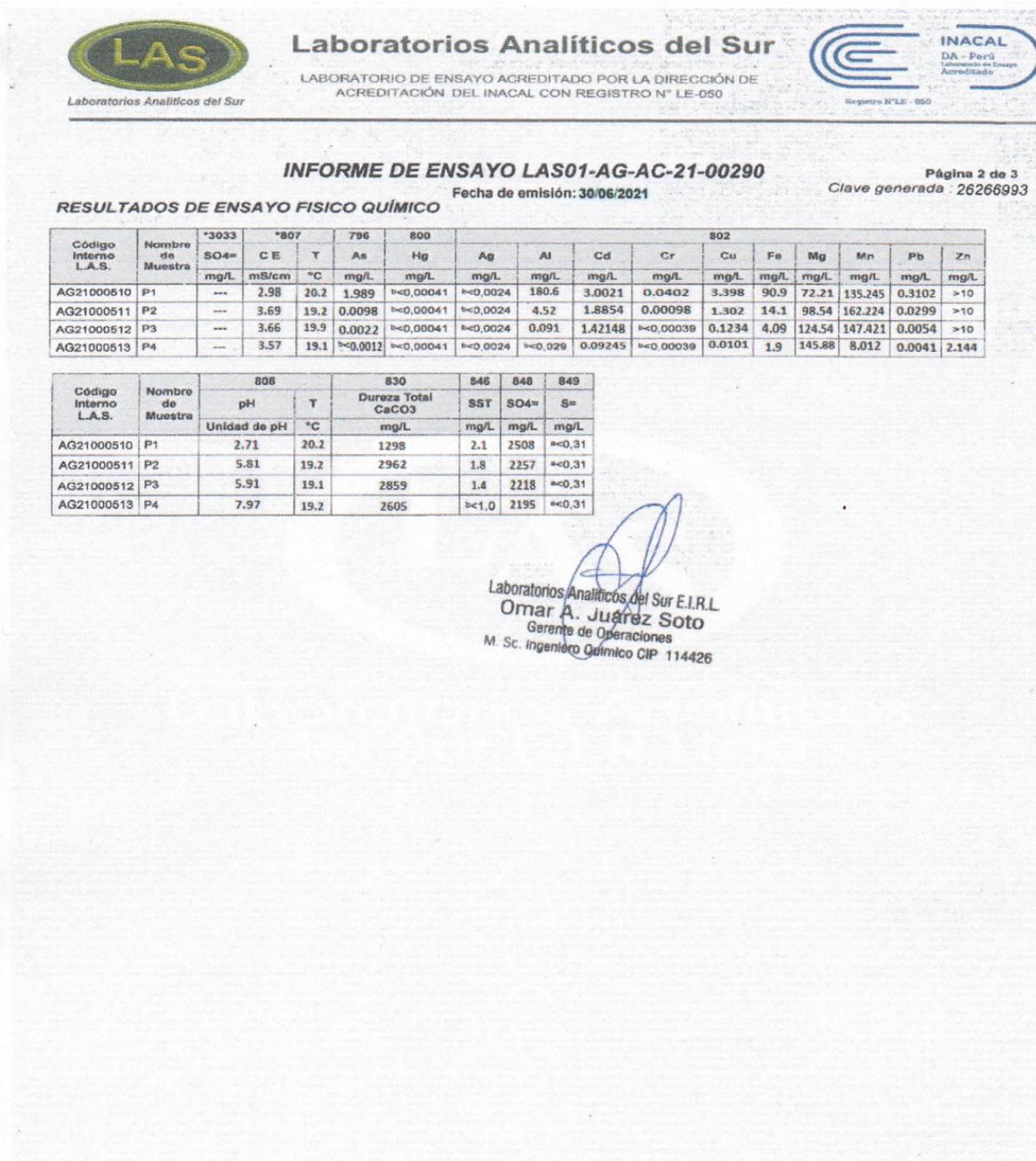


Figura 43. Resultados de la fecha 5



**Laboratorios Analíticos del Sur**

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



INACAL  
DA - Perú  
Laboratorio de Ensayo  
Acreditado

Registro N° LE - 050

Laboratorios Analíticos del Sur

**INFORME DE ENSAYO LAS01-AG-AC-21-00296**

Fecha de emisión: 15/07/2021

Página 2 de 3

Clave generada : 51266993

**RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUÍMICO**

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	*3033	*807		796	800	802										
		SO4=	C	E	T	As	Hg	Ag	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Pb	Zn
		mg/L	mS/cm	°C	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG21000540	P1	6500	5,23	19,9	3,026	b<0,00041	b<0,0024	193	4,9474	0,07100	4,369	>250	99,15	>250	0,2260	>10	
AG21000541	P2	4620	5,27	18,5	0,0137	b<0,00041	b<0,0024	7,42	2,4593	0,00196	0,5035	28,3	141,2	>250	0,0300	>10	
AG21000542	P3	4748	5,19	18,4	0,0026	b<0,00041	b<0,0024	0,043	2,7315	b<0,00039	0,0616	4,71	142,6	>250	0,0040	>10	
AG21000543	P4	---	3,65	18,3	0,0013	b<0,00041	b<0,0024	b<0,029	0,10292	b<0,00039	0,0220	3,84	>250	32,726	0,0039	4,470	

Código Interno L.A.S.	Nombre de Muestra	808		830	846	848	849
		pH	T	Dureza Total CaCO3	SST	SO4=	S=
		Unidad de pH	°C	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
AG21000540	P1	2,67	20,5	1301	1,4	---	a<0,31
AG21000541	P2	5,76	18,6	3262	56,7	---	a<0,31
AG21000542	P3	5,65	18,5	3159	19,5	---	a<0,31
AG21000543	P4	7,71	18,4	2885	b<1,0	2693	a<0,31

*(Firma)*  
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
**Omar A. Juárez Soto**  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

Figura 44. Resultados de la fecha 6

**ANEXO 7. CONSTANCIA DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS**



Constancia Nro: 4393-2021  
Fecha de Emision: 26/07/2021

**CONSTANCIA DE TRATAMIENTO Y/O DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS PELIGROSOS**

PETRAMAS SAC., Empresa Prestadora de Servicios de Residuos Sólidos – EPS-RS con registro EPNG-737.12 – Dirección General de Salud Ambiental – DIGESA del Ministerio de Salud, deja constancia que la empresa:

**ECOCENTURY S.A.C.**

---

Ha utilizado nuestro servicio de tratamiento y/o Disposición final de los siguientes Residuos Industriales y peligrosos de acuerdo al siguiente detalle:

PROCEDENCIA: PUNO

Nro de Boleta de Pesaje	Nombre de Residuo	U.M.	Peso	Fecha de Disposicion
31733	RESIDUOS SOLIDOS GENERADOS DAS-Ca	KG	1.50	24/07/2021
31734	RESIDUOS SOLIDOS GENERADOS DAS-Mg	KG	1.02	24/07/2021
31735	RESIDUOS SOLIDOS CONTAMINADOS CON QUIMICOS	KG	3.42	24/07/2021
<b>TOTAL</b>			<b>5.94</b>	

En nuestro Relleno de Seguridad “Huaycoloro”, ubicado en la Quebrada de Huaycoloro Km. 7 San Antonio – Huarochiri, autorizado con resolución Directoral N° 1888-2013/DEPA/DIGESA/SA.



María Castillo Cárpe  
Sub/Dir. Área Operacional

Av. Tarma Marzano 2013 Piso 5 Urb. Figueiruta Distrito Santiago de Surco Lima - Perú  
Teléfono: (+51) 419 9280 / (+51) 9391 419 9392  
E-mail: oficina@petramas.com  
Web: www.petramas.com



**Figura 45.** Constancia de Disposición final de Residuos Generados.

**ANEXO 8. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP) DS. N° 010-2010 MINAM.**

**LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES  
PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE  
ACTIVIDADES MINERO - METALÚRGICAS**

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Aceltes y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

**ANEXO 9. ECA-CATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDA DE ANIMALES  
D.S 004-2017-MINAM**

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
<b>FISICOS- QUÍMICOS</b>				
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	(µS/cm)	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2		0,5
Fenoles	mg/L	0,002		0,01
Fluoruros	mg/L	1		**
Nitratos (NO <sub>3</sub> -N) + Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	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
<b>INORGÁNICOS</b>				
Aluminio	mg/L	5		5

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
Arsénico	mg/L	0,1		0,2
Bario	mg/L	0,7		**
Benilo	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
Niquel	mg/L	0,2		1
Plomo	mg/L	0,05		0,05
Selenio	mg/L	0,02		0,05
Zinc	mg/L	2		24

**ANEXO 10. TABLAS COMPLETAS DE RESULTADOS DE EFICIENCIA DE PARÁMETROS ANALIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN**

• pH

**Tabla 38 .** Eficiencia, respecto a pH

Muestreo	Residuo	C. Inicial	C. Final	LMP	aumento / Disminución	
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>	2.89	6 - 9	0.04	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	6.51	6 - 9	3.66	
	P3	MgO	2.85	6.98	6 - 9	4.13
	P4	MgO	8.21	6 - 9	5.36	
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	2.81	6 - 9	-0.04	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	6.43	6 - 9	3.58	
	P3	MgO	2.85	6.9	6 - 9	4.05
	P4	MgO	8.13	6 - 9	5.28	
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	2.79	6 - 9	2.1	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	6.41	6 - 9	3.56	
	P3	MgO	2.85	6.88	6 - 9	4.03
	P4	MgO	8.11	6 - 9	5.26	
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>	2.75	6 - 9	- 0.10	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	6.11	6 - 9	3.26	
	P3	MgO	2.85	6.4	6 - 9	3.55
	P4	MgO	8.08	6 - 9	5.23	
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>	2.71	6 - 9	0.14	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	5.81	6 - 9	2.96	
	P3	MgO	2.85	5.91	6 - 9	3.06
	P4	MgO	7.97	6 - 9	5.12	
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>	2.67	6 - 9	-0.18	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	5.76	6 - 9	2.91	
	P3	MgO	2.85	5.65	6 - 9	2.8
	P4	MgO	7.71	6 - 9	4.86	

● Conductividad eléctrica

Tabla 39. Eficiencia, respecto a la conductividad eléctrica

Muestreo		Residuo	C. Inicial ( $\mu\text{S/cm}$ )	C. Final ( $\mu\text{S/cm}$ )	ECAs Categoría 3 ( $\mu\text{S/cm}$ )	Eficiencia y/o Aumento
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>		2.363	2500	0.63%
	P2	CaCO <sub>3</sub>		2.537	2500	0.159 $\mu\text{S/cm}$
	P3	MgO	2.378	2.409	2500	0.031 $\mu\text{S/cm}$
	P4	MgO		2.608	2500	0.23 $\mu\text{S/cm}$
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		2.54	2500	0.162 $\mu\text{S/cm}$
	P2	CaCO <sub>3</sub>		3.45	2500	1.072 $\mu\text{S/cm}$
	P3	MgO	2.378	3.52	2500	1.142 $\mu\text{S/cm}$
	P4	MgO		3.56	2500	1.182 $\mu\text{S/cm}$
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		2.63	2500	0.252 $\mu\text{S/cm}$
	P2	CaCO <sub>3</sub>		4.12	2500	1.742 $\mu\text{S/cm}$
	P3	MgO	2.378	3.67	2500	1.292 $\mu\text{S/cm}$
	P4	MgO		3.24	2500	0.862 $\mu\text{S/cm}$
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		2.74	2500	0.362 $\mu\text{S/cm}$
	P2	CaCO <sub>3</sub>		4.29	2500	1.912 $\mu\text{S/cm}$
	P3	MgO	2.378	3.68	2500	1.302 $\mu\text{S/cm}$
	P4	MgO		3.64	2500	1.262 $\mu\text{S/cm}$
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		2.98	2500	0.602 $\mu\text{S/cm}$
	P2	CaCO <sub>3</sub>		3.69	2500	1.312 $\mu\text{S/cm}$
	P3	MgO	2.378	3.66	2500	1.282 $\mu\text{S/cm}$
	P4	MgO		3.57	2500	1.192 $\mu\text{S/cm}$
8 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		5.23	2500	2.852 $\mu\text{S/cm}$
	P2	CaCO <sub>3</sub>		5.27	2500	2.892 $\mu\text{S/cm}$
	P3	MgO	2.378	5.19	2500	2.812 $\mu\text{S/cm}$
	P4	MgO		3.65	2500	1.272 $\mu\text{S/cm}$

• Sulfato (SO4)

Tabla 40. Eficiencia, respecto a Sulfato

Muestreo	Residuo	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	ECAs Categoría 3 mg/L	Eficiencia y/o aumento	
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>	1783 mg/L	1000	208 mg/L	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	1532 mg/L	1000	2.70 %	
	P3	MgO	1575 mg/L	1493 mg/L	1000	5.20 %
	P4	MgO		1470 mg/L	1000	6.70 %
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	2283 mg/L	1000	708 mg/L	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	2032 mg/L	1000	457 mg/L	
	P3	MgO	1575 mg/L	1993 mg/L	1000	418 mg/L
	P4	MgO		1970 mg/L	1000	395 mg/L
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	2533 mg/L	1000	958 mg/L	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	2282 mg/L	1000	707 mg/L	
	P3	MgO	1575 mg/L	2243 mg/L	1000	668 mg/L
	P4	MgO		2220 mg/L	1000	645 mg/L
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>	2408 mg/L	1000	833 mg/L	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	2157 mg/L	1000	582 mg/L	
	P3	MgO	1575 mg/L	2118 mg/L	1000	543 mg/L
	P4	MgO		2095 mg/L	1000	520 mg/L
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>	2508 mg/L	1000	933 mg/L	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	2257 mg/L	1000	682 mg/L	
	P3	MgO	1575 mg/L	2218 mg/L	1000	643 mg/L
	P4	MgO		2195 mg/L	1000	620 mg/L
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>	3006 mg/L	1000	1431 mg/L	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	2755 mg/L	1000	1180 mg/L	
	P3	MgO	1575	2716 mg/L	1000	1141 mg/L
	P4	MgO		2963 mg/L	1000	1388 mg/L

- Dureza

**Tabla 41.** Eficiencia, respecto a Dureza

Muestreo	Residuo	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	Cantidad que aumentó mg/L
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>	546	39 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>	1493	986 mg/L
	P3	MgO	507	1099 mg/L
	P4	MgO	1744	1237 mg/L
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	1022	515 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>	2334	1827 mg/L
	P3	MgO	507	1940 mg/L
	P4	MgO	2585	2078 mg/L
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	1031	524 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>	3002	2495 mg/L
	P3	MgO	507	2392 mg/L
	P4	MgO	2625	2118 mg/L
8 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>	1284	777 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>	3032	2525 mg/L
	P3	MgO	507	2422 mg/L
	P4	MgO	2655	2148 mg/L
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>	1298	791 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>	2962	2455 mg/L
	P3	MgO	507	2352 mg/L
	P4	MgO	2605	2098 mg/L
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>	1301	794 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>	3262	2755 mg/L
	P3	MgO	507	2652 mg/L
	P4	MgO	2885	2378 mg/L

● **Sólidos Totales en Suspensión (SST)**

**Tabla 42.** Eficiencia, respecto a SST

Muestreo		Residuo	C.Inicial mg/L	C.Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y aumento
23	P1	CaCO <sub>3</sub>		10.6	50	6.1 mg/L
Abril	P2	CaCO <sub>3</sub>	4.5	7.3	50	2.8 mg/L
	P3	MgO		5.2	50	0.7 mg/L
	P4	MgO		1.3	50	71.1 %
	P1	CaCO <sub>3</sub>		8.9	50	4.4 mg/L
08 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		5.6	50	1.1 mg/L
	P3	MgO	4.5	2.3	50	48.9 %
	P4	MgO		1.2	50	73.3 %
	P1	CaCO <sub>3</sub>		7.2	50	2.7 mg/L
23 Mayo	P2	CaCO <sub>3</sub>		3.9	50	13.3 %
	P3	MgO	4.5	2.1	50	53.3 %
	P4	MgO		1	50	77.8 %
	P1	CaCO <sub>3</sub>		5.2	50	0.7 mg/L
08 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		1.9	50	57.8 %
	P3	MgO	4.5	1.8	50	60.0 %
	P4	MgO		0.9	50	80.0 %
	P1	CaCO <sub>3</sub>		2.1	50	53.3 %
23 Junio	P2	CaCO <sub>3</sub>		1.8	50	60.0 %
	P3	MgO	4.5	1.6	50	64.4 %
	P4	MgO		1	50	77.8 %
	P1	CaCO <sub>3</sub>		1.4	50	68.9 %
08 Julio	P2	CaCO <sub>3</sub>		1.5	50	66.7 %
	P3	MgO	4.5	1.4	50	68.9 %
	P4	MgO		1	50	77.8 %

● **Aluminio**

**Tabla 43.** Eficiencia, respecto a aluminio

Muestreo	Residuo	C.Inicial mg/L	C.Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y/o aumento	
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>	43.4	5	5.0 %	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.103	5	99.8 %	
	P3	MgO	45.7	0.100	5	99.8 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %	
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	44.4	5	2.8 %	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.201	5	99.6 %	
	P3	MgO	45.7	0.209	5	99.5 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %	
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	80.3	5	34.6 mg/L	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	0.729	5	98.4 %	
	P3	MgO	45.7	0.302	5	99.3 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %	
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>	178.6	5	132.9 mg/L	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	1.902	5	95.8 %	
	P3	MgO	45.7	0.305	5	99.3 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %	
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>	180.6	5	290.8	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	4.52	5	90.1 %	
	P3	MgO	45.7	0.091	5	99.8 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %	
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>	193.0	5	147.3 mg/L	
	P2	CaCO <sub>3</sub>	7.420	5	93.8 %	
	P3	MgO	45.7	0.043	5	99.9 %
	P4	MgO	0.029	5	99.9 %	

• **Arsénico**

**Tabla 44.** Eficiencia, respecto al arsénico

Muestreo		Residuo	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y aumento
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>		1.030	0.1	0.1371
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0041	0.1	99.54 %
	P3	MgO	0.8929 mg/L	0.0043	0.1	99.52 %
	P4	MgO		0.0012	0.1	99.87 %
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.0988	0.1	88.93 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0029	0.1	99.68 %
	P3	MgO	0.8929 mg/L	0.0025	0.1	99.72 %
	P4	MgO		0.0012	0.1	99.87 %
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.0266	0.1	97.02 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0039	0.1	99.56 %
	P3	MgO	0.8929 mg/L	0.0030	0.1	99.66 %
	P4	MgO		0.0012	0.1	99.87 %
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		1.45	0.1	0.5571
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0054	0.1	99.40 %
	P3	MgO	0.8929 mg/L	0.0021	0.1	99.76 %
	P4	MgO		0.0012	0.1	99.87 %
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		1.989	0.1	1.0961
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0098	0.1	98.90 %
	P3	MgO	0.8929 mg/L	0.0022	0.1	99.75 %
	P4	MgO		0.0012	0.1	99.87 %
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		3.036	0.1	2.1431
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0137	0.1	98.47 %
	P3	MgO	0.8929	0.0026	0.1	99.71 %
	P4	MgO		0.0013	0.1	99.85 %

• Cadmio

**Tabla 45.** Eficiencia, respecto a cadmio

Muestreo	Residuo	C.Inicial mg/L	C.Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P1		1.3345	0.05	0.0348 mg/L
	P2		0.2983	0.05	76.99 %
	P3	1.2967	0.2915	0.05	77.52 %
	P4		0.0005	0.05	99.96 %
08 Mayo	P1		1.3445	0.05	0.0478 mg/L
	P2		0.2338	0.05	81.97 %
	P3	1.2967	0.3191	0.05	75.39 %
	P4		0.0009	0.05	99.93 %
23 Mayo	P1		2.1761	0.05	0.8794 mg/L
	P2		0.7713	0.05	40.52 %
	P3	1.2967	0.4273	0.05	67.05 %
	P4		0.0042	0.05	99.68 %
08 Junio	P1		2.256	0.05	0.9593 mg/L
	P2		1.002	0.05	22.73 %
	P3	1.2967	0.855	0.05	34.06 %
	P4		0.0059	0.05	99.54 %
23 Junio	P1		3.0021	0.05	1.7154 mg/L
	P2		1.885	0.05	0.5883 mg/L
	P3	1.2967	1.4214	0.05	0.1247 mg/L
	P4		0.9225	0.05	28.86 %
08 Julio	P1		4.9474	0.05	3.6507 mg/L
	P2		2.4593	0.05	1.1626 mg/L
	P3	1.2967	2.7315	0.05	1.4348 mg/L
	P4		0.1029	0.05	90.05 %

● Cobre

Tabla 46. Eficiencia, respecto a cobre

Muestreo		Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>		2.840	0.5	0.78 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0208	0.5	99.0 %
	P3	MgO	2.054	0.0221	0.5	98.9 %
	P4	MgO		0.0225	0.5	98.9 %
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		3.014	0.5	0.96 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.101	0.5	95.1 %
	P3	MgO	2.054	0.099	0.5	95.2 %
	P4	MgO		0.0498	0.5	97.6 %
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		3.350	0.5	1.30 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.309	0.5	84.9 %
	P3	MgO	2.054	0.1846	0.5	91.0 %
	P4	MgO		0.021	0.5	99.0 %
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		3.502	0.5	1.45 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		1.55	0.5	24.5 %
	P3	MgO	2.054	0.1326	0.5	93.5 %
	P4	MgO		0.0192	0.5	99.1 %
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		3.398	0.5	1.34 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		1.3020	0.5	36.6 %
	P3	MgO	2.054	0.1234	0.5	94.0 %
	P4	MgO		0.0101	0.5	99.5 %
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		4.369	0.5	2.32 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.5035	0.5	75.5 %
	P3	MgO	2.054	0.0616	0.5	97.0 %
	P4	MgO		0.0220	0.5	99.9 %

● **Cromo**

**Tabla 47.** Eficiencia, respecto a cromo

Muestreo		Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.01846	0.1	0 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00051	0.1	97.0 %
	P3	MgO	0.01704	0.00039	0.1	97.7 %
	P4	MgO		0.00382	0.1	77.6 %
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.01821	0.1	0.0 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00059	0.1	96.5 %
	P3	MgO	0.01704	0.00098	0.1	94.2 %
	P4	MgO		0.00101	0.1	94.1 %
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.01783	0.1	0.0 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00089	0.1	94.8%
	P3	MgO	0.01704	0.00103	0.1	94.0 %
	P4	MgO		0.00110	0.1	93.5 %
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.01724	0.1	0.0%
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00092	0.1	94.6 %
	P3	MgO	0.01704	0.00198	0.1	88.4 %
	P4	MgO		0.00039	0.1	97.7 %
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.0402	0.1	0.02316 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00098	0.1	94.2 %
	P3	MgO	0.01704	0.00039	0.1	97.7 %
	P4	MgO		0.00039	0.1	97.7 %
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.071	0.1	0.05396 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00196	0.1	88.5 %
	P3	MgO	0.01704	0.00039	0.1	97.7 %
	P4	MgO		0.00039	0.1	97.7 %

● Hierro

Tabla 48. Eficiencia, respecto a Hierro

Muestreo	Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/LI	LMP mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>	144	2	12 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		2	96.7 %
	P3	MgO	132	2	96.4 %
	P4	MgO		2	99.2 %
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	142	2	10 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		2	93.3 %
	P3	MgO	132	2	97.4 %
	P4	MgO		2	98.5 %
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>	26	2	80.3 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		2	97.0 %
	P3	MgO	132	2	97.6 %
	P4	MgO		2	98.6 %
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>	75.8	2	42.6 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		2	93.8 %
	P3	MgO	132	2	97.0 %
	P4	MgO		2	98.6 %
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>	90.9	2	31.1 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		2	89.3 %
	P3	MgO	132	2	96.9 %
	P4	MgO		2	98.6 %
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>	250	2	118 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		2	78.6 %
	P3	MgO	132	2	96.4 %
	P4	MgO		2	97.1 %

• **Magnesio**

**Tabla 49.** Eficiencia, respecto a Magnesio

Muestreo		Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	ECAs mg/L	Cantidad Que aumentó
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>		27.96	250	0.57 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		38.97	250	10.4 mg/L
	P3	MgO	28.53	38.99	250	10.5 mg/L
	P4	MgO		249.1	250	220.6 mg/L
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		32.52	250	3.99 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		42.23	250	13.7 mg/L
	P3	MgO	28.53	56.88	250	28.4 mg/L
	P4	MgO		124.7	250	96.1 mg/L
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		46.27	250	17.7 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		47.05	250	18.5 mg/L
	P3	MgO	28.53	85.78	250	57.5 mg/L
	P4	MgO		128	250	99.5 mg/L
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		65.47	250	36.9 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		68.78	250	40.25 mg/L
	P3	MgO	28.53	72.45	250	43.92 mg/L
	P4	MgO		130.4	250	101.87 mg/L
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		72.21	250	43.68 mg/L
	P2	CaCO <sub>3</sub>		95.54	250	70.01
	P3	MgO	28.53	124.5	250	96.01
	P4	MgO		145.9	250	117.35
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		99.19	250	70.66
	P2	CaCO <sub>3</sub>		141.2	250	112.67
	P3	MgO	28.53	142.6	250	114.07
	P4	MgO		250	250	221.47

• **Manganeso**

**Tabla 50.** Eficiencia, respecto a Manganeso

Muestreo		Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia y/o aumento
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>		75.368	2	5.16
	P2	CaCO <sub>3</sub>		81.888	2	11.68
	P3	MgO	70.208	82.596	2	12.388
	P4	MgO		0.6568	2	99.06 %
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		94.824	2	24.616
	P2	CaCO <sub>3</sub>		84.244	2	14.036
	P3	MgO	70.208	88.921	2	18.713
	P4	MgO		1.985	2	97.17 %
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		123.11	2	52.902
	P2	CaCO <sub>3</sub>		97.122	2	26.914
	P3	MgO	70.208	67.095	2	4.43 %
	P4	MgO		2.0614	2	97.06 %
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		96.562	2	26.354
	P2	CaCO <sub>3</sub>		114.22	2	44.013
	P3	MgO	70.208	97.22	2	27.013
	P4	MgO		4.647	2	93.38 %
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		135.25	2	64.937
	P2	CaCO <sub>3</sub>		162.22	2	91.916
	P3	MgO	70.208	147.42	2	77.113
	P4	MgO		8.01	2	88.60 %
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		250	2	179.692
	P2	CaCO <sub>3</sub>		250	2	179.692
	P3	MgO	70.208	250	2	179.692
	P4	MgO		32.73	2	53.45 %

● Mercurio

Tabla 51. Eficiencia, respecto al mercurio

Muestreo	Residuo	C.Inicial mg/L	C.Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia	
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.00039	0.002	4.88 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00037	0.002	9.76 %
	P3	MgO	0.00041	0.00039	0.002	4.88 %
	P4	MgO		0.00037	0.002	9.76 %
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.00039	0.002	4.88 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00037	0.002	9.76 %
	P3	MgO	0.00041	0.00039	0.002	4.88 %
	P4	MgO		0.00037	0.002	9.76 %
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.00039	0.002	4.88 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00037	0.002	9.76 %
	P3	MgO	0.00041	0.00039	0.002	4.88 %
	P4	MgO		0.00037	0.002	9.76 %
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.00039	0.002	4.88 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00037	0.002	9.76 %
	P3	MgO	0.00041	0.00039	0.002	4.88 %
	P4	MgO		0.00037	0.002	9.76 %
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.00039	0.002	4.88 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00037	0.002	9.76 %
	P3	MgO	0.00041	0.00039	0.002	4.88 %
	P4	MgO		0.00037	0.002	9.76 %
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.00039	0.002	4.88 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.00037	0.002	9.76 %
	P3	MgO	0.00041	0.00039	0.002	4.88 %
	P4	MgO		0.00037	0.002	9.76 %

• Plata

Tabla 52. Eficiencia, respecto a plata

Muestreo	Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	Cantidad de Remoción mg/L	Porcentaje de Remoción	
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.0023	0.0001	4.2 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0022	0.0002	8.3 %
	P3	MgO	0.0024	0.0023	0.0001	4.2 %
	P4	MgO		0.0022	0.0002	8.3 %
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.0023	0.0001	4.2 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0022	0.0002	8.3 %
	P3	MgO	0.0024 mg/L	0.0023	0.0001	4.2 %
	P4	MgO		0.0022	0.0002	8.3 %
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.0023	0.0001	4.2 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0022	0.0002	8.3 %
	P3	MgO	0.0024	0.0023	0.0001	4.2 %
	P4	MgO		0.0022	0.0002	8.3 %
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.0023	0.0001	4.2 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0022	0.0002	8.3 %
	P3	MgO	0.0024	0.0023	0.0001	4.2 %
	P4	MgO		0.0022	0.0002	8.3 %
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.0023	0.0001	4.2 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0022	0.0002	8.3 %
	P3	MgO	0.0024	0.0023	0.0001	4.2 %
	P4	MgO		0.0022	0.0002	8.3 %
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.0023	0.0001	4.2 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0022	0.0002	8.3 %
	P3	MgO	0.0024	0.0023	0.0001	4.2 %
	P4	MgO		0.0022	0.0002	8.3 %

● Plomo

Tabla 53. Eficiencia, respecto a plomo

Muestreo		Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Eficiencia
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>		1.449	0.2	14.0 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0053	0.2	99.7 %
	P3	MgO	1.685	0.0043	0.2	99.7 %
	P4	MgO		0.0026	0.2	99.8 %
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		1.002	0.2	40.5 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0098	0.2	99.4 %
	P3	MgO	1.685	0.0069	0.2	99.6 %
	P4	MgO		0.0065	0.2	99.6 %
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.9925	0.2	41.1 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0114	0.2	99.3 %
	P3	MgO	1.685	0.0097	0.2	99.4 %
	P4	MgO		0.0084	0.2	99.5 %
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.5012	0.2	70.3 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0114	0.2	99.3 %
	P3	MgO	1.685	0.0097	0.2	99.4 %
	P4	MgO		0.0084	0.2	99.5 %
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.3102	0.2	81.6 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0299	0.2	98.2 %
	P3	MgO	1.685	0.0054	0.2	99.7 %
	P4	MgO		0.0041	0.2	99.8 %
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		0.226	0.2	86.6 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		0.0300	0.2	98.2 %
	P3	MgO	1.685	0.0040	0.2	99.8 %
	P4	MgO		0.0039	0.2	99.8 %

• Zinc

Tabla 54. Eficiencia, respecto a Zinc

Muestreo		Residuos	C. Inicial mg/L	C. Final mg/L	LMP mg/L	Porcentaje de Remoción
23 Abril	P1	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P3	MgO	10	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO		0.334	1.5	96.7 %
08 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P3	MgO	10	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO		0.332	1.5	96.7 %
23 Mayo	P1	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P3	MgO	10	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO		0.336	1.5	96.6%
08 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P3	MgO	10	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO		0.422	1.5	95.8 %
23 Junio	P1	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P3	MgO	10	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO		2.144	1.5	78.6 %
08 Julio	P1	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P2	CaCO <sub>3</sub>		10	1.5	0.0 %
	P3	MgO	10	10	1.5	0.0 %
	P4	MgO		4.470	1.5	55.3 %