

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL**



**REMOCIÓN DE METALES EN AGUA RESIDUAL MINERA POR  
MEDIO DE COAGULANTE NATURAL DE ESCAMA DE PESCADO**

**POR: KAREM IVONNE HUAYTA ORIHUELA**

**Tutor: Ing. Hernán Agustín Coriza Rivas**  
**LA PAZ – BOLIVIA**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## ***DEDICATORIA***

*Dedico este trabajo a mis padres Félix y Elvira  
quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han  
permitido llegar a cumplir hoy un sueño más.*

*A mis hermanas Helen y Lilian por su cariño y apoyo  
incondicional, durante todo este proceso.*

*A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos  
y palabras de aliento hicieron de mí una mejor  
persona.*

***KAREM IVONNE HUAYTA ORIHUELA***

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

Mi profundo agradecimiento al Ing. Hernán Coriza, mi tutor, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a todos mis docentes, en especial a los del Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona.

Al personal de laboratorio del Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, en especial al Tec. Clemente Suxo que con su amplia experiencia y conocimiento me orientaron al correcto desarrollo y culminación con éxito este trabajo.

A David Bellido por su apoyo incondicional para alcanzar mis objetivos.

**Karem Ivonne Huayta Orihuela**

## RESUMEN

La contaminación del agua con metales pesados genera serios problemas ambientales y por la tanto pone en riesgo la salud humana. Existen métodos tradicionales para remover los metales tóxicos del agua, muchos de los cuales son costosos y no reutilizables. La bioadsorción es una alternativa, la cual utiliza biomasas vivas o muertas para captar y concentrar metales pesados. En esta investigación se estudió las escamas de pescado de Sábalo y Pejerrey como biomasa adsorbente de metales pesados disueltos en aguas residuales específicamente de Manganese, Cobre, Zinc y Cadmio.

En la primera etapa se realizó la preparación del adsorbente, el lavado de las escamas de pescado con agua desionizada, para posteriormente llevarlas a secado al horno a 60 °C por 72 horas y su posterior molienda y almacenado. El diseño experimental considero la adsorción con un volumen de muestra de 1000 ml, se evaluó el efecto del tamaño del adsorbente, dosificación de adsorbente orgánico, tiempo de contacto, tiempo óptimo y gradiente de velocidad óptimo en mezcla rápida, efecto de la concentración, efecto del pH.

El tamaño óptimo obtenido de la partícula fue del rango de 1.18 mm – 0.85 mm, según el Índice de Langmuir se tiene una  $q_{\max}$  alta para este rango. La dosificación de adsorbente es de 13, 15 y 28 gr/lt para Cobre, Zinc y Cadmio respectivamente para la muestra sintética y 180 gr/lt para la muestra real minera.

Del estudio de la cinética del proceso de adsorción, se determinó que el tiempo óptimo, donde ocurre mayor remoción, se da a los 20 min de mezcla rápida, incluso se establece como tiempo de equilibrio, dado que a partir de ese tiempo no ocurren grandes cambios en la concentración final del metal.

Se estableció que el pH óptimo, para el cual se presenta mejor remoción en el tratamiento, tanto con el bioadsorbente de escama de pescado de sábalo y pejerrey se encuentra arriba de 5, no se recomiendan valores inferiores debido a que el exceso de acidez disminuye considerablemente la remoción.

Por último, se concluyó en la realización un tratamiento en serie para ambos adsorbentes ya que se tiene mejores resultados teniendo remociones de 97 % Cu, 38% Mn, 77% Zn y 61% Cd para el sábalo y 93 % Cu, 69% Mn, 79% Zn y 72% Cd para el pejerrey. Teniendo mejores eficiencias para el Pejerrey excepto para Cobre.

## ABSTRACT

The contamination of water with heavy metals generates serious environmental problems and both puts human health at risk. There are traditional methods to remove metals water toxic, many of which are expensive and not reusable. Bioadsorption is a alternative, which uses live or dead biomass to capture and concentrate heavy metals. In this research studied the scales of Sabalo and Pejerrey fish as biomass heavy metal adsorbent dissolved in wastewater specifically from Manganese, Copper, Zinc and Cadmium.

In the first stage the preparation of the adsorbent, the washing of the scales of fish with deionized water, then take them to dry in the oven at 60 °C for 72 hours and its subsequent grinding and storage. The experimental design considered adsorption with a 1000 ml sample volume, the effect of adsorbent size, dosage of organic adsorbent, contact time, optimal time and optimum speed gradient in quick mixing, concentration effect, pH effect.

The optimum particle size obtained was in the range of 1.18 mm - 0.85 mm, according to the Langmuir index has a high  $q_{\max}$  for this range. The dosage of adsorbent is 13,15 and 28 gr / lt for Copper, Zinc and Cadmium respectively for the synthetic sample and 180 gr /lt for the real mining sample.

From the study of the kinetics of the adsorption process, it was determined that the optimal time, where greater removal occurs, it occurs at 20 min of rapid mixing, it is even established as equilibrium time, since as of that time no major changes occur in the final concentration of the metal.

It was established that the optimum pH, for which there is better removal in the treatment, both with the bioadsorbent of shark and pejerrey fish scale is above 5, no lower values are recommended because excess acidity decreases considerably the removal.

Finally, a serial treatment for both adsorbents was concluded in the realization since it has better results having removals of 97% Cu, 38% Mn, 77% Zn and 61% Cd for the shad and 93% Cu, 69% Mn, 79% Zn and 72% Cd for the pejerrey. Having better efficiencies for the Pejerrey except for Copper.



2019-TTES-805-D-2

**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS**  
**RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA N° 1-2425/2019**  
**La Paz, 26 de Noviembre de 2019**

**VISTOS:**

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **25 de Noviembre del 2019** por **KAREM IVONNE HUAYTA ORIHUELA** con **C.I. N° 6972896 LP.**, con Número de Trámite **DA 1322/2019**, señala la pretensión de inscripción de la Obra Literaria (Proyecto de Grado) titulada: "**REMOCIÓN DE METALES EN AGUA RESIDUAL MINERA POR MEDIO DE COAGULANTE NATURAL DE ESCAMA DE PESCADO**"; cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

**CONSIDERANDO:**

Qué, en observación al Artículo 4 del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152, que señala: "*El Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma descentralizada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración*".

Que, el Artículo 16 del Decreto Supremo N° 27938 establece: "*Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión*". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión N° 351 del Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, la Ley de Derecho de Autor N° 1322, el Decreto Supremo N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, de conformidad al Artículo 18 de la Ley de Derecho de Autor N° 1322, en concordancia con el Artículo 18 de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, se tiene que: "*La duración de la protección concedida por el ordenamiento jurídico vigente será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios*".

Que, se deja establecido de acuerdo al Artículo 4 de la Ley Derecho de Autor N° 1322 y el Artículo 7 de la Decisión N° 351 del Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "*No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial*".

Que, la solicitud presentada se vincula con los Artículos 6 de la Ley de Derecho de Autor N° 1322; 26 Numeral 1 Inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor; y, 4 de la Decisión N° 351 del Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.



Oficina central - La Paz  
 Av. Argentina, n.º 1914,  
 Edif. Angélica María,  
 entre Villalobos y Díaz Romero,  
 zona Miraflores  
 Telfs.: 2115700 - 2119276 - 2119251  
 Fax: 2115700

Oficina distrital - El Alto  
 Av. Juan Pablo II, n.º 2560,  
 Edif. Multicentro El Ceibo Ltda.,  
 piso 2, ofic. 1A,  
 zona 16 de Julio  
 Telf.: 2141001

Oficina distrital - Cochabamba  
 Calle Chuquisaca, n.º 649,  
 piso 2, entre Antezana y Lanza,  
 zona Central - Noroeste  
 Telf.: 4141403

Oficina distrital - Santa Cruz  
 Prolongación Quijarro,  
 Esq. Uruguay, n.º 29  
 Edif. Bicentenario, 1er. Anillo  
 Telf.: 3121752

Oficina distrital - Chuquisaca  
 Calle Kilómetro 7, n.º 366  
 casi esq. Urriolagoitia  
 zona Parque Bolívar  
 Telf.: 72005873

Oficina distrital - Tarija  
 Calle Ingavi, n.º 156  
 entre Colón y Suipacha  
 Edif. Coronado, piso 2,  
 Ofic. 202, zona Central  
 Telf.: 72015286

Oficina distrital - Oruro  
 Calle 6 de Octubre, n.º 5837  
 entre Ayacucho y Junín,  
 Galería Central, ofic. 14 (ex. Banco Fie)  
 Telf.: 67201288

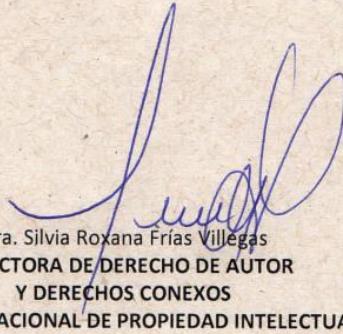
**POR TANTO:**

La Directora de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

**RESUELVE:**

**INSCRIBIR** en el Registro de Obras Literarias de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, la Obra Literaria (Proyecto de Grado) titulada: "**REMOCIÓN DE METALES EN AGUA RESIDUAL MINERA POR MEDIO DE COAGULANTE NATURAL DE ESCAMA DE PESCADO**"; a favor de la autora y titular: **KAREM IVONNE HUAYTA ORIHUELA** con C.I. Nº 6972896 LP.; quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrate, Comuníquese y Archívese.



Dra. Silvia Roxana Frías Villegas  
DIRECTORA DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS  
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL



SRFV/mfsm  
c.c: Arch.

Oficina central - La Paz  
Av. Argentina, n.º 1914,  
Edif. Angélica María,  
entre Villalobos y Díaz Romero,  
zona Miraflores  
Telf.: 215700 - 219276 - 2119251  
Fax: 215700

Oficina distrital - El Alto  
Av. Juan Pablo II, n.º 2560,  
Edif. Multicentro El Ceibo Ltda.,  
piso 2, ofic. 1A,  
zona 16 de Julio  
Telf.: 2141001

Oficina distrital - Cochabamba  
Calle Chuquisaca, n.º 649,  
piso 2, entre Antezana y Lanza,  
zona Central - Noroeste  
Telf.: 4141403

Oficina distrital - Santa Cruz  
Prolongación Quijarro,  
Esq. Uruguay, n.º 29  
Edif. Bicentenario, 1er. Anillo  
Telf.: 3121752

Oficina distrital - Chuquisaca  
Calle Kilómetro 7, n.º 366  
casi esq. Urriolagoitia  
zona Parque Bolívar  
Telf.: 72005873

Oficina distrital - Tarija  
Calle Ingavi, n.º 156  
entre Colón y Sulpacha  
Edif. Coronado, piso 2,  
Ofic. 202, zona Central  
Telf.: 72015286

Oficina distrital - Oruro  
Calle 6 de Octubre, n.º 5837  
entre Ayacucho y Junín,  
Galería Central, ofic. 14 (ex. Banco Fie)  
Telf.: 67201288

## **REMOCIÓN DE METALES EN AGUA RESIDUAL MINERA POR MEDIO DE COAGULANTE NATURAL DE ESCAMA DE PESCADO**

### **Contenido**

1	INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES .....	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Justificación.....	1
1.3	Estado del arte .....	2
1.4	Objetivos.....	4
1.4.1	Objetivo general .....	4
1.4.2	Objetivos específicos.....	4
1.5	Alcances y limitaciones .....	4
1.6	Metodología empleada .....	4
2	IMPACTOS DE LA MINERIA DE MINERALES METALICOS EN EL MEDIO NATURAL.....	5
2.1	Contaminación minera a nivel mundial.....	5
2.2	Contaminación minera en Bolivia .....	9
2.2.1	Los pasivos ambientales mineros.....	10
2.2.2	Procesos alternativos de tratamiento de aguas mineras acidas .....	11
2.3	Contaminación minera a nivel departamental – Oruro.....	13
2.3.1	Conviviendo con la contaminación .....	14
2.3.2	Mina San José.....	18
3	TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MINERAS A TRAVÉS DE PROCESO DE COAGULACIÓN Y PROCESO DE FLOCULACIÓN .....	20
3.1	Coagulación y Floculación .....	20
3.2	Mecanismos de desestabilización de sistemas coloidales (Coagulación) .....	20
3.2.1	Compresión de la doble capa .....	22
3.2.2	Adsorción y neutralización de la carga .....	22
3.2.3	Captura en un precipitado de hidróxido metálico .....	24

3.2.4	Adsorción y puente interparticular .....	24
4	PRUEBA DE JARRAS .....	27
4.1	Prueba de Jarras Modificada.....	27
4.2	Prueba de Jarras Estándar .....	30
4.2.1	Gradiente de velocidad óptima – Mezcla rápida .....	32
4.2.2	Tiempo óptimo - Mezcla rápida .....	33
5	COAGULANTES NATURALES EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS .....	34
5.1	Moringa oleífera .....	34
5.2	Opuntia ficus indica (cactus) .....	34
5.3	Quitosano.....	35
5.4	Escamas de pescado.....	35
5.4.1	Propiedades de escamas de pescado como bioadsorbente natural .....	35
5.5	Escamas de Sábalo y Pejerrey .....	40
5.5.1	Sábalo ( <i>Clupea alosa</i> ).....	40
5.5.2	Pejerrey ( <i>Odontesthes bonariensis</i> ).....	42
6	METALES PESADOS Y EFECTOS SOBRE LA SALUD .....	44
6.1	Cadmio (Cd) .....	44
6.1.1	Información fisico – química .....	44
6.1.2	Efectos del Cadmio sobre la salud .....	44
6.1.3	Efectos ambientales del Cadmio .....	45
6.2	Manganoso (Mn).....	46
6.2.1	Información Físico – Química.....	46
6.2.2	Efectos del Manganoso sobre la salud.....	46
6.2.3	Efectos ambientales del Manganoso .....	47
6.3	Zinc (Zn).....	48
6.3.1	Información Físico – Química.....	48
6.3.2	Efectos del Zinc sobre la salud.....	48

---

6.3.3	Efectos ambientales del Zinc.....	49
6.4	Cobre (Cu) .....	50
6.4.1	Información Físico – Químico .....	50
6.4.2	Efectos del Cobre sobre la salud .....	50
6.4.3	Efectos ambientales del Cobre .....	51
6.5	Contaminación de aguas por metales pesados.....	52
6.6	Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica .....	54
7	MÉTODOS APLICADOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES INORGÁNICOS .....	57
7.1	Tratamiento convencional .....	57
7.2	Bioadsorción.....	58
8	SELECCIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO .....	60
8.1	Muestra natural de un efluente minero “MINA SAN JOSÉ DE ORURO” .....	60
8.1.1	Ubicación de la Mina San José .....	60
8.1.2	Ubicación geográfica.....	61
8.1.3	Ubicación del punto de muestreo .....	62
8.2	Accesibilidad .....	63
8.3	Preservación de muestras.....	63
8.4	Volumen de muestra .....	63
9	EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO (BIOADSORCIÓN) DE IONES METÁLICOS EN AGUAS RESIDUALES .....	64
9.1	Preparación del adsorbente.....	64
9.2	Preparación de las muestras sintéticas.....	67
9.3	Proceso de adsorción de las escamas de pescado en muestras sintéticas .....	69
9.4	Proceso de adsorción mediante las escamas de pescado de una mezcla iónica de metales Cadmio (Cd), Manganeso (Mn), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) en una muestra sintética mediante la Prueba de Jarras.....	69
9.4.1	Efecto del tamaño de malla .....	69

9.4.2	Dosis optima del adsorbente de escamas de pescado.....	87
9.4.3	Determinación del Tiempo de sedimentación óptima .....	91
9.4.4	Determinación del gradiente de velocidad óptima .....	93
9.4.5	Determinación del Tiempo óptimo de Mezcla rápida .....	94
9.4.6	Efecto de la concentración .....	96
9.5	Proceso de adsorción mediante las escamas de pescado de una mezcla iónica de metales Cadmio (Cd), Manganeso (Mn), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) en el efluente de la Mina San José mediante la Prueba de Jarras .....	100
9.5.1	Dosis óptima del adsorbente de escamas de pescado.....	100
9.5.2	Efecto del pH.....	104
9.5.3	Tratamiento en serie .....	109
9.5.4	Tratamiento en serie con la adición de cal .....	116
10	COSTOS DE PROCESAMIENTO.....	119
10.1	Análisis y costo del tratamiento con coagulante natural.....	119
11	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	120
11.1	Conclusiones .....	120
11.2	Recomendaciones .....	123
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	125

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Polvo emitido en las actividades extractivas .....	5
Figura 2: Chuquicamata (Chile) .....	5
Figura 3: Pila de cianuración en El Soldado (Chile) .....	6
Figura 4: Mina Sur (Calama, Chile).....	7
Figura 5: Mina Brillador (La Serena, Chile) .....	8
Figura 6: Rio Toro (Chile) .....	9
Figura 7:La entrada a la empresa minera Huanuni. ....	14
Figura 8: Aguas utilizadas en el ingenio .....	15
Figura 9: La contaminación de la Mina Huanuni por los ríos de la ciudad .....	16
Figura 10: Los pozos usados por los relaveros para sacar el Estaño. Tras realizar ese trabajo echan las aguas directamente al rio Huanuni.....	17
Figura 11: Energía potencial de interacción de las partículas coloidales:.....	21
Figura 12: Curvas esquemáticas de coagulación para varios coagulantes distintos .....	23
Figura 13: Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides por polímeros .....	25
Figura 14: Sistema para tomar turbiedades residuales .....	28
Figura 15: Tasa de remoción de floc .....	28
Figura 16: Predicción de la edad de peces usando el número de anillos de escama .....	36
Figura 17: Algunos tipos de escamas de pescado. Cicloide, Ctenoide y Placoide .....	37
Figura 18: Principales elementos definidos en una escama. R1: radio primario. R2: radio secundario. F: focus. I: lóbulos del campo oral. CP: campo posterior. CL: campos laterales. CA: Campo anterior. LE: Longitud máxima. ....	38
Figura 19: Estructura de las fibras de colágeno (Fuente: Mathews et al, 2002) .....	39
Figura 20: Pez Sábalo.....	42
Figura 21: Pez Pejerrey .....	43
Figura 22: Ubicación Mina San José.....	61
Figura 23: Recorrido de las Aguas acidas, Variación de PH a lo largo del recorrido.....	62

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Composición de aguas mineras de algunos distritos mineros de Bolivia.....	11
Cuadro 2: Calculo del floc removido .....	29
Cuadro 3: Información Físico - Química .....	44
Cuadro 4: Información Físico - Química .....	46
Cuadro 5: Información Físico - Químico .....	48
Cuadro 6: Información Físico - Químico .....	50
Cuadro 7: Metales pesados presentes en residuos líquidos industriales .....	53
Cuadro 8: Valores Máximos Admisibles de Parámetros en Cuerpos Receptores.....	54
Cuadro 9: Límites Permisibles para Descargas Liquidas.....	54
Cuadro 10: Medición de las aguas acidas de la mina de San José .....	60
Cuadro 11: Materiales, Reactivos y Equipos .....	64
Cuadro 12: Preparación del adsorbente de Escama de Pescado.....	66
Cuadro 13: Preparación de las soluciones sintéticas .....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tamaño de Abertura Serie Tyler.....	70
Tabla 2: Parámetros adoptados para el análisis.....	71
Tabla 3: Efecto de tamaño de malla para Cobre - Escama de Sábalo .....	71
Tabla 4: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Sábalo.....	71
Tabla 5: Proceso de linealización.....	73
Tabla 6: Efecto de tamaño de malla para Zinc - Escamas de Sábalo .....	73
Tabla 7: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Sábalo.....	74
Tabla 8: Proceso de linealización.....	75
Tabla 9: Efecto de tamaño de malla para Cadmio – Escamas de Sábalo .....	75
Tabla 10: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Sábalo.....	76
Tabla 11: Proceso de linealización.....	77
Tabla 12: Tamaño de Abertura Serie Tyler.....	79
Tabla 13: Parámetros adoptados para el análisis.....	79
Tabla 14: Efecto de tamaño de malla para Cobre – Escamas de Pejerrey .....	79
Tabla 15: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Pejerrey .....	80
Tabla 16: Proceso de linealización .....	81
Tabla 17: Efecto de tamaño de malla para Zinc – Escama de Pejerrey .....	81
Tabla 18: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Pejerrey .....	82
Tabla 19: Proceso de linealización .....	83
Tabla 20: Efecto de tamaño de malla para Cadmio – Escama de Pejerrey .....	83
Tabla 21: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Pejerrey .....	84
Tabla 22: Proceso de linealización .....	85
Tabla 23: Efecto de tamaño de malla para Manganese – Escamas de Pejerrey.....	85
Tabla 24: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Pejerrey .....	86
Tabla 25: Proceso de linealización .....	87
Tabla 26: Parámetros iniciales para el análisis.....	87

Tabla 27: Dosis de escamas de pescado en función de la concentración para Cobre, Zinc y Cadmio .....	88
Tabla 28: Parámetros adoptados para el análisis.....	92
Tabla 29: Tiempo de sedimentación óptima .....	92
Tabla 30: Parámetros adoptados para el análisis.....	93
Tabla 31: Gradiente de velocidad óptima .....	93
Tabla 32: Parámetros adoptados para el análisis.....	94
Tabla 33: Tiempo óptimo de mezcla rápida .....	94
Tabla 34: Parámetros adoptados para el análisis.....	96
Tabla 35: Efecto de la concentración - <b>MANGANESO</b> .....	96
Tabla 36: Efecto de la concentración - <b>COBRE</b> .....	96
Tabla 37: Efecto de la concentración - <b>ZINC</b> .....	96
Tabla 38: Efecto de la concentración - <b>CADMIO</b> .....	97
Tabla 39: Parámetros adoptados para el análisis.....	100
Tabla 40: Concentración inicial de metales pesados de la Mina San José.....	100
Tabla 41: Dosis óptima del adsorbente de escamas de pescado .....	101
Tabla 42: Parámetros adoptados para el análisis.....	104
Tabla 43: Concentración inicial de metales pesados de la Mina San José.....	105
Tabla 44: Efecto del pH con la adición de Hidróxido de Sodio.....	105
Tabla 45:: Efecto del pH con la adición de Cal.....	106
Tabla 46: Parámetros adoptados para el análisis.....	109
Tabla 47: Tratamiento en serie - Escama de Sábalo .....	110
Tabla 48: Tratamiento en serie - Escama de Pejerrey .....	111
Tabla 49: Parámetros adoptados para el análisis.....	116
Tabla 50: Tratamiento en Serie con adición de cal .....	116
Tabla 51:: Costo de adsorbente (Sábalo).....	119
Tabla 52: Costo de adsorbente (Pejerrey) .....	119

---

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Eficiencia de Cobre vs Dosis de escama de pescado (Sábalo) .....	71
Gráfico 2: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 1</b> ) .....	72
Gráfico 3: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 2</b> ) .....	72
Gráfico 4: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 3</b> ) .....	72
Gráfico 5: Eficiencia de Zinc vs Dosis de escamas de pescado (Sábalo) .....	73
Gráfico 6: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 1</b> ) .....	74
Gráfico 7: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 2</b> ) .....	74
Gráfico 8: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 3</b> ) .....	75
Gráfico 9: Eficiencia de Cadmio vs Dosis de escamas de pescado (Sábalo) .....	76
Gráfico 10: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 1</b> ) .....	76
Gráfico 11: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 2</b> ) .....	77
Gráfico 12: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 3</b> ) .....	77
Gráfico 13: Eficiencia de Cobre vs Dosis de escamas de pescado (Pejerrey) .....	79
Gráfico 14: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 1</b> ) .....	80
Gráfico 15: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 2</b> ) .....	80
Gráfico 16: Eficiencia de Zinc vs Dosis de escama de pescado (Pejerrey) .....	81
Gráfico 17: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 1</b> ) .....	82
Gráfico 18: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 2</b> ) .....	82
Gráfico 19: Eficiencia de Cadmio vs Dosis de escama de pescado (Pejerrey) .....	83
Gráfico 20: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 1</b> ) .....	84
Gráfico 21: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 2</b> ) .....	84
Gráfico 22: Eficiencia de Manganese vs Dosis de escama de pescado (Pejerrey) .....	85
Gráfico 23: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 1</b> ) .....	86
Gráfico 24: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir ( <b>CASO 2</b> ) .....	86
Gráfico 25: Dosis de escamas de pescado vs Concentración final (mg/l) COBRE .....	88
Gráfico 26: Dosis de escamas de pescado vs Concentración final (mg/l) ZINC .....	89
Gráfico 27: Dosis de escamas de pescado vs Concentración final (mg/l) CADMIO .....	89
Gráfico 28: pH vs Dosis de escamas de pescado .....	90
Gráfico 29: Concentración final vs pH final .....	91
Gráfico 30: Concentración final vs Tiempo de sedimentación .....	92
Gráfico 31: Concentración final vs Velocidad .....	93

---

Gráfico 32: Concentración final vs Tiempo de mezcla rápida .....	95
Gráfico 33: Dosis de escama vs Concentración inicial .....	98
Gráfico 34: pH vs Dosis de escama de pescado.....	99
Gráfico 35: Concentración final vs Dosis de escama de Pescado - <b>COBRE</b> .....	101
Gráfico 36: Concentración final vs Dosis de escama de Pescado - <b>MANGANESO</b> .....	101
Gráfico 37: Concentración final vs Dosis de escama de Pescado - <b>ZINC</b> .....	102
Gráfico 38: Concentración final vs Dosis de escama de Pescado - <b>CADMIO</b> .....	102
Gráfico 39: Eficiencia vs Dosis de escama de pescado .....	102
Gráfico 40: pH vs Dosis de escama de pescado .....	103
Gráfico 41: Concentración final vs pH final .....	103
Gráfico 42: Concentración final vs pH .....	105
Gráfico 43: Concentración Final vs pH.....	106
Gráfico 44: Concentración final vs Nro. de proceso - <b>COBRE</b> .....	111
Gráfico 45: Concentración final vs Nro. de proceso - <b>MANGANESO</b> .....	112
Gráfico 46: Concentración final vs Nro. de proceso - <b>ZINC</b> .....	112
Gráfico 47: Concentración final vs Nro. de proceso - <b>CADMIO</b> .....	112
Gráfico 48: Eficiencia vs Metales pesados ( <b>SÁBALO Y PEJERREY</b> ) .....	113
Gráfico 49: pH vs Nro. de proceso ( <b>SÁBALO y PEJERREY</b> ) .....	113
Gráfico 50: Concentración final vs pH ( <b>ESCAMAS DE SÁBALO</b> ) .....	113
Gráfico 51: Concentración final vs pH ( <b>ESCAMAS DE PEJERREY</b> ).....	114
Gráfico 52: Concentración final vs Tiempo de mezcla rápida más tiempo de sedimentación ....	117
Gráfico 53:Eficiencia vs Tiempo de mezcla rápida más tiempo de sedimentación .....	117
Gráfico 54: pH vs Dosis de escamas de pescado .....	117

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Bocamina Mina San José.....	61
Fotografía 2: Bocamina Mina San José – Punto de Muestreo .....	63
Fotografía 3: Metal Zinc y Cobre.....	65
Fotografía 4: Espectrofotómetro de adsorción atómica .....	65
Fotografía 5: Papel filtro Nro. 41 .....	65
Fotografía 6: Balanza Analítica.....	65
Fotografía 7: Lavado del adsorbente (escamas de pescado) con agua desionizada .....	66
Fotografía 8: Secado del adsorbente (escamas de pescado).....	66
Fotografía 9: Tamizado del adsorbente .....	67
Fotografía 10: 1 gr de Cobre y Solución al 1% de Ácido Nítrico .....	68
Fotografía 11: Dilución de Cobre con (1+1) de Ácido Nítrico .....	68
Fotografía 12: Almacenamiento de reactivos.....	69
Fotografía 13: Peso de adsorbente de escama de pescado (Sáballo).....	78
Fotografía 14: Prueba de Jarras para definir el tamaño de la malla (Sáballo).....	78
Fotografía 15: Proceso de Digestión por 2 horas (Sáballo).....	78
Fotografía 16: Proceso de Filtración para su posterior lectura.....	78
Fotografía 17: Prueba de Jarras para encontrar la dosis de adsorbente (Sáballo) .....	90
Fotografía 18: Prueba de Jarras con velocidad de 60 RPM; tiempo de 10 y 20 minutos de mezcla rápida (Sáballo) .....	95
Fotografía 19: Prueba de Jarras para evaluar el efecto de la concentración (Sáballo) .....	99
Fotografía 20: Prueba de Jarras para evaluar el efecto de la concentración (Pejerrey).....	100
Fotografía 21: Prueba de Jarras para definir la dosificación de adsorbente (Sáballo - Muestra minera) .....	104
Fotografía 22: Adición de Hidróxido de Sodio 6 N (Sáballo – Muestra minera) .....	107
Fotografía 23: Prueba de Jarras para evaluar la eficacia del Hidróxido de Sodio (Sáballo - Muestra minera) .....	107

Fotografía 24: Adición de cal para subir pH del agua minera (Sábalo - Muestra minera) .....	108
Fotografía 25: Lodo generado por la adición de cal (Sábalo - Muestra minera) .....	108
Fotografía 26: Tratamiento en serie, prueba de jarras para M- 0 (Sábalo - Muestra minera) .....	114
Fotografía 27: Recirculación de agua con coladera (Sábalo - Muestra minera) .....	114
Fotografía 28: Nuevamente Prueba de Jarras para M – 1 con otros 30 g de adsorbente (Sábalo - Muestra minera) .....	115

## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

#### 1.1 Antecedentes

Hoy en día, la contaminación del agua es sin duda uno de los principales factores involucrados en el desarrollo humano, teniendo en cuenta su influencia en la vida humana. Por tanto, requiere de investigaciones, como mejorar la calidad del agua a partir de procesos aceptables para el medio ambiente. Entre las técnicas promisorias para el tratamiento de aguas residuales se encuentra el uso de coagulantes – floculantes naturales, con el fin de obtener una mejor calidad del agua y generar la reducción del uso de productos sintéticos nocivos a nivel ambiental y para la salud humana. (Flaten, 2001)

Las etapas de coagulación y floculación son procesos esenciales y eficaces en el tratamiento de las aguas residuales industriales. A partir de estos procesos físicos y químicos, se obtiene la eliminación de sólidos totales suspendidos, turbidez, color y metales pesados lo que conlleva a la reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Hasta la fecha, los tipos de especies vegetales que se han utilizado ampliamente como coagulantes naturales son *Moringa oleifera* (moringa), *Strychnos potatorum* (nirmali), *Opuntia ficus indica* (cactus) y *Jatropha curcas*, usados en la disminución de contaminantes para los tratamientos de aguas residuales. (Sánchez – Martin et al., 2009)

Los polímeros orgánicos naturales han llegado a convertirse en gran interés, debido a que son compuestos que no generan efectos altamente nocivos al medio ambiente y la salud humana, dada su naturaleza orgánica además de obtenerlos a un bajo costo. (Renault et al., 2009).

De acuerdo a los antecedentes reportados en diversos estudios científicos, se puede evidenciar que los coagulantes y floculantes de origen natural para la eliminación de turbidez, color y metales pesados presentes en aguas residuales, han sido utilizados desde hace siglos. (Asrafuzzaman et al. 2011)

#### 1.2 Justificación

El incremento de la industria de manufactura y metal – mecánica exige la explotación exhaustiva de metales pesados como materia prima, lo que conlleva una elevada presencia de metales, trayendo como consecuencia que los ambientes acuáticos presenten concentración de metales que exceden los criterios de calidad de agua. Los metales pesados bajo su forma iónica son vertidos a ríos y mares provenientes de industria como curtiembres, baterías y metalurgia, sin el debido control ambiental (Abel, N et al 2008). (Citado por Walter Villalobos Morún, 2011)

Los metales pesados afectan el funcionamiento de los ecosistemas debido a su biomagnificación, a su vez, son de gran importancia económica, debido a los costos elevados en los tratamientos utilizados para la eliminación de estos del medio ambiente y por los daños que ocasionan a la salud (Mallevialle J, Wierner M, 1988). Numerosos estudios han abordado esta cuestión, existiendo unanimidad entre la comunidad científica respecto al carácter tóxico de los metales pesados para los seres vivos, dado que afectan a las cadenas alimenticias, provocando un efecto de bioacumulación entre los organismos de la cadena trófica (Velásquez CL, 2006).

Las características tóxicas de los metales pesados se pueden analizar desde diferentes puntos de vista: (1) toxicidad a largo plazo; (2) transformación a formas tóxicas bajo ciertas condiciones; (3) biomagnificación a través de la cadena alimenticia, lo que puede poner en peligro la vida humana; (4) no se degradan por ningún método, incluyendo biotratamientos y finalmente; (5) la toxicidad de metales pesados ocurre, incluso a bajas concentraciones desde 1,0 a 10 mg/ml. (Norma A. Cuizano y Abel E. Navarro, 2008).

Al implementar tecnologías de tratamiento, se estaría reduciendo un foco muy amplio de contaminación, evitando a la vez que estas industrias o empresas descarguen cantidades significativas de aguas residuales con metales pesados, las cuales ocasionan un desequilibrio en el ambiente y daños a la salud de una gran diversidad de especies, entre ellas el hombre.

La coagulación natural es una opción a los problemas actuales de contaminación puesto que es una tecnología limpia que genera desechos biodegradables. (Carlos Banchón, Ricardo Baquerizo, Diego Muñoz, Leila Zabrano, 2016). Se requieren adoptar a partir de agentes coagulantes y floculantes de fuentes naturales para el tratamiento de aguas residuales. Teniendo en cuenta que las materias primas utilizadas como coagulantes son fácilmente encontradas en nuestro medio, como lo es la escama de pescado, por lo tanto, los costos reducen y además su grado de toxicidad es bajo y tienen buena biodegradabilidad.

### 1.3 Estado del arte

Hildebrando Ramirez Arcilla, Jhoan Jaramillo Peralta, 2015. en su publicación denominado **“Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua”** donde el objetivo de su estudio mostrar que la materia prima propuesta para el tratamiento del agua se extrae de la naturaleza sin ningún proceso invasivo; de esta manera se rompe el paradigma de la exclusividad de los productos químicos industriales tales como el sulfato de aluminio y el sulfato férrico para tratar el agua y se abre la posibilidad a nuevas tecnología de bajo costo, inocuas para la salud humana y respetuosa con el medio ambiente. En conclusión, los coagulantes naturales funcionan mediante un mecanismo de adsorción seguido por la neutralización de carga. El empleo de

materiales naturales puede minimizar el impacto de los coagulantes químicos, reduciendo de manera significativa los costos de tratamiento si se dispone de ellos a nivel local.

CEPIS, 1975, en su artículo “**Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación**” donde el objetivo de este documento fue el de mostrar ejemplos para la obtención de polímeros naturales. En conclusión, se tiene que, en muchos casos, es factible reemplazar los polímeros sintéticos productos elaborados en base a una materia prima procedente de América Latina.

Mónica Alejandra Bravo Gallardo, 2017 en la monografía denominada “**Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales**” en el cual se muestra que el propósito fue recopilar información de tipo científico publicada en diferentes fuentes bibliográficas (Scopus, Science Direct, Springer y Pubmed), en torno al estudio de coagulantes y floculantes orgánicos de origen natural, y que contribuyen a la disminución de contaminantes en el agua, además de identificar como se lleva a cabo el mecanismo de coagulación y floculación. Como conclusión se obtuvo que los mecanismos de coagulación más aplicables para coagulantes y floculantes naturales son adsorción y neutralización de carga y adsorción y puente entre partículas que se atribuye aniónica o catiónica del agente coagulante. Los resultados de los estudios, reportan que las diferentes fuentes naturales utilizadas como coagulantes para remediación de agua y aguas residuales tienen un gran potencial como alternativa de coagulantes inorgánicos, debido a su toxicidad con el medio ambiente. Para llevar a cabo la eficacia en la actividad de los coagulantes es necesario tener en cuenta algunos parámetros fisicoquímicos como son principalmente la dosis del agente coagulante, concentración de contaminantes y pH. Sin embargo, gracias a que son componentes derivados de fuentes naturales no afectan tanto como lo hacen los coagulantes inorgánicos.

Serapio Delgado Huallpa, 2013 en la Tesis nombrada “**Evaluación de escamas de pescado como adsorbente de metales pesados de agua residual**” señala que el propósito fue evaluar la capacidad de adsorción de la mezcla iónica de metales pesados en las escamas de pescado lisa bajo diferentes condiciones experimentales. Además de determinar la capacidad de adsorción de la mezcla iónica de soluciones preparadas en laboratorio en las escamas de pescado lisa por medio de experimentos en lotes en diferentes condiciones como dosis de escama, tiempo de residencia, pH, concentración y tamaño de tamiz. Como conclusión se tiene que la preparación del adsorbente a partir de escamas de pescado es bastante sencilla y económica ya que no requiere mano de obra calificada ni equipos sofisticados para su lavado, secado, molienda y tamizado.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Determinar el nivel de remoción de Cadmio (Cd), Manganese (Mn), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) de muestras sintéticas y naturales de una fuente minera mediante un coagulante natural obtenido de las escamas del pescado y comparar con los niveles permitidos por el Reglamento de Contaminación Hídrica.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Preparar un coagulante natural a partir de las escamas de pescado para la remoción de metales a los límites establecidos por el Reglamento de Contaminación Hídrica.

Establecer la dosis óptima y tiempo de sedimentación utilizando el coagulante de escamas de pescado en muestras sintéticas, que contengan concentraciones de Cadmio (Cd), Manganese (Mn), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) preparadas en laboratorio, hasta los niveles establecidos en el reglamento.

Determinar la capacidad de adsorción del coagulante de escamas de pescado en muestras del efluente minero, para la determinar la remoción de Cadmio (Cd), Manganese (Mn), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) a niveles establecidos para descargas de contaminación hídrica.

Realizar un análisis de costo del uso de coagulante de escama de pescado y determinar si es factible en su implementación.

## 1.5 Alcances y limitaciones

Se determinó la eficiencia remocional del tratamiento con el coagulante de escama de pescado de muestra sintética y de un efluente minero.

## 1.6 Metodología empleada

Se recopiló la información necesaria para el proyecto de grado.

Se realizó diferentes ensayos de Prueba de Jarras para muestras sintéticas para los diferentes parámetros.

Se obtuvo el coagulante natural de la escama mediante dos tipos de pescado, sábalo y pejerrey.

Se realizó el muestreo de agua residual de origen minero con la evaluación de las condiciones preliminares en cuanto a los metales existentes.

Se determinó la dosis óptima tomando en cuenta las variables como: Dosificación de coagulante orgánico, tiempo de contacto, efecto del pH, efecto de la concentración, efecto del tamaño de malla, Gradiente de velocidad óptima, Tiempo óptimo, parámetros de coagulación, mediante la prueba de jarras.

## CAPÍTULO II

### 2 IMPACTOS DE LA MINERIA DE MINERALES METALICOS EN EL MEDIO NATURAL

#### 2.1 Contaminación minera a nivel mundial

##### a) Atmosfera

- **Emisiones sólidas:** el polvo emitido tiene su origen en las propias actividades extractivas durante la voladura y arranque de material, o durante los procesos de carga y transporte, o en relación a procesos metalúrgicos. Además, puede haber una importante remoción eólica de material fino en escombreras y balsas abandonadas.

*Figura 1: Polvo emitido en las actividades extractivas*



*Fuente: Impactos de la minería en el medio natural  
Javier Lillo, 2010*

*Figura 2: Chuquicamata (Chile)*



*Fuente: Impactos de la minería en el medio natural  
Javier Lillo, 2010*

- **Gases:** Los gases emitidos tienen su origen en la combustión de la maquinaria, la emisión natural durante el proceso de extracción ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , grisú – mezcla explosiva de metano y aire), la emisión en voladuras, y la emisión en procesos directamente relacionados con la actividad minera: combustión de carbón ( $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ), pirometalurgia ( $\text{SO}_2$ ).
- **Aerosoles:** La formación de aerosoles tóxicos se producen durante la explotación, y sobre todo, durante proceso de hidrometalurgia, que implican el riego por aspersión de pilas de mineral con compuestos a menudo de alta toxicidad (sulfúrico para la extracción de algunos elementos, como el cobre; cianuro de sodio para la extracción de oro).

Figura 3: Pila de cianuración en El Soldado (Chile)

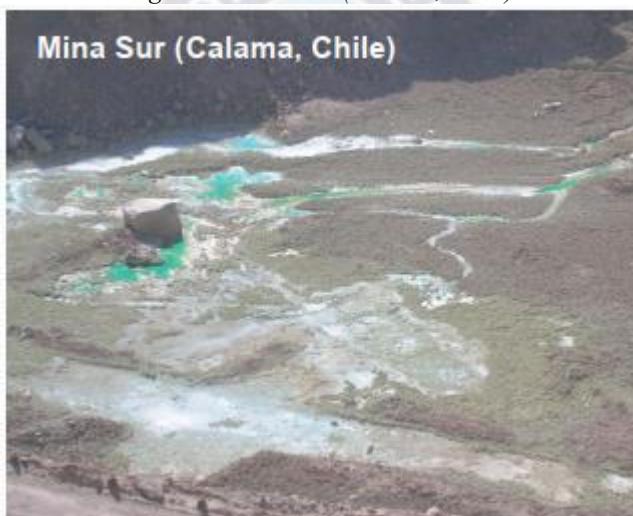


Fuente: *Impactos de la minería en el medio natural*  
Javier Lillo, 2010

- **Ruido:** se genera por voladuras, maquinaria pesada de arranque y transporte, maquinaria de molienda, etc.
- **Onda aérea:** se produce por las explosiones de las voladuras, y es una onda de presión, que se propaga por el aire atenuándose con la distancia, generando vibraciones.
- **Terreno:**
  - Desertización: Deforestación, erosión, perdida de suelo fértil.
  - Modificación del relieve, impacto visual, alteración de la dinámica de los procesos de ladera.
  - Peligros geotécnicos: Desestabilización de laderas por sobrecargas y/o excavaciones y alteración en el nivel freático. Subsidiencia por huecos y por depresión en el nivel freático.
- **Suelos:**
  - Perdida de propiedades físicas:
    - i) Variaciones en la textura (porosidad, permeabilidad) por procesos de esponjamiento, compactación, deposición de partículas, formación de costras.
    - ii) Perdida de la estructura edáfica por compactación, mezcla de horizontes, deposición de partículas, etc.
    - iii) Variaciones en el régimen hídrico del suelo por alteraciones en el nivel freático, y variaciones texturales y estructurales.
    - iv) Perdida física de suelo por extracción y arranque, acumulación de vertidos (escombreras y balsas) o construcción de infraestructuras. Por erosión inducida.

- v) Alteraciones en la horizonación por arranque y/o mezcla de horizontes, deposición de vertidos y polvo. Perdida de los horizontes superficiales por erosión inducida.
- Perdida de propiedades químicas:
  - i) Contaminación por metales pesados (Cu, Pb, Cd, Hg, etc.), metaloides (As) e hidrocarburos generada por efluentes líquidos y sólidos.
  - ii) Acidificación por acumulación y oxidación de sulfuros y drenaje ácido.
  - iii) Adición de sales al suelo (sulfatos).

*Figura 4: Mina Sur (Calama, Chile)*



*Fuente: Impactos de la minería en el medio natural  
Javier Lillo, 2010*

- Aguas:
  - Alteraciones en la dinámica fluvial:
    - i) Variación del perfil y trazado de la corriente fluvial, variaciones en el nivel de base local, alteración en la dinámica (variaciones en las tasas de erosión/sedimentación) en el perfil (aguas abajo y aguas arriba) por excavaciones, diques y represas. Aumentos e la peligrosidad de inundación.
    - ii) Incorporación de partículas sólidas en la corriente, aumento de la carga de fondo y en suspensión, incremento en las tasas de sedimentación aguas abajo.

Figura 5: Mina Brillador (La Serena, Chile)



Fuente: Impactos de la minería en el medio natural  
Javier Lillo, 2010

- Perdida de masas de aguas:
  - i) Ocupación de lagos, embalses, bahías.
  - ii) Perdida de masas glaciares.
- Alteraciones en el régimen hidrogeológico:
  - i) Variaciones en el nivel freático, variaciones en el régimen de recarga y modificaciones en el flujo subterráneo por efectos barrera, drenajes inducidos, infiltración restringida / favorecida, compactación, modificación del relieve, deforestación.
- Contaminación por metales pesados y metaloides (As):
  - i) En coloides en suspensión.
  - ii) En especies en disolución: uno de los procesos más relevantes para la movilización de metales desde la fase sólida es el “Acid mine drainage”, AMD, además de los procesos de metalurgia por lixiviación y cianuración.
  - iii) Se puede producir nuevamente la incorporación de los metales a la fase sólida (sedimentos) por adsorción y/o coprecipitación.

*Figura 6: Rio Toro (Chile)*



*Fuente: Impactos de la minería en el medio natural  
Javier Lillo, 2010*

- Variaciones del pH por el drenaje ácido de mina
  - i) En condiciones de aridez, se forman sulfatos de hierro (jarosita).
  - ii) Como resultado se obtienen aguas de pH muy bajo (2 – 3), cargadas en aniones (sobre todo sulfatos), en las que generalmente son más solubles los metales pesados como Pb, Zn, Cu, As, C, etc. (a excepción de Hg).
  - iii) Depende de la superficie específica (tamaño) de las partículas y la porosidad.
  - iv) La cinética también está controlada por el clima y la actividad bacteriana.

(Javier Lillo, 2010)

## 2.2 Contaminación minera en Bolivia

La industria minera boliviana ha seguido ciclos de producción sujetos a factores externos e internos como la caída y subida del precio de metales en mercados internacionales y la falta de tecnologías para explotación y recuperación metalúrgica, entre otros, provocando que muchas minas paralicen sus actividades, se reactiven en el tiempo o se las abandone.

El cierre de las minas e ingenios metalúrgicos de propiedad de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL) ocurrido hace 20 años ha sido especialmente importante. Este suceso ha collevado a dos hechos fundamentales: (a) la desatención técnica y jurídica de los pasivos ambientales generados por la minería, que antes de 1986 estaba manejada por la COMIBOL y (b) la aparición de pequeñas cooperativas mineras (desde 1986) como iniciativas de subsistencia caracterizadas

por manejos tecnológicos precarios e inefficientes, especialmente dedicados a la explotación y beneficio de complejos polimetálicos de cinc, plomo y plata y que descuidan el tema ambiental.

Muchos de estos sitios permanecen como focos de contaminación, provocando la disminución de la capacidad agrícola del suelo, afectando a la producción ganadera y generando problemas de salud a poblaciones de áreas directamente impactadas.

### **2.2.1 Los pasivos ambientales mineros**

Según resultados de un estudio ejecutado por el Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas (SERGEOTECMIN) sobre el estado, ubicación e inventario de pasivos mineros y labores mineras abandonadas, a noviembre de 2005, en Bolivia existían 619 minas inventariadas y cerca de 150 millones de toneladas de residuos mineros, de los cuales aproximadamente el 30 % presenta una prioridad moderada o alta para su remediación, según su potencialidad de generar aguas mineras ácidas [1]. Estas minas están ubicadas (en orden de importancia) en departamentos de Potosí, Oruro, La Paz y Cochabamba.

Según el mismo estudio, la mayoría de los residuos minero-metalúrgicos identificados, corresponde a desmontes depositados, de manera generalmente desorganizada, en inmediaciones de las bocaminas. Las colas de procesos de concentración de minerales se presentan en menor cantidad; gran parte de ellas están depositadas en áreas sin tratamiento previo y son escasas las que están depositadas en diques de colas.

Cuando los minerales sulfurados, pirita ( $FeS_2$ ), arsena pirita ( $FeAs$ ), calcocita ( $Cu_2S$ ), galena ( $PbS$ ), esfalerita ( $ZnS$ ) y otros, se exponen al medio ambiente (agua, oxígeno y microorganismos), se generan lixiviados (llamados aguas mineras) similares al drenaje ácido de minas, los cuales se caracterizan por sus elevadas concentraciones de metales pesados disueltos y sulfatos. Según Sengupta [2], las fuentes de aguas mineras incluyen, entre otros, a desmontes de gangas de actividades mineras, colas de molienda, pilas de minerales residuales de operaciones de lixiviación, que corresponden precisamente a los tipos de residuos mayoritarios mencionados.

*Cuadro 1: Composición de aguas mineras de algunos distritos mineros de Bolivia*

Componente	A (1999)	B (1999)	B' (2006)	C (1999)	C' (2006)	D (1999)	E (lluvias, 1999)	F (2006)
Al, mg/l	352-503							248.5
As, mg/l	24-34		9.785		5.4145			235.2
Cd, mg/l	3.3-5.7	16.4 - 24	12.085	4.6	5.959		1.50	0.1876
Cu, mg/l	24-32	182 - 198	18.835	112	3.712	5.20-6.20	96	149.35
Fe, mg/l	817-1010		388.75		472.45			206.35
Pb, mg/l	0.03-0.05				0.00677			0.465
Mn, mg/l	16-93		52.5		242.3			8.206
Ni, mg/l	0.8-4.3		0.8685		2.603			8.652
Zn, mg/l	250-485	1050 - 1100	1034.95	710	811.7	60 - 75	529	13.575
Sulfato, mg/l	-	31 000		19 600		1290 (lluvias)	9 690	
pH, -	2.1-2.4	2.22 - 2.28	2.56	1.86		2.99-3.14	2.38	2.31
Cuenca que contamina	Río Chayanta - Río Caine	Río de la Ribera - Río Pilcomayo	Río Tasna - Río Quechisla - Río Pilcomayo					

*Fuente: Contaminación Minera en Bolivia: Alternativas de remediación de aguas acidas.*

*Ramiro Escalera. 2007*

A: Mina Siglo XX, Norte de Potosí.

B: Drenaje ácido de minas, Cerro Rico de Potosí, Real Socavón.

B': Drenaje ácido de minas, Cerro Rico de Potosí, Real Socavón.

C: Desmontes de minerales de baja ley. Nordeste del Cerro Rico de Potosí.

C': Desmontes de minerales de baja ley. Nordeste del Cerro Rico de Potosí.

D: Depósitos de colas de separación gravimétrica de estaño, San Miguel, Oeste del Cerro Rico de Potosí.

E: Depósitos de colas de flotación de plomo y zinc, San Miguel, Oeste del Cerro Rico de Potosí.

F: Agua no filtrada de mina Tasna, Potosí central.

El potencial de generación de aguas ácidas ha sido comprobado por diversos estudios realizados desde 1998 en las minas que tuvieron mayor importancia durante la minería del estaño (antes de 1985) y que produjeron grandes volúmenes de residuos de desmontes y colas de procesos de concentración.

## 2.2.2 Procesos alternativos de tratamiento de aguas mineras acidas

Los estudios anteriores demuestran que el problema principal y más extendido en Bolivia respecto de la contaminación de aguas naturales por metales pesados, es el aportado por los pasivos ambientales mineros con la generación de aguas ácidas con elevadísimas concentraciones de metales pesados disueltos. Esta situación prevalecerá por largo tiempo, a menos que parte de esos pasivos ambientales sean aprovechados a través de procesos metalúrgicos cuya viabilidad técnica y económica haya sido demostrada. Consecuentemente, es necesario que se implementen medidas de remediación y mitigación de los impactos de esas aguas mineras.

El control de la contaminación por aguas mineras ácidas, puede realizarse en tres etapas:

- Control del proceso de generación ácida (prevención e inhibición en la fuente)
- Control de la migración de aguas ácidas
- Recolección y tratamiento de aguas ácidas mineras

La opción más conveniente es el control de la generación de aguas ácidas in situ. Según Brown et al y Sengupta la oxidación de los sulfuros puede prevenirse o reducirse mediante los siguientes procesos:

- Evitar el contacto significativo con aguas superficiales, precipitación pluvial y aguas subterráneas, mediante barreras impermeables (cubiertas, sellos) tales como, membranas sintéticas, concreto, suelos impermeables, etc. Esta acción limita la formación de ácidos y también limita el transporte de los productos de oxidación a los medios acuáticos.
- Evitar el contacto de oxígeno a través de cubiertas que provean una baja difusión de oxígeno. Por ejemplo, suelos, arcillas compactadas, materiales sintéticos (PVC, polietileno de alta densidad y otros). En general, la exclusión de oxígeno es más práctica que la exclusión de agua.
- Control del pH: el agua puede mantenerse alcalina mediante la mezcla de los minerales sulfurados con materiales alcalinos e.g. piedra caliza.
- Control de la actividad bacteriana mediante bactericidas (tenso-activos aniónicos, ácidos orgánicos y otros).

Cuando la generación de ácidos no se previene o se reduce, la migración de las aguas ácidas debe prevenirse o reducirse. Una de las maneras para lograr esto se basa en la prevención del ingreso de agua en la roca sulfurada. El ingreso de agua puede controlarse mediante el desvío de las aguas superficiales al área de las rocas, la prevención de la infiltración y la localización controlada del residuo generador de ácidos.

Una alternativa novedosa es el uso de barreras reactivas permeables (BRPs). Las BRPs son zonas permeables que interceptan y remedian una vertiente de agua subterránea. En lugar de impermeabilizar el flujo, tiene un efecto mitigante sobre el flujo migrante. Varias fuentes de carbono orgánico (compost, lodos biológicos, aserrín o astillas de madera, bosta de ovejas, celulosa) se utilizan comúnmente para inducir la reducción bacteriana de sulfatos, seguida de las precipitaciones de sulfuros de metales pesados. Este proceso se usó para disminuir la concentración de Fe, Cd, Cu, Ni, Pb y Zn en aguas subterráneas.

La tercera opción es tratar el agua para neutralizar la acidez y remover los metales y sólidos suspendidos. Existen dos alternativas: el tratamiento activo, que requiere una operación y mantenimiento continuos, y el tratamiento pasivo, el cual debe auto sustentarse.

Considerando las características de las aguas mineras ácidas bolivianas, las cuales tienen altas concentraciones de hierro, sulfatos, arsénico, cobre y otros metales pesados, este proceso podría ser utilizado en la detoxificación con algunas ventajas sobre los otros procesos ya descritos. Estas ventajas son las siguientes:

- La precipitación por neutralización, sin previa oxidación del As (III) a As (V) no es tan eficiente para remoción de este elemento, debido a que el As (V) co - precipita más fácilmente que el As (III). Es decir, se obtienen mayores eficacias de tratamiento con la foto-oxidación.
- Los procesos de intercambio iónico y microfiltración son muy caros si se los compara con el resto de los procesos, especialmente con los de la foto-oxidación y neutralización – precipitación.
- El tratamiento biológico puede ocasionar el desprendimiento de sulfuro de hidrógeno (malos olores) como producto de la reducción de los sulfatos. Además, se requieren tiempos de proceso más largos que en la foto – oxidación por radiación solar.

(Ramiro Escalera, 2017)

### 2.3 Contaminación minera a nivel departamental – Oruro

El color plomo de las aguas del río es lo primero que llama la atención al llegar a Huanuni. Aunque impresiona más ver cómo, sin pausa, sale de la mina estatal del mismo nombre una especie de barro negro directamente al río, formando una montaña que una pala mecánica desmonta y carga sobre un camión, una y otra vez.

Ese material, combinado con el agua, es el que contamina el río Huanuni, cuyas aguas abastecían la actividad agropecuaria de más de 50 comunidades que pertenecen a cinco municipios de ese departamento. Esto los llevó a organizarse en 2006 en una coordinadora para exigirles a las autoridades una solución a un problema que afecta a sus cultivos y a su ganado.

Tras varias movilizaciones, en 2009, lograron que el gobierno declarara Emergencia Ambiental en esa cuenca y obligara a la empresa minera más grande de estaño de Oruro a construir un dique de colas (lugar de depósito de residuos del procesamiento de minerales) para detener la contaminación. Tenían hasta el 2011 para hacerlo. Han pasado ocho años y aún no han cumplido.

Mientras tanto, la migración en las comunidades afectadas no cesa porque sobrevivir en ellas es cada vez más difícil. Los pobladores denuncian que las tierras de cultivo más importantes se perdieron, que su ganado ha disminuido y que la pesca también ha sufrido las consecuencias. Las comunidades siguen esperando acciones de las autoridades para revertir la situación.

*Figura 7:La entrada a la empresa minera Huanuni.*



*Fuente: Ríos cargados de metales pesados recorren las comunidades de Oruro en Bolivia  
Miriam Telma Jemio, 2017*

### **2.3.1 Conviviendo con la contaminación**

En el departamento de Oruro hay una disputa por el uso del agua para actividades como la minería, la pesca, agricultura, ganadería aparte del consumo humano. Pero según Pablo Flores, mallku (autoridad indígena) de Poopó, los mineros se llevan la mayor parte, “peor con la nueva Ley Minera (de 2014) que les ha dado más ventajas”.

La minería se instaló y se mantiene en las cuencas de Oruro como la principal actividad, a pesar de la contaminación que producen y que data, según algunos autores, del período de la colonia. Varios estudios señalan que la cuenca más afectada es la del Poopó —conformada por las subcuencas Desaguadero, Sora Sora, Huanuni, Poopó, Antequera, Peñas, Pequereque, Tacagua y Azanaques— donde se ha degradado la calidad de las aguas superficiales porque están saturadas con residuos mineros que no han logrado ser asimilados por la naturaleza. En 2008, un estudio de la Universidad Técnica de Oruro identificó al menos 300 operaciones mineras entre grandes, medianas, pequeñas además de cooperativas en esa región.

Las aguas utilizadas en el ingenio (parte de la mina Huanuni donde se separa la tierra del estaño) salen de ese color y son echadas al río sin tratamiento. (Figura 8)

*Figura 8: Aguas utilizadas en el ingenio*



*Fuente: Ríos cargados de metales pesados recorren las comunidades de Oruro en Bolivia  
Miriam Telma Jemio, 2017*

A inicio de la década del 2000, varias comunidades y organizaciones sociales se pronunciaron contra la contaminación minera y urbana. Para aunar esfuerzos, en 2006, conformaron la Coordinadora en defensa de la cuenca del río Desaguadero y los lagos Uru Uru y Poopó (Coridup), que se consolidó en 2007 en un congreso que agrupó a más de 80 comunidades campesinas de las provincias de Cercado, Dalence y Poopó del departamento de Oruro, territorios donde se desarrolla una actividad minera metalúrgica.

Si bien muchas de estas comunidades son agromineras, en las últimas décadas, la afectación de la contaminación a la producción agropecuaria es insostenible, según un reporte de 2013 de la Liga de Defensa del Medio Ambiente. “Los años anteriores al 2010, fueron de repunte de la intensificación de las operaciones mineras y, por tanto, de la contaminación a gran escala en la cuenca Uru Uru-Poopó, situación empeorada por la baja aplicabilidad de las normas ambientales y la reticencia del sector minero en general de implementar medidas de prevención y control”

Por eso la meta principal de la Coridup es defenderse y frenar la contaminación ambiental que afecta a las comunidades, que impacta sus condiciones de vida y sus posibilidades futuras de desarrollo socioeconómico, básicamente, por la progresiva degradación del entorno natural que habitan.

*Figura 9: La contaminación de la Mina Huanuni por los ríos de la ciudad*



*Fuente: Ríos cargados de metales pesados recorren las comunidades de Oruro en Bolivia  
Miriam Telma Jemio, 2017*

El río Huanuni lleva años arrastrando los desechos mineros de la operación del ingenio Santa Elena (donde se separa la tierra del mineral utilizando agua), así como el agua ácida también llamada copajira. “Actualmente, las colas arenas, las colas lamas y colas sulfuro van directamente al lecho del río. Eso se suspenderá porque se bombeará directamente hasta el dique en Villa Kollo. Se evacuan aguas de ácido de mina al río.

El líquido es negro y cae constantemente desde lo alto del cerro. Circula por tubos plásticos dentro la mina para luego despeñar en tres piscinas sin que cambie de color al ingresar al afluente.

A unos 25 kilómetros está la población de Machacamarca, donde la mina Huanuni tiene un ingenio que procesa 200 toneladas de estaño por día. No cuenta con dique de colas ni planta de tratamiento de aguas, todo va al río.

*Figura 10: Los pozos usados por los relaveros para sacar el Estaño. Tras realizar ese trabajo echan las aguas directamente al río Huanuni*



*Fuente: Ríos cargados de metales pesados recorren las comunidades de Oruro en Bolivia  
Miriam Telma Jemio, 2017*

Según un estudio de la Liga de Defensa del Medio Ambiente (Lidema), las poblaciones de Pacopampa y Sora Sora (ubicadas entre Huanuni y Machacamarca) usan las aguas de ese río para el riego de sus cultivos —alfalfa, cebada, haba, entre otros— y para su ganado (vacuno, ovino y camélido).

En 2012, las ONG Caminar y CEEDI publicaron la investigación Síntesis del Diagnóstico Ambiental de la cuenca del Poopó en la cual revelan que el área de mayor impacto en la cuenca Poopó es la parte Noreste, cuyos ríos están expuestos a altos niveles de contaminación por los metales pesados, el arsénico y las aguas ácidas que son vertidos en ellos. “Un total de 19 ríos son reportados con contaminantes mineros por encima de los límites permisibles, en especial el conjunto cadmio-plomo-arsénico. También reportaron más de 17 millones de toneladas de desechos mineros (colas, desmontes, relaves), en las zonas de Oruro-urbano, subcuenca San Fe, subcuenca Huanuni-Sora Sora, subcuenca Caravi-Desaguadero y subcuenca Antequera”.

En otra comunidad del municipio El Choro, han dejado de producir hortalizas y forrajes. Es un municipio ganadero y cada vez les cuesta más alimentar a sus animales. Se tenía totorales en el río desaguadero, más arriba hortalizas. El río se ha ensanchado y contaminado, y ya no sirve para cultivar.

La exigencia también es que draguen los ríos y principalmente el lago Poopó. El lago ahora solo tiene tres metros de profundidad, antes tenía 10. El pueblo Uru está pidiendo que se limpie el lago.

Un estudio, realizado en 2008 por la UTO, estableció que existen al menos 300 operaciones mineras entre Huanuni y el lago Poopó. Mongabay Latam buscó información en la Gobernación de Oruro y la Autoridad Jurisdiccional Administrativa Minera (AJAM) sobre cuántas operaciones tienen autorización en la región. A la fecha, no recibió respuesta de ninguna de las reparticiones estatales.

En 2010, la entonces Prefectura realizó un recorrido por los municipios de Pazña, Poopó, Huanuni, Santa Fe, Uru Uru y Desaguadero donde encontraron operando a 25 empresas y cooperativas mineras, de las cuales 16 no contaban con licencia ambiental.

Miriam Telma Jemio, (2017).

### 2.3.2 Mina San José

Las aguas ácidas de mina, denominadas en Bolivia como "aguas de copagira" y formadas como un proceso natural de oxidación de minerales sulfurados en presencia de agua y oxígeno, y catalizado por microorganismos del género *Thiobacillus Ferrooxidans*, se constituyen hoy en día en una de las principales fuentes de contaminación al medio ambiente en varias regiones mineras por la carga en metales pesados disueltos y la fuerte acidez que presentan.

Es el caso de la mina San José, ubicada en la ciudad de Oruro, en la provincia Cercado del Departamento del mismo nombre. La mina se encuentra cercana a la población urbana de la ciudad de Oruro a una elevación de 4.032 msnm. En sus extensas galerías y socavones, existen cuerpos de mineralización sulfurosos que se oxidan por la acción de las aguas subterráneas y de la lluvia que ingresa y el oxígeno del aire, generando así el Drenaje Ácido de Mina.

El drenaje ácido generado en el interior de la mina, presenta valores de pH fuertemente ácidos que oscilan entre 1.2 a 2.5. Con el fin de mantener accesibles los niveles más profundos para la explotación por parte de más de 1000 trabajadores corporativizados, dicho drenaje es bombeada a 8 l/s.; y sin ningún tratamiento, es vertido al medio ambiente; en principio, atravesando parte de la ciudad de Oruro, y finalmente desembocando gradualmente en el lago Uru-Uru; generando así, un fuerte impacto ambiental por la elevada carga de metales pesados tóxicos disueltos y su elevada acidez.

Los mapas actualmente disponibles del Lago Uru Uru permiten determinar inmensas llanuras de inundación; la cobertura vegetal es muy escasa y la evaporación intensa que vuelve a los suelos poco fértiles. Además, se percibe que el lecho del Desaguadero no es muy estable; es decir, en la

estación de lluvias, los desbordes inundan inmensas llanuras, la evaporación deja los suelos salados y grandes espejos de agua se pierden debido a este fenómeno.

La contaminación ambiental resultante de las actividades mineras, industriales, transporte y otras; ubicadas en el área urbana y rural, incide de manera directa sobre la salud de la población y la pérdida de la biodiversidad circundante.

La principal fuente de contaminación por metales pesados tóxicos (Cd, As, Sb, Pb, Ni, Co, Cu, Fe y Zn) y acidez, se constituye la descarga de las aguas ácidas de la mina San José.

Por tanto, la aplicación del tratamiento de aguas ácidas de mina mediante el proceso de neutralización - precipitación con cal y en interior mina, tendrá un impacto altamente positivo desde el punto de vista ambiental; puesto que, permitirá la mejora de la biodiversidad acuática y terrestre del Lago Uru Uru y la calidad de vida de sus habitantes a partir de una intervención sostenida de éste valioso recurso natural; es decir, mejor uso del agua para alimentar sistemas de riego, para mantener un nivel ecológico suficiente, para el desarrollo de los peces y para el desarrollo ecoturístico centrado sobre la biodiversidad lacustre.

Desde el punto de vista socio-económico, se subraya la importancia del recurso agua para el desarrollo sostenible de una región deprimida que basa su economía en los recursos naturales del Lago.

Gerardo Zamora Echenique, 2016

## CAPÍTULO III

### 3 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MINERAS A TRAVÉS DE PROCESO DE COAGULACIÓN Y PROCESO DE FLOCULACIÓN

#### 3.1 Coagulación y Floculación

Las definiciones operacionales no dependen de ninguna teoría y solo definen los términos de acuerdo a las observaciones del proceso. La coagulación se refiere a las reacciones que ocurren cuando se agrega un coagulante al agua, dando origen a la formación de productos insolubles producidos por la reacción entre el coagulante, la solución acuosa, y la impureza a ser removida. La floculación se refiere, en la definición operacional, al proceso de crecimiento de las partículas coaguladas dando origen a un floc suficientemente grande y pesado como para sedimentar.

La coagulación y la floculación pueden también ser definidas de acuerdo a la teoría. En este caso la coagulación se refiere a la desestabilización de los coloides suspendidos mediante remoción de las fuerzas que los mantengan separados. La floculación se refiere al transporte de las partículas en el líquido para establecer contacto y estabilizarse, generalmente por la acción de puentes en una red tridimensional, porosa y suelta. (Dr Cliff J. Kirchmer, 1977)

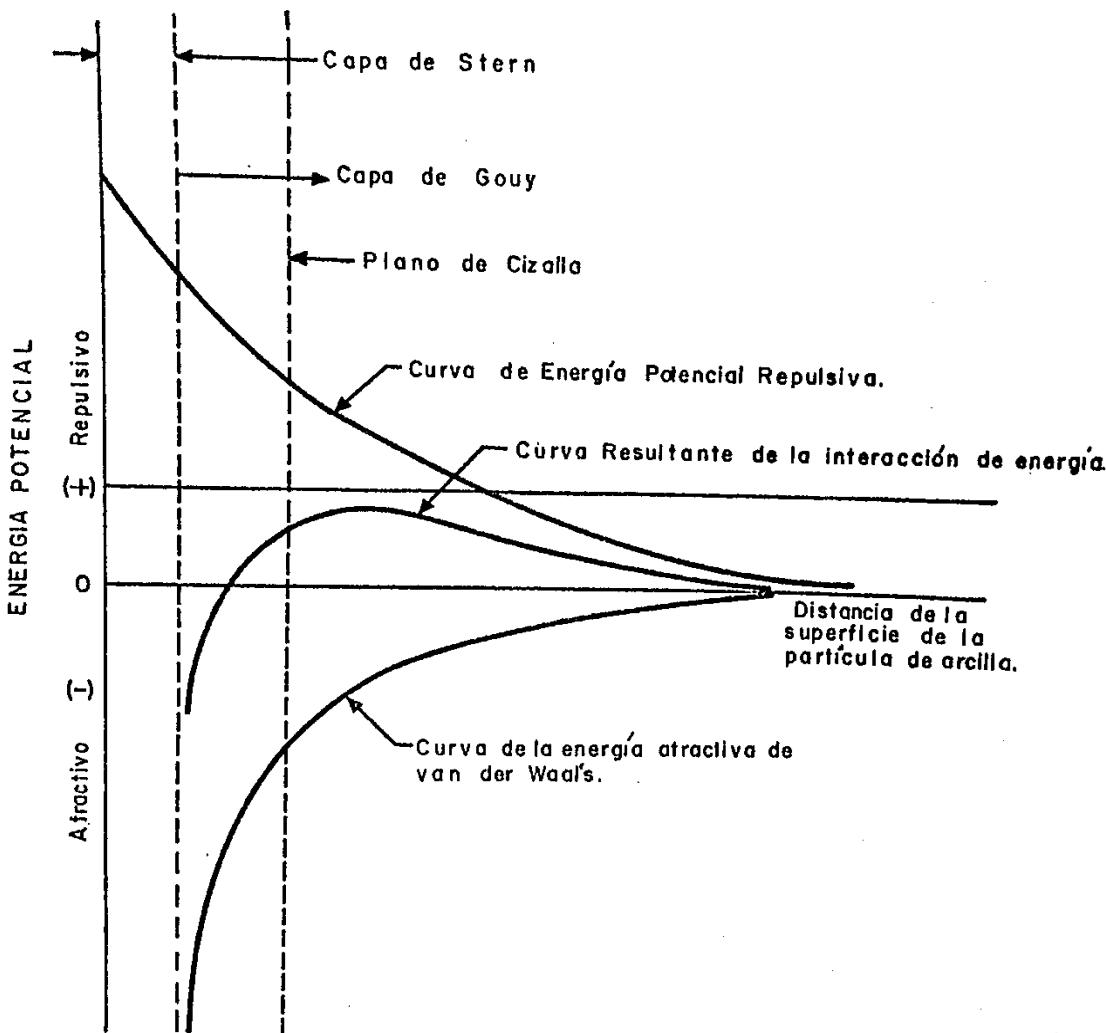
#### 3.2 Mecanismos de desestabilización de sistemas coloidales (Coagulación)

Se han desarrollado dos teorías de desestabilización (coagulación de interés teórico y práctico: (a) Modelo físico (doble capa eléctrica) y (b) modelo químico (puentes químicos)

Debe resultar obvio como se interpreta la desestabilización de un coloide por un coagulante. La figura 1 muestra las dos energías (atracción de van der Waals y repulsión de carga eléctrica). La curva de atracción de van der Waals es fija mientras que la repulsión eléctrica puede ser disminuida por medio de un aumento en la solución de iones de carga opuesta. Cuando se disminuye el potencial repulsivo, disminuye también la curva resultante de interacción de energía. Por lo tanto, las partículas pueden acercarse lo suficiente para ser desestabilizadas por medio de una energía atractiva de van der Waals.

Se ha desarrollado recientemente el modelo químico para explicar la capacidad que tienen los polielectrolitos para desestabilizar los coloides. (Dr Cliff J. Kirchmer, 1977)

Figura 11: Energía potencial de interacción de las partículas coloidales:



Fuente: Aspectos químicos y físicos de la coagulación del agua.  
Dr. Cliff J. Kirchmer

El modelo postula una interacción directa entre el coagulante y el coloide. Las interacciones incluyen enlaces covalentes, intercambio iónico, puente de hidrógeno, enlaces coordinados, fuerzas de van der Waals entre coagulante y coloide, y una repulsión del coagulante por la fase acuosa.

En sistemas reales como el de la coagulación de aguas turbias es común que la desestabilización sea una combinación de interacciones físicas y químicas.

Se pueden entonces distinguir, como mínimo, cuatro diferentes mecanismos para la coagulación basados en las dos teorías de estabilización (modelo físico y modelo químico). Ellos son: compresión de la capa difusa, adsorción para producir neutralización de la carga, captura en el precipitado, y adsorción para permitir el puente interparticular.

### 3.2.1 Compresión de la doble capa

Algunos iones actúan recíprocamente con partículas coloidales de manera puramente electrostática: se comportan de acuerdo a la regla de Schulze – Hardy que dice que la desestabilización de un coloide por un electrolito indiferente es realizada por iones con carga opuesta a la del coloide (contraiones); y que la eficacia de estos iones aumenta marcadamente con la carga. Por ejemplo, las concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Al}^{+++}$  que se requieren para desestabilizar un coloide con carga negativa, varían aproximadamente en la proporción de 900:30:1. En la figura 2 se presentan curvas de turbiedad residual como función de las dosis de coagulante para un agua natural trazada con  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Al}^{+++}$ . Las curvas están basadas en la regla de Schulze – Hardy y el modelo teórico de Verwey – Overbeek para electrolitos indiferentes (Verwey y Overbeek 1948).

El mecanismo que implica la desestabilización por electrolitos indiferentes es una reducción del potencial zeta para que las fuerzas atractivas de van der Waals se vuelvan efectivas y causen la desestabilización.

### 3.2.2 Adsorción y neutralización de la carga

El efecto de adsorción y neutralización de la carga se encuentra estrechamente ligado al de compresión de la doble capa.

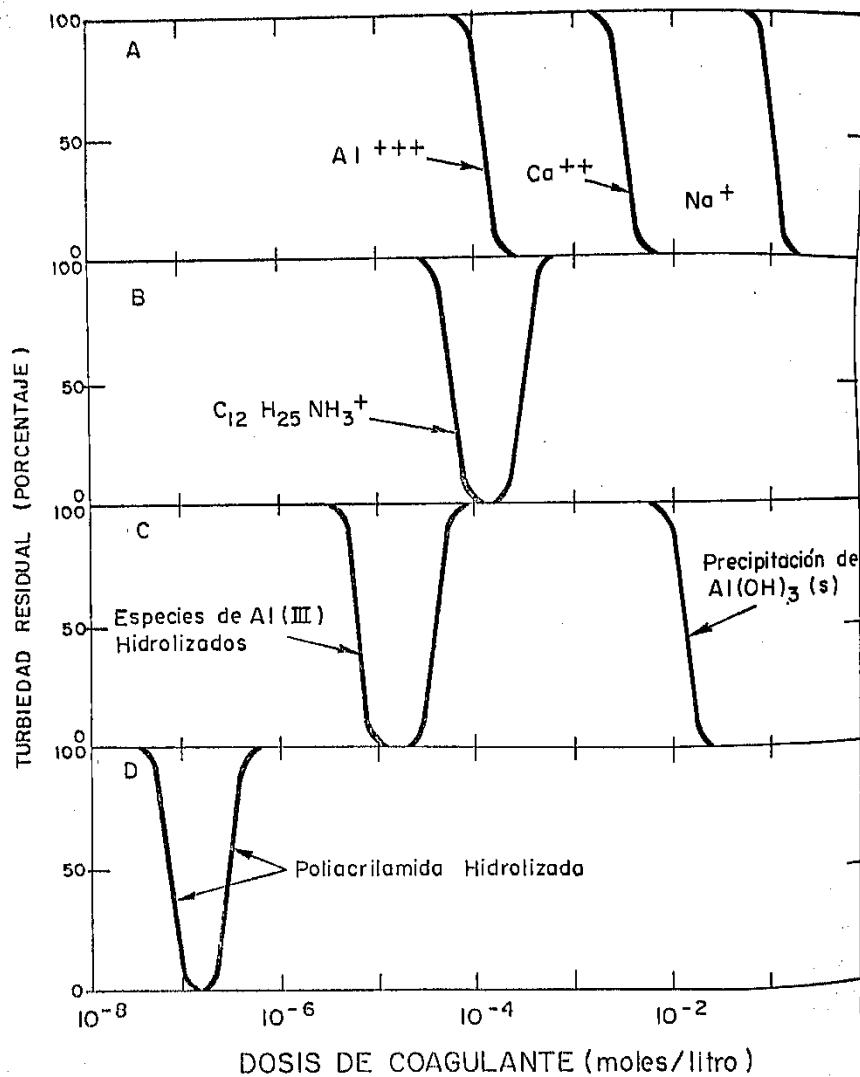
Un ejemplo de desestabilización por medio de la adsorción y neutralización de la carga es la desestabilización de la sal yoduro de plata con carga negativa por medio de iones orgánicos dodecilamonio ( $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NH}_3^+$ ). La curva que se presenta en la figura 2 se basa en un trabajo experimental reciente (Tamamushi y Tamaki 1959).

Como los iones dodecilamonio tienen una carga de +1, deberían ser capaces de inducir una coagulación similar a la del  $\text{Na}^+$  (Figura 2). Sin embargo, se pueden distinguir dos diferencias muy importantes: a) mientras los iones de sodio realizan la coagulación únicamente en concentraciones mayores de aproximadamente  $10^{-1}$  moles por litro, los iones de dodecilamonio producen desestabilización en concentraciones tan bajas como  $6 \times 10^{-5}$  moles por litro; aunque no es operante aplicar dosis excesivas de  $\text{Na}^+$  a una dispersión coloidal, la reestabilización se realiza con dosis de coagulante mayores de  $4 \times 10^{-4}$  moles por litro con dodecilamonio.

El comportamiento de los iones de dodecilamonio puede explicarse como el resultado de la naturaleza activa de su superficie (por ejemplo, se acumulan en las interfaces). Existe una falta de interacción de estos iones con el agua y por lo tanto son llevados fuera de la solución y dentro de las partículas coloidales, causando su desestabilización. Los iones de sodio tienen interacción con el agua y por lo tanto no tienen superficie activa.

En la figura 2 C se presenta una segunda ilustración de los efectos de la adsorción en la estabilidad de los coloides. Se ha trazado una curva de la turbiedad residual después de la sedimentación como función de la dosis de sal de aluminio con pH constante (pH=5). Esta curva se basa en parte en los experimentos de Matijevic y otros (Matijevic, Janauer y Kerker, 1964). Se puede ver que la coagulación con sales de aluminio puede realizarse con dosis bajas ( $6 \times 10^{-6}$  moles/litro o 4 mg/litro de alumbre). Además, al contrario de lo que sucede con electrolitos indiferentes, la reestabilización se realiza con dosis altas ( $4 \times 10^{-5}$  moles/litro o 25 mg/litro de alumbre), y es acompañada por reversión de la carga. Finalmente, la coagulación se observa nuevamente con dosis aún más altas. En la siguiente sección se explicarán los factores que influyen en estos resultados experimentales.

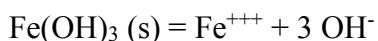
Figura 12: Curvas esquemáticas de coagulación para varios coagulantes distintos



Fuente: Aspectos químicos y físicos de la coagulación del agua.  
Dr. Cliff J. Kirchmer

### 3.2.3 Captura en un precipitado de hidróxido metálico

Cuando el producto de la solubilidad de hidróxidos metálicos como el Al(OH)<sub>3</sub> y Fe(OH)<sub>3</sub> es excesivo en las soluciones de sales metálicas como el Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> y FeCl<sub>3</sub>, se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos. Estos hidróxidos pueden atrapar las partículas coloidales a medida que estas aparecen y forman precipitados. Por ejemplo, la solubilidad del hidróxido férrico y su producto de solubilidad pueden expresarse de la siguiente manera:



$$(\text{Fe}^{+++})(\text{OH}^-)^3 = K_{ps} = 10^{-38}$$

Donde (Fe<sup>+++</sup>) y (OH<sup>-</sup>) denotan la concentración molar de iones hidróxidos y férricos en solución y K<sub>ps</sub> es el producto de la solubilidad de Fe(OH)<sub>3</sub> (s) amorfo.

La tasa de precipitación de un hidróxido metálico depende de la cantidad de sobresaturación. La cantidad de sobresaturación puede describirse con la razón (Fe<sup>+++</sup>)(OH<sup>-</sup>)<sup>3</sup>/10<sup>-38</sup>. Para una precipitación rápida, esta relación debe ser 100 o aún mayor.

Se ha encontrado que otros aniones, aparte de los hidróxidos, particularmente el sulfato, son efectivos para aumentar la tasa de precipitación. Además, puesto que las partículas coloidales pueden servir como núcleos para formar precipitados, la tasa de precipitación aumenta con concentración de partículas coloidales que va a ser removidas.

### 3.2.4 Adsorción y puente interparticular

Una nueva tendencia en la coagulación en los últimos años ha sido el uso de polielectrolitos orgánicos sintéticos. Se ha observado que muchas veces los polielectrolitos con carga negativa son efectivos para coagular coloides con carga negativa, fenómeno que no puede ser explicado de acuerdo a ningún modelo basado en la neutralización de la carga. Se ha desarrollado una teoría del “puente” que al menos explica cualitativamente este fenómeno (La Mer y Healy, 1963; Smellie y La Mer, 1958).

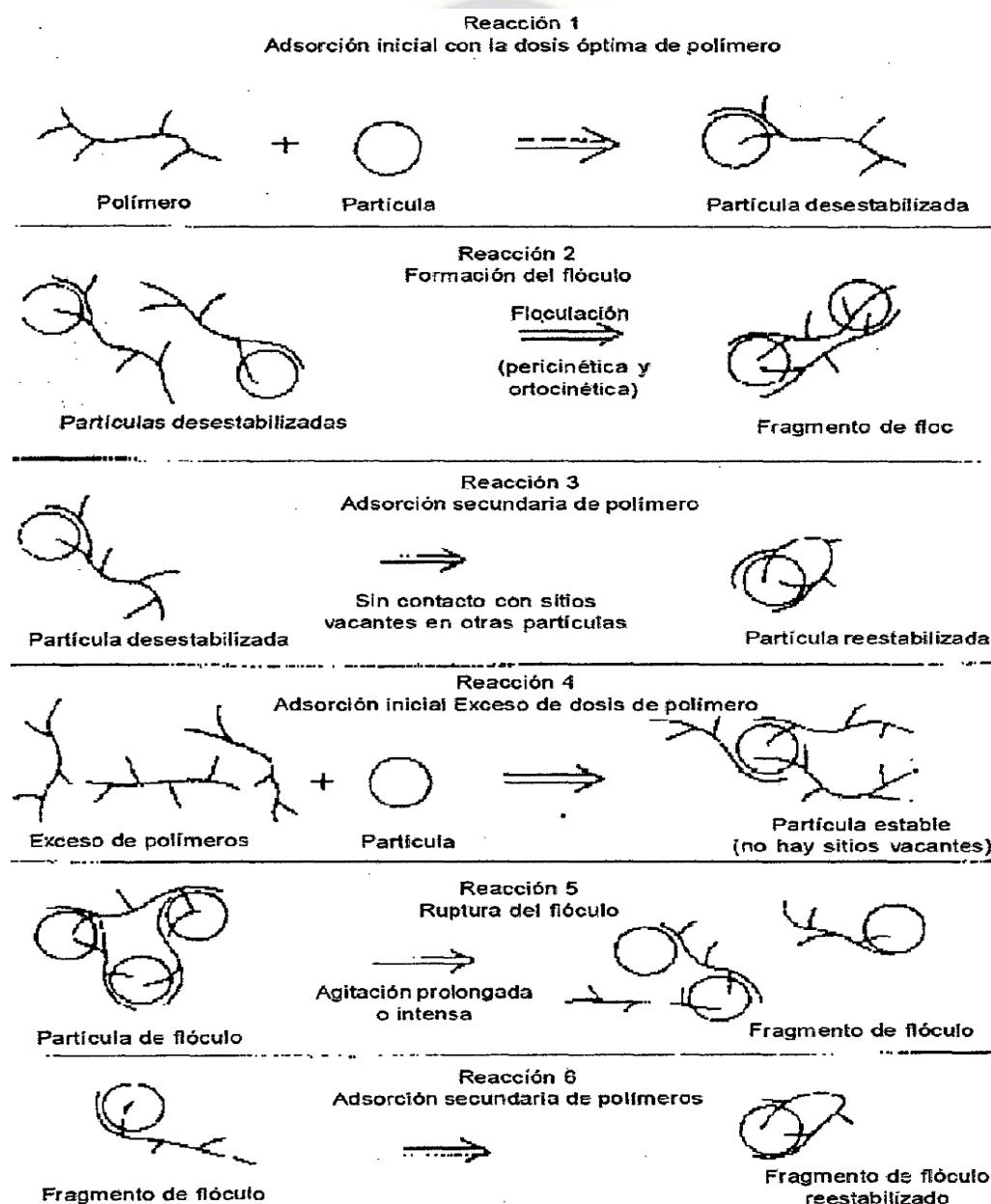
La figura 3 describe gráficamente la teoría de La Mer: la reacción 1, muestra que un polímero tiene ciertos grupos que realizan una interacción con la superficie de las partículas coloidales, dejando que el resto de la molécula se extienda en la solución. Si una segunda partícula con algunos lugares de adsorción vacíos entra en contacto con los segmentos extendidos, puede realizarse una unión. (Figura 3 – reacción 2)

El polímero sirve de puente en el complejo partícula – polímero – partícula. Si no se dispone de una segunda partícula, los segmentos dispersos del polímero pueden eventualmente adsorberse en

otros lados de la partícula original, haciendo de esta manera imposible que el polímero sirva de puente. (Figura 3 – reacción 3)

En la figura 2 D se presenta una curva de la turbiedad residual como función de una dosis de polímero. Estas curvas se basan en un trabajo experimental que describe la agregación de una dispersión de caolinita de carga negativa con un polímero aniónico, poliacrilamida hidrolizado al 30 % (Black y otros, 1965)

*Figura 13: Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides por polímeros*



Fuente: *Aspectos químicos y físicos de la coagulación del agua.*  
Dr. Cliff J. Kirchmer

Se puede notar que la poliacrilamida induce la coagulación con concentraciones más bajas que  $\text{Al}^{+++}$  (Figura 2 D) y también que ocurre la reestabilización por sobredosificación.

Debido a que tanto el coloide como el polímero tienen la misma carga, no se puede atribuir la reestabilización a la reversión de cargas como en el caso de iones de dodecilmonio (Figura 2 B). El modelo de puente puede explicar cualitativamente la reestabilización como resultado de la saturación de las superficies coloidales por el polímero sin dejar lugar para la formación de puentes interparticulares. (Figura 3 – Reacción 4). En algunos casos los sistemas coloidales desestabilizados y agregados pueden ser reestabilizados por medio de intensa agitación, debido a que se rompen las uniones polímero – superficie, y al consiguiente repliegue de los segmentos dispersos en la superficie de las partículas (Figura 3 – Reacciones 5 y 6)



## CAPÍTULO IV

### 4 PRUEBA DE JARRAS

#### 4.1 Prueba de Jarras Modificada

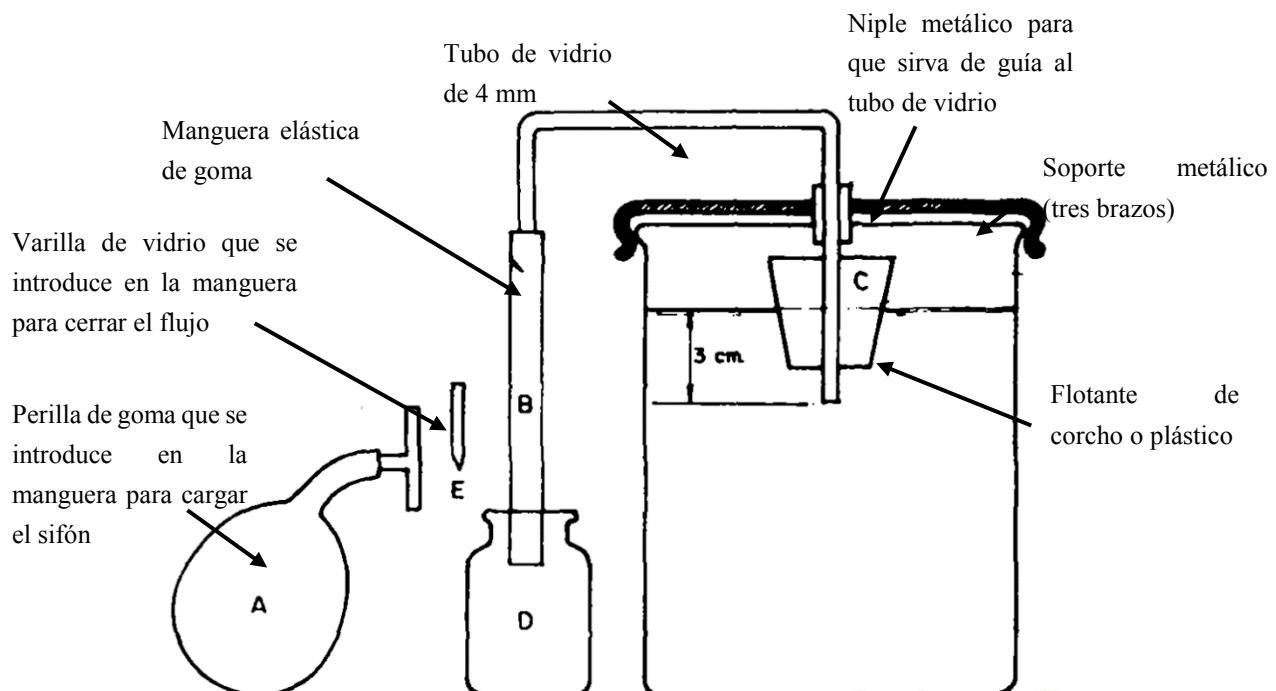
El grado de floculación se ha expresado como  $N_t/N_o$  en donde  $N_o$  es la concentración de partículas iniciales y  $N_t$ , la concentración de partículas después del tiempo  $t$ . para una suspensión de partículas finamente divididas, la concentración puede ser medida por la dispersión que sufre la luz al pasar por ella, esto es por la turbiedad considerando que, a mayor turbiedad, mayor concentración. Se sigue de aquí que, si medimos la turbiedad residual a través del tiempo, durante un ensayo de coagulación podemos obtener  $N_t/N_o$  para diferentes valores de  $t$ :

$$\frac{N_t}{N_o} = \frac{\text{Turbiedad del agua en el momento } t}{\text{Turbiedad del agua cruda}}$$

Este ensayo puede realizarse en la forma siguiente, usando un agitador convencional para prueba de jarras.

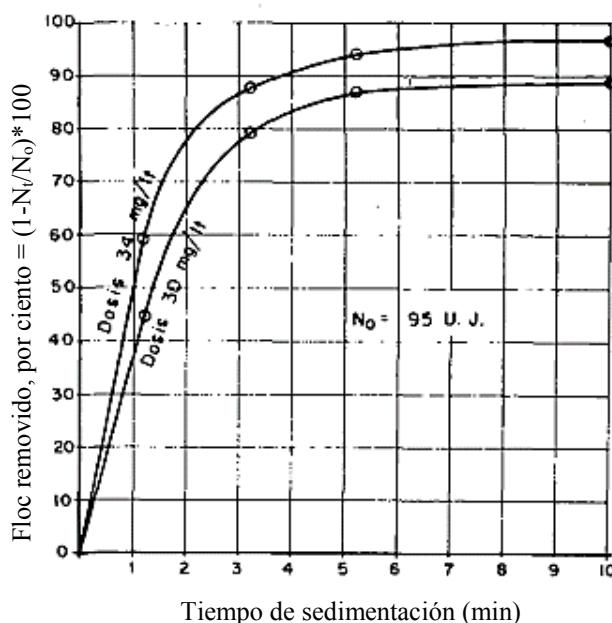
- a) Se determina la turbiedad del agua cruda  $N_o$
- b) Se le aplican los coagulantes a la jarra, mientras tanto se hace girar al agitador a 100 rpm.
- c) Despues de 30 seg. de mezcla rápida, se cambia la velocidad de las paletas a 40 rpm (a la que se juzgue conveniente) durante 30 min.
- d) Se suspende la agitación, se levantan las paletas, y se empiezan a tomar muestras del sobrenadante a intervalos regulares de tiempo, por ejemplo, en  $t= 1$  min,  $t= 3$  min,  $t= 5$  min,  $t= 10$  min,  $t= 60$  min. Para extraer las muestras se puede usar una pipeta volumétrica introduciéndola 4 -5 cms dentro del agua o un sifón como el indicado en la figura 4
- e) Con los resultados se dibuja la curva: floc removido versus tiempo de sedimentación. Un ejemplo de este tipo de curvas se incluye en la figura 5. Al agua cruda analizada se le determino la turbiedad inicial que fue de  $N_o=95$  Unidades Jackson, y se la colocó en dos jarras de 2000 ml. A la primera se le dosificaron 34 mg/l y a la segunda 30 mg/l. Se hallaron las turbiedades residuales a los 1,3,4,10 y 60 minutos. Los cálculos se incluyen en el cuadro 2. (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS), 1973)

Figura 14: Sistema para tomar turbiedades residuales



Fuente: Teoría, Diseño y control de los procesos de clarificación del agua  
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS), 1973

Figura 15: Tasa de remoción de floc



Fuente: Teoría, Diseño y control de los procesos de clarificación del agua  
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS), 1973

Cuadro 2: Calculo del floc removido

Tiempo min	Turbiedad Nt		Floc remanente Nt/No x 100		Floc removido (1-Nt/No) 100	
	Jarra con 34 mg/lt	Jarra con 30 mg/lt	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 1	Jarra 2
1	39.0	52.2	41	55	59	45
3	10.4	20.0	12	21	88	79
5	5.7	12.3	6	13	94	87
10	3.0	10.4	3.2	11	96.8	89
60	2.95	10.0	3.0	10.5	97.0	89.5

Fuente: Teoría, Diseño y control de los procesos de clarificación del agua  
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS), 1973

De la figura 5 se puede deducir que la dosis de coagulantes de 34 mg/lt fue mucho más efectiva que la de 30 mg/lt, puesto que la velocidad de remoción del floc fue mayor y, por tanto, también la velocidad de asentamiento. En otras palabras, removió más floc en menos tiempo y dejó un sobrenadante más claro (de 2,95 U.J. contra 10 U.J.), no obstante que al observar el floc en ambas jarras su apariencia era muy similar.

Como se ve, este ensayo puede ser útil:

- Para comparar el trabajo de varias dosis de coagulantes
- Para comparar el trabajo de coagulantes distintos
- Para comparar el trabajo de los coagulantes en las jarras y en la planta de tratamiento.

En este último caso, se puede comparar los resultados obtenidos con una muestra de agua cruda y una muestra del agua proveniente del final de la cámara de flocculación.

Al tomar esta debe evitarse romper el floc. A ambas se les determina la turbiedad residual y se dibujan curvas similares a las de la figura 5.

Cohen describe un ingenioso mecanismo para obtener muestras de seis jarras simultáneamente. Consiste en conectar todos los frascos a un sistema de vacío, que opera automática o manualmente cada cierto tiempo y extrae muestras de determinado volumen.

El operar con seis jarras a la vez tiene la ventaja de poder hacer un mayor número de determinaciones en menor tiempo, lo que a veces es muy importante. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que si se toman cinco muestras en seis jarras se obtienen 30 muestras por analizar.

Para este tipo de ensayo sea válido es conveniente observar las siguientes precauciones:

- a) Se debe extraer el agua con la misma velocidad para todos los ensayos, por cuanto la fuerza con que se succiona el flujo con el sifón o la pipeta, influyen el número de partículas arrastradas. A mayor velocidad de entrada, mayor cantidad de floc es atrapado. El equipo de la figura 4 se ha hecho teniendo en cuenta esto principalmente.
- b) La muestra debe tomarse a una profundidad constante 4 – 5 cms.
- c) Debe buscarse que el nivel de agua en las jarras baje el mínimo indispensable durante el ensayo, para evitar una modificación sustancial del volumen analizado. Esto limita a un máximo de 400 ml de muestras que se pueden obtener de una jarra de 2000 mls, lo que produciría una reducción del 20% del volumen.
- d) La temperatura debe ser la misma en todas las jarras durante todo el tiempo del experimento, e igual a la del agua en la planta. (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS), 1973)

#### 4.2 Prueba de Jarras Estándar

La prueba de jarras se ejecuta básicamente colocando cinco o seis vasos de precipitado o frascos de boca ancha de 1 a 3 lts de agua de la muestra, agregándole diversas dosis de coagulantes a cada uno mientras se agita fuertemente la muestra y luego suspendiendo la agitación violenta y dejando por 10 – 30 min una agitación lenta, durante la cual se observa el aspecto y tamaño del floc formado en cada vaso.

Este ensayo intenta simular las condiciones en las cuales coagula el agua en la planta de tratamiento.

En una encuesta hecha por Ockershausen en los Estados Unidos, en 1965, se encontró que la prueba de jarras se usaba en 42 de las 45 plantas de tratamiento que contestaron el cuestionario, pero solo en el 50% de los casos los resultados de las pruebas de jarras coincidían con los obtenidos en la planta.

Las razones para esto son de orden físico y químico. Los autores mencionan las siguientes entre otras:

- a) En los floculadores existe un flujo continuo, en cambio, en las jarras no hay flujo. Esto hace que en los primeros la masa de agua sufra un tratamiento desigual, debido a los corto circuitos que retienen parte de ella durante largo tiempo mientras que otra parte la dejan pasar casi de inmediato. En la prueba de jarras el agua queda retenida durante todo el tiempo del ensayo

- b) La escala de las jarras no guarda relación con la del floc por cuanto este se produce a escala natural y en cambio, las jarras son cientos de veces más pequeñas que los floculadores.
- c) La dosificación de los coagulantes y la agitación de la masa de agua pueden ser mucho mejor controladas en la prueba de jarras que en la planta de tratamiento.

No obstante, estas diferencias, la prueba de jarras sigue siendo el mejor método de que hasta ahora disponemos para controlar la dosis correcta de sustancias químicas que debe aplicarse para coagular el agua.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el hecho de que la prueba de jarras sea un ensayo rutinario en la operación de las plantas, no significa que puede ejecutarse descuidadamente, lo que por desgracia suele ser bastante común.

Entre otras, las siguientes precauciones deberían ser observadas:

a) Con respecto a las soluciones

- Evitar la hidrólisis de la solución de coagulante que se usa. Tanto más débil una solución patrón de coagulantes y más alto es su pH, más rápidamente se hidroliza, esto reacciona con el agua para formar compuestos que coagulan más lentamente.
- Es preferible tener una solución patrón concentrada (mayor del 10%) y preparar a partir de ella la solución diluida del 1% (10 gr por 1000 ml), cada vez que se va a hacer la prueba de jarras. Cuando se hace la dosificación de coagulantes en húmedo en la planta de tratamiento, se puede usar como solución patrón la misma que se utiliza en el prototipo.
- En todos los casos, la solución de coagulantes debe estar fresca y conviene, por eso, marcar la fecha de preparación en el frasco donde se la mantenga. Se ha observado siempre que soluciones recientemente hechas, no dan el mismo resultado que las que han sido almacenadas por bastante tiempo.

b) Con respecto al volumen de agua

Mejores resultados se obtienen usando volúmenes grandes de agua que volúmenes pequeños. En lo posible deben preferirse jarras de 1 a 2 lts a las de 0.5 lts o menos.

c) Con respecto a la temperatura

La prueba de jarras debe realizarse a la misma temperatura que la que tiene el agua en la planta de tratamiento. El dejar las jarras sobre el iluminador de la base prendida, o sobre un objeto caliente, cambia rápidamente la temperatura del agua por su poco volumen y produce resultados variables e inconsistentes.

d) Con respecto a la adición de coagulantes

Los coagulantes deben ser añadidos en el mismo orden en que se agregan en la planta de tratamiento y lo más rápidamente posible a las seis jarras. De lo contrario podrían cometerse errores al juzgarse la rapidez con que aparece el primer floc. El punto donde se agregan los coagulantes tiene también importancia. Deben estos aplicarse con una pipeta profundamente dentro del líquido y junto al eje de las aletas.

e) Con respecto a la velocidad de rotación de las paletas

La prueba de jarras nunca será un verdadero modelo a escala de los mezcladores y floculadores de la planta. Sin embargo, la energía que se comunique al líquido con los agitadores, influencia grandemente el proceso. Algunos operadores suelen usar 80 – 100 rpm durante 30 seg. para la mezcla rápida y 20 -40 rpm durante 15 – 30 min para la mezcla lenta. Pero es preferible tratar de encontrar una energía de agitación que produzca un resultado comparable al de la planta. El mantener una velocidad de rotación de las paletas del equipo de prueba de jarras igual a la del mezclador y floculador real, no necesariamente produce resultados comparables. (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente (CEPIS), 1973)

#### 4.2.1 Gradiente de velocidad óptima – Mezcla rápida

##### 4.2.1.1 Coagulación – Floculación

La cantidad de energía que se comunique al líquido durante el proceso de coagulación influye grandemente en el tamaño y resistencia del floc que se forme. De manera empírica, para hacer la floculación en la prueba de jarras, suelen usarse 20 – 40 rpm durante 15 – 20 min, sin tener en cuenta el gradiente de velocidad real que existe en las cámaras de floculación de la planta. Frecuentemente se cree que el mantener una velocidad de rotación de las paletas del equipo de prueba de jarras igual a la del floculador prototipo, produce resultados comparables, lo que no es necesariamente cierto. Son los gradientes de velocidad, en las jarras y en la planta, los que deben igualarse.

El gradiente de velocidad óptimo para floculación está influenciado por una serie de parámetros tales como: cantidad de sustancias químicas utilizadas, si se usan o no polielectrolitos, tipo de suspensión de que se trata (arcilla o color), tipo de coagulante empleado, entre otros.

#### **4.2.2 Tiempo óptimo - Mezcla rápida**

##### **4.2.2.1 Coagulación – Floculación**

Cada agua, según sus características físico – químicas y el coagulante usado, necesita ser agitada durante un cierto tiempo, para permitir que el proceso de aglutinación de las partículas tenga oportunidad de completarse hasta producir un floc que pueda sedimentar en el menor tiempo posible, dejando una turbiedad remanente mínima. A este tiempo se le llama tiempo óptimo de floculación.

El objetivo es el de encontrar el tiempo que se necesita flocular un agua determinada.

##### **4.2.2.2 Sedimentación**

Luego de la mezcla rápida y de la floculación óptima, se suspende la agitación, se levantan las paletas, se empiezan a tomar muestras del sobrenadante a intervalos regulares de tiempo, por ejemplo:  $t= 1 \text{ min}$ ,  $t=3 \text{ min}$ ,  $t=5 \text{ min}$ ,  $t= 10 \text{ min}$ ,  $t=60 \text{ min}$ . Para extraer las muestras se puede usar una pipeta volumétrica introduciéndola 4 – 5 cm dentro del agua.

Con los resultados se elabora la curva: floc removido vs tiempo de sedimentación.

## CAPÍTULO V

### 5 COAGULANTES NATURALES EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS

#### 5.1 *Moringa oleífera*

En diferentes investigaciones han utilizado el extracto acuoso con las semillas de *M. oleífera*, previamente secas y molidas para eliminar metales pesados, como el cobre, plomo, cadmio y cromo presentes en aguas residuales. La identificación de la actividad coagulante y floculante se llevó a cabo con dosis de 2 g/l de coagulante con concentraciones iniciales de 5 mg/l de cada uno de los iones metálicos, que, de acuerdo a los resultados, los porcentajes de remoción fueron 95% de cobre, 93% de plomo, 75% de cadmio y 70% de cromo. Teniendo en cuenta los resultados significativos de coagulación, la *M. oleífera* es una planta considerada como coagulante alternativo en el proceso de coagulación y floculación del agua residual. El mecanismo que produce la coagulación de metales pesados es a través de la adsorción y neutralización de las cargas positivas de los iones metálicos (Muyibi et al., 2004).

En otros estudios experimentales, la extracción de los componentes activos de la *Moringa* mediante la extracción del aceite de las semillas previamente secas y molidas, por medio de etanol para obtener residuo de semillas con solo el 50% de aceite, debido a que la presencia de aceite en las semillas de *M. Oleífera* tienen un efecto en la actividad de coagulación de metales pesados, sin embargo un alto contenido de aceite en las semillas tendría un impacto negativo en el proceso de tratamiento de aguas residuales (Garcia Fayos et al., 2010). Es necesario retirar un porcentaje de aceite de las semillas de *Moringa* para que las proteínas sean activadas y se combinen con los metales pesados que conduce a la formación de complejos, esto debido a que los componentes coagulantes se extraen después de la extracción de aceite porque no es soluble con el lípido (Sajidu et al., 2005, Meneghel et al. 2013)

#### 5.2 *Opuntia ficus indica (cactus)*

*Opuntia ficus indica (cactus)* pertenece a la Familia Cactácea, es originaria de América del Sur, pero también se encuentra en África, Australia, sur de Europa y Asia, actualmente esta planta se encuentra en la mayor parte del mundo. Es una de las plantas que ha sido ampliamente investigada debido a sus propiedades medicinales y como fuente alimentaria dietética (Saravanakumar et al., 2015). Recientemente, *O. ficus* ha sido investigada como un agente coagulante y floculante para la descontaminación de aguas superficiales y residuales que contienen altos niveles de iones de metales pesados, turbidez, colorantes y Demanda Química de Oxígeno. *Opuntia ficus indica* presenta alta capacidad de coagulación, debido que tienen buena capacidad de retención de agua. Por lo tanto, las partes del cactus utilizadas en el proceso de coagulación y floculación son generalmente el mucilago y cladodios. Además, en algunos trabajos experimentales recientes de

los autores Bustillos et al. (2013) sugieren que la mayoría de las partes frescas o secas presentan actividad de coagulación, debido a la que los agentes coagulante activos del cactus son polielectrolitos naturales viscosos con cargas superficiales bajos condiciones ácidas. Por lo tanto, *O. ficus* se considera como un material natural, económico y biodegradable para descontaminación del agua. (Mónica Alejandra Bravo Gallardo, 2017)

### **5.3 Quitosano**

El quitosano es un biopolímero natural de alto peso molécula, producido principalmente por desacetilación alcalina de la quitina este polímero se puede obtener de varias fuentes naturales principalmente se puede encontrar la quitina en crustáceos, hongos, insectos, anélido, molusco, celenterados, etc. (M. Khayet et al., 2011). Varios estudios sobre el quitosano y sus derivados se han utilizado ampliamente en los campos de la medicina, la alimentación, tratamiento de aguas residuales (Jiang et al., 2010). Algunas características que hacen del quitosano una fuente óptima de estudio es su biodegradabilidad, alta densidad de carga catiónica, cadenas largas de polímeros, biocompatibilidad, y además presenta propiedades como bacteriostático y fungistático (Shi et al., 2012), por lo cual estos biopolímeros se puede utilizar para sustituir los coagulantes convencionales como las sales de aluminio y polímeros químicos teniendo en cuenta que se evitaría problemas de contaminación al medio ambiente y a la salud humana causados por los residuos de polímeros de aluminio y químicos en el agua (Chi y Cheng 2006). Además, debido a su naturaleza poli catiónico, el quitosano se puede utilizar como agente floculante y quelante para secuestrar metales pesados. (Mónica Alejandra Bravo Gallardo, 2017)

### **5.4 Escamas de pescado**

#### **5.4.1 Propiedades de escamas de pescado como bioadsorbente natural**

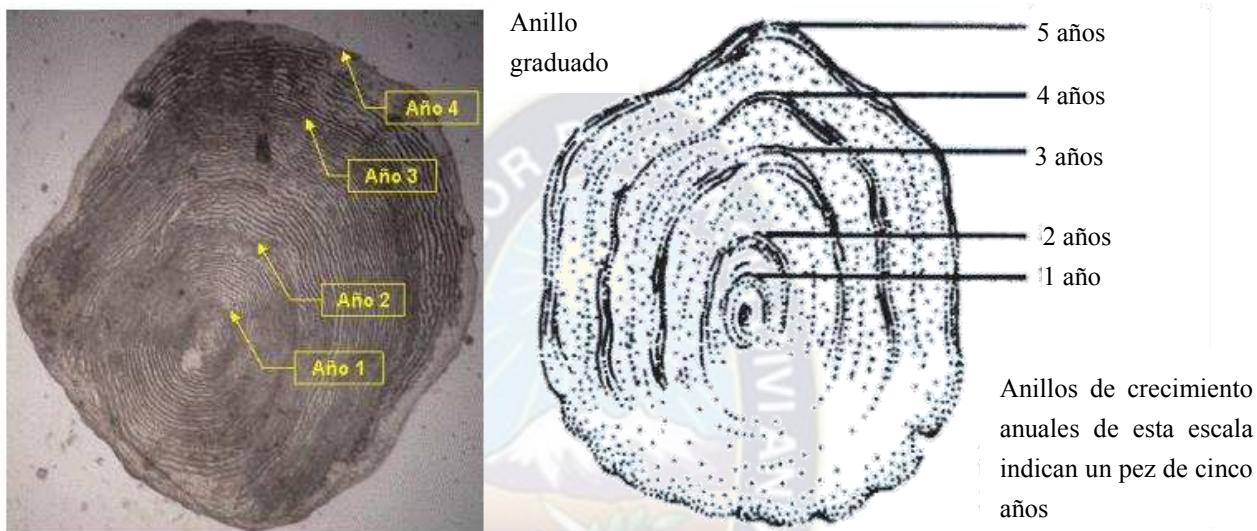
##### **a) Generalidades**

Las escamas son huesos tegumentarios laminares de origen dérmico incluidos en una bolsa epidérmica de tejido conjuntivo fibrilar, derivados de los exoesqueletos de los primitivos ostracodermos y los placodermos (Rojo, 1988). Tanto la cara interna como la externa estas cubiertas por una lámina de osteoblastos, activos en los márgenes de la escama (Beamish y McFarlane, 1987) que provocan su crecimiento continuo.

También se conoce que las escamas están sobrepuertas de apatita deficiente en calcio y materiales de tipo orgánico principalmente colágeno, cuya composición varia con el tipo de pez del cual proviene. Según Takeshi, N. et (2004) el contenido de colágeno es 50.9 % para sardina, 37.5 % para el besugo del mar rojo y 41.0 % para robalo de marino en base seca. (Citado por Serapio Delgado Huallpa, 2013)

Las escamas de pescado fueron motivo de innumerables estudios desde finales del siglo XIX hasta la actualidad con diferentes fines. Se iniciaron con estudios para predecir la edad de los peces a partir de sus escamas, utilizando para ello, diferentes tipos de escamas como cicloides, placoides, ctenoides tomadas de diferentes partes del pez según criterios establecidos (Figura 6). (Serapio Delgado Huallpa, 2013)

*Figura 16: Predicción de la edad de peces usando el número de anillos de escama*



*Fuente: Evaluación de escamas de pescado como adsorbente de metales pesados de agua residual  
Serapio Delgado Huallpa, 2013*

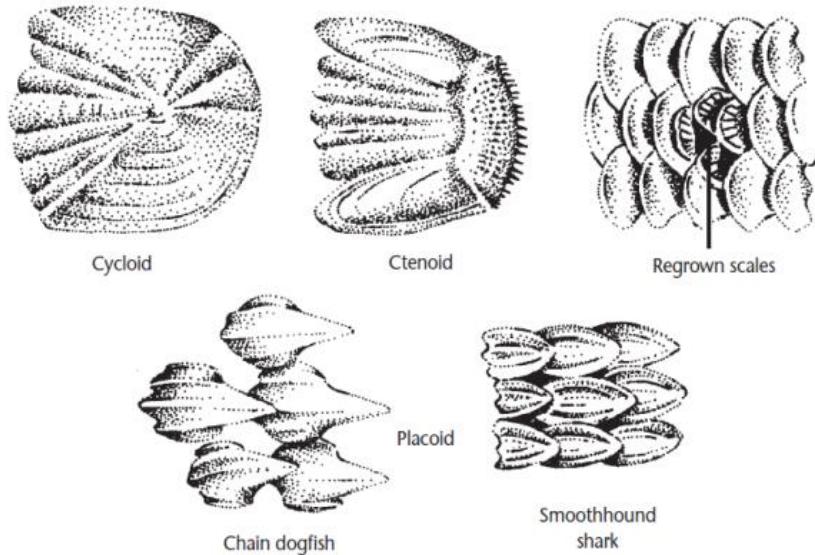
#### b) Clasificación

Las escamas presentan diferentes clasificaciones ya sea por su forma o por su estructura.

De acuerdo a su forma, las escamas se subclasifican en cuatro grupos.

- Placoides: Son aplanadas, se les llama dentículos dérmicos, poseen una capa de vitrodentina material semejante al esmalte de los dientes y otra capa interna de dentina.
- Rómnicos: Son en forma de diamante o rómbicas típico en la amazonia como el paiche actualmente considerado pez gigante de agua dulce ricos en proteínas.
- Cicloide: Tienen forma de disco delgado, liso y redondeado; su borde exterior no posee dientecillos. Generalmente se presentan en peces de aleta blanda.
- Ctenoide: Tienen forma de disco, presentando el borde exterior con dientecillos. Generalmente se presenta en peces de aleta espinosas. (Serapio Delgado Huallpa, 2013)

Figura 17: Algunos tipos de escamas de pescado. Cicloide, Ctenoide y Placoide



Fuente: Evaluación de escamas de pescado como adsorbente de metales pesados de agua residual  
Serapio Delgado Huallpa, 2013

c) Características físicas

Forma: Las escamas presentan formas circulares como las cicloides, ctenoides, óseas, etc. También se tienen formas de diamante o rómbicas como en las ganoide (Figura 7).

Tamaño: Las escamas en general presentan un sin número de tamaños y formas. Existen escamas microscópicas por lo general semi adheridas en peces como anguila, trucha; a su vez también hay peces con escamas enormes como el pez amazónico el paiche.

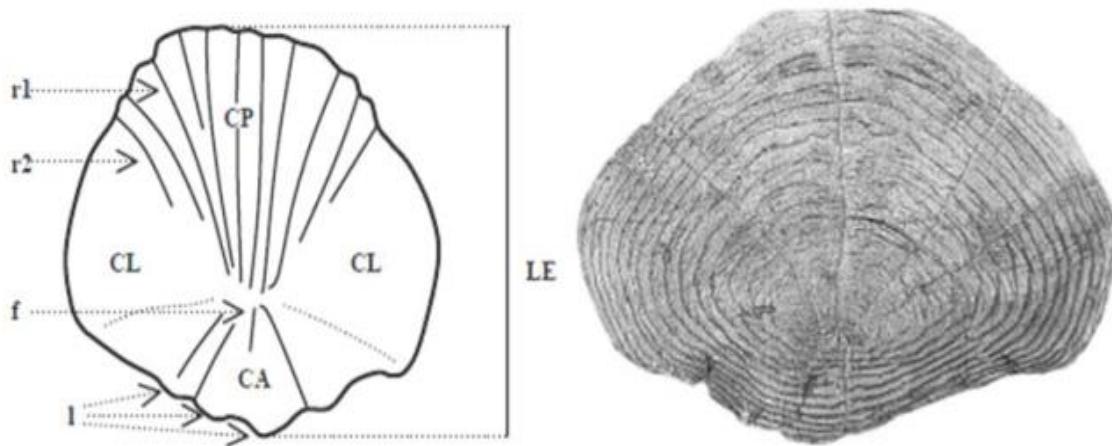
Para un mismo pez el tamaño y aun la forma de las escamas pueden variar en diversos grados dependiendo de la zona de donde se extraiga la escama. Para efectos de estudio sobre la edad y crecimiento de las poblaciones icticas resulta imprescindible extraer la muestra de escamas de una determinada zona que por lo general es de la parte post – pectoral.

Para el caso de las escamas de la especie Ciprinidos se conoce que son de tipo cicloides. Son redondeadas planas y delgadas, con las capas de ganoina e isopedina muy reducidas. Formadas a partir de un foco (Focus), alrededor del cual se va depositando capas concéntricas de escleritos, que forman una serie de estriaciones concéntricas. Estos aparecen más o menos espaciados y son los circulos menos espaciados los que delimitan los anillos de crecimiento (annuli) con los que se puede determinar la edad de estos animales (Morales, 1987). (Citado por Serapio Delgado Huallpa, 2013)

Se dividen en cuatro campos (Figura 8) denominado por Kobayasi (1952) y Elvira (1988) el campo anterior, el posterior y los dos laterales respectivamente. El campo anterior corresponde a la zona de inserción, el posterior al extremo libre. (Citado por Serapio Delgado Huallpa, 2013)

Estos campos están separados entre sí por los dos laterales (anguloso pico y basilaterales, límites más o menos visibles que van desde el foco hasta el margen de las escamas. Estos surcos son los radios (radii) y se dividen en primarios si arrancan desde el focus o secundario si parecen entre el focus y el margen de la escama. (Serapio Delgado Huallpa, 2013)

*Figura 18: Principales elementos definidos en una escama. R1: radio primario. R2: radio secundario. F: focus. I: lóbulos del campo oral. CP: campo posterior. CL: campos laterales. CA: Campo anterior. LE: Longitud máxima.*



*Fuente: Evaluación de escamas de pescado como adsorbente de metales pesados de agua residual  
Serapio Delgado Huallpa*

#### d) Composición química

Las escamas de pescado están compuestas de fosfato cálcico (hidroxapatita) y material orgánico proteíco principalmente el colágeno tipo I. La escama tiene una estructura encapuchada de forma ortogonal, de láminas estratificadas en la capa interna; las fibras de colágeno están colineadas dentro de cada hoja, las cuales rotan alternadamente con un ángulo de 90°. Dicha estructura está formada por la interacción entre las sustancias al exterior de las células. Los carbonos axiales de los cristales de apatita están alineados a lo largo de las fibras de colágeno. (Serapio Delgado Huallpa, 2013)

#### e) Colágeno

El colágeno es la unidad básica de la fibra de colágeno, es una hélice triple de tres cadenas polipeptídicas, cada una de ellas con aproximadamente 1000 residuos.

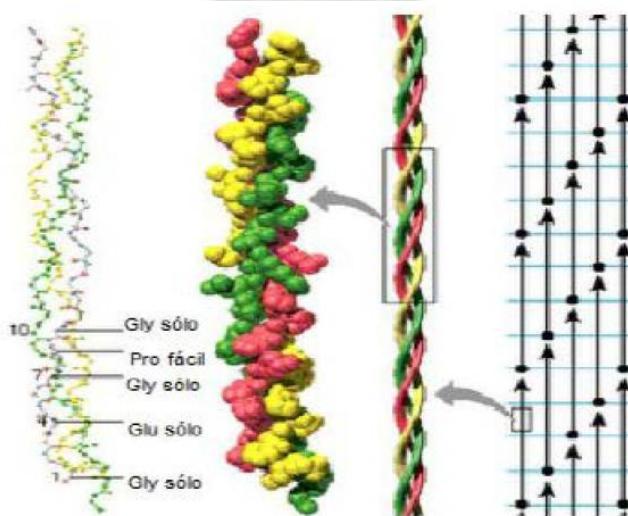
Esta estructura helicoidal triple, que se presenta en la Figura 19, es característica del colágeno. Las cadenas individuales son hélices orientadas a la izquierda, con aproximadamente 3.3

residuos/vuelta. Tres de estas cadenas se enrollan un alrededor de las otras hacia la derecha, con enlaces de hidrógeno que se extienden entre ellas. El examen del modelo revela que cada tercer residuo, que debe encontrarse cerca del centro de la hélice triple, solo puede ser glicina. Cualquier cadena lateral distinta de Gly sería demasiado voluminosa. La formación de las hélices individuales del tipo colágeno también resulta favorecida por la presencia de prolina e hidroxiprolina en la molécula de colágeno. Un conjunto que se repite en la secuencia es la forma Gly – X – Y, donde comúnmente X suele ser prolina mientras que Y hidroxiprolina. Además, cabe señalar que la prolina e hidroxiprolina constituyen aproximadamente 22% de los aminoácidos presentes.

El colágeno es la proteína más abundante del reino animal que está presente en todos los fyla de metazoos estudiados y se encuentran prácticamente en todos los tejidos a los que proporciona el armazón que le da forma y consistencia estructural.

El colágeno constituye la mayor parte de la masa orgánica de la piel, tendones, los vasos sanguíneos, los huesos, el cartílago, la córnea, el humor vítreo del ojo, los dientes y las membranas basales. Las fibras de colágeno forman la matriz de los huesos sobre la que precipitan los constituyentes minerales. La importancia del colágeno queda patente por su alta concentración en todos los órganos con porcentajes en peso de tejido, en algunos de los tejidos y órganos representativos del ser humano, del 74% en la piel, 64% en la córnea, 50% en el cartílago, 23% en el hueso cortical entero, de 12 -24% en la aorta, 10% en el pulmón, y 4% en el hígado (Serapio Delgado Huallpa, 2013)

Figura 19: Estructura de las fibras de colágeno (Fuente: Mathews et al, 2002)



Fuente: Evaluación de escamas de pescado como adsorbente de metales pesados de agua residual  
Serapio Delgado Huallpa

- Usos y aplicaciones

Las características químicas únicas, del colágeno se ha utilizado en diversos campos de la industria (Bae et al. 2008), tiene aplicaciones en materiales biomédicos, en la industria farmacéutica, cosmética y en alimentos (Potaros et al. 2009). (Citado por Serapio Delgado Huallpa, 2013)

Actualmente el colágeno tiene aplicaciones muy importantes en el campo de los materiales biomédicos y biomateriales. Un biomaterial es una sustancia, elemento o combinación de estos, ya sean sintéticos o naturales, que pueden utilizarse para reemplazar parcial o definitivamente una función que desempeña alguna parte del cuerpo humano, también se ha definido como un elemento capaz de adaptarse al cuerpo humano y desarrollar una función específica (Villela 2004). Los biomateriales más usados son la aleaciones metálicas, polímeros, cerámicos y sustancias biológicas. Entre las sustancias biológicas, el colágeno ha sido uno de los más empleados y más comerciales. (Citado por Serapio Delgado Huallpa, 2013)

Los biomateriales han tenido gran importancia para la Ingeniería de Tejidos, ya que este campo se basa en la utilización de estos materiales. Al respecto se han realizado diferentes estudios para demostrar la aplicabilidad del colágeno como biomaterial en la ingeniería de tejidos.

- Fuentes de obtención

La principal fuente de extracción de colágeno ha sido hasta el momento de los residuos de las especies bovinas y de la piel, huesos y cartílagos de cerdo (Wang et al. 2007).

Con la búsqueda de nuevas fuentes de colágeno de origen de pescado, analizando las pieles de pescados de agua dulce y agua salada (Woo et al. 2008), por ejemplo: bacalao común (Sadowska et al. 2003), perca común (Muyonga et al. 2004), carpa gris (Zhang et al 2007), tiburón bambú (Kittiphatthanabawon et al. 2010), carpa plateada (Zhang et al. 2007) y la tilapia nilótica (Zeng et al. 2009). (Citado por Serapio Delgado Huallpa, 2013)

## 5.5 Escamas de Sábalo y Pejerrey

### 5.5.1 Sábalo (*Clupea alosa*)

- Características

- a) Viven en el agua por su naturaleza acuática (Figura 10).
- b) Cuerpo con esqueleto generalmente óseo y cubierto exteriormente de escamas.
- c) Casi siempre de forma plana - convexa y alargada (fusiforme) con extremidades convertidas en aletas.
- d) De diversos colores, sangre fría y temperatura variable.

- e) Anexo al tubo digestivo, llevan algunos peces la vejiga natatoria, que, dilatando o comprimiendo a voluntad (a fin de que entre o salga aire) les sirve para subir o bajar en el agua (hidrostática).
- f) Son ovíparos por reproducirse de huevos y carnívoros por alimentarse de carne (y también de vegetales.)
  - Partes externas
- a) **Cabeza:** Con ojos fijos, redondos y boca circular, guarneida generalmente de dientes sin raíces y soldados al hueso maxilar; lleva en ambos lados las cámaras branquiales (arcos y laminillas), cubiertas por tapas llamadas opérculos; detrás de éstas están las agallas, por donde sale el agua espinosa que penetra por la boca.
- b) **Aletas:** En diferentes partes del cuerpo, se hallan varias clases de aletas con funciones genéricas y específicas para la vida acuática. Estas son: dos pectorales, en la parte delantera (representan las extremidades superiores); dos abdominales, en la parte inferior (representan las extremidades inferiores); una dorsal, en la parte superior del dorso (en algunos peces suele faltar); otra anal, por debajo y detrás del ano; y una aleta caudal que constituye la cola (que ejerce el papel de timonera), algunas aletas son blandas.
- c) **Escamas:** Que pueden ser circulares llamadas cicloideas, como en la mayoría de los peces. Rómbicas o tenoideas en algunos peces, y en forma de espinas o placoideas como en los peces raros que viven en el fondo del mar.
  - Partes internas
- a) **Esqueleto:** En su generalidad, tiene esqueleto duro y espinoso; pero también hay de esqueleto blando y flexible; de ahí que se dividen en “peces óseos” y “peces cartilaginosos”.
- b) **Aparato digestivo:** La faringe está en comunicación con las branquias; tiene esófago relativamente corto y estómago grande; el hígado, que es un órgano anexo, posee cualidades vitamínicas; tragan sus presas sin masticar.
- c) **Aparato respiratorio:** La respiración no es pulmonar, sino branquial; las branquias son láminas dispuestas en serie y sostenidas por arcos especiales, cuyas disposiciones varían, según sean peces óseos o cartilaginosos.

- d) **Aparato circulatorio:** Está constituido por un corazón simple: una aurícula y un ventrículo con sus respectivos vasos sanguíneos (arterias y venas). La sangre toma el oxígeno del agua mediante las branquias, para ser distribuida en el organismo por la aorta dorsal.
- e) **Sistema nervioso:** Los hemisferios cerebrales son lisos; carecen de circunvoluciones; los sentidos se hallan muy poco desarrollados.

<https://www.educa.com.bo/animales-tipicos-de-bolivia/los-peces-sabalo-clupea-alosa>

*Figura 20: Pez Sábalo*



Fuente: <https://www.educa.com.bo/animales-tipicos-de-bolivia/los-peces-sabalo-clupea-alosa>

### 5.5.2 Pejerrey (*Odontesthes bonariensis*)

- El Pejerrey puede alcanzar un tamaño variado de 4 a 52 centímetros y un peso de 100 gramos a 4 kilogramos, dependiendo de la especie (Figura 11).
- El Pejerrey pertenece a la Familia Atherinidae.
- **Cuerpo:** Alargado, fusiforme, más o menos comprimido. Costillas en relación con par apófisis muy fuertes. Vértebras pueden variar de 32 a 60; faja plateada longitudinal lateral siempre presente.
- **Escamas:** Medianas o pequeñas; ordinariamente cicloideas.
- **Cabeza:** Aplanada superiormente; boca terminal hendida oblicuamente, premaxilar generalmente muy protráctil. Maxilar excluido del borde la maxila superior y terminado en punta en su extremidad posterior.
- **Línea lateral:** Dividida, nunca completa. A veces se ven a distintos niveles fragmentos de línea lateral.

- **El aparato branquial:** Opérculo sin espinas ni puntas; mejillas y piezas operculares escamosas. Agallas anchas, membranas branquiostegas separadas del istmo. Cuatro branquias con un surco detrás de la cuarta. Pseudo branquias presente.
- Poseen dos aletas dorsales bien separadas. La anterior con tres a ocho espinas delgadas y flexibles; la posterior membranosa. Aletas ventrales pequeñas más o menos distantes de las pectorales. Inserción de las pectorales muy elevada, encontrándose a nivel del ángulo postero superior del opérculo. Aleta anal con una espina débil, caudal en horqueta.
- **El aparato digestivo:** Premaxilares protráctiles; boca que se abre en embudo. Rastrillo branquial con 5 pares de branqui espinas. Se calcula que la mayor eficiencia de filtrado se sitúa para partículas desde alrededor de 1 mm. Poseen placas faríngeas para la trituración de moluscos y crustáceos decápodos. El tubo digestivo: relación longitud intestino a longitud del cuerpo: 1.3. Estómago corto, simple, un poco más ancho que el intestino. Sin ciegos pilóricos.
- **La vejiga natatoria:** Presente, alargada, extendiéndose a menudo detrás del ano en un canal formado por las vértebras caudales.
- **Coloración:** Blancos, comúnmente con faja plateada muy brillante (estola) situada a lo largo de los costados.

[www.fao.org/3/v7283s/V7283S06.htm](http://www.fao.org/3/v7283s/V7283S06.htm)

Figura 21: Pez Pejerrey



Fuente: [www.fao.org/3/v7283s/V7283S06.htm](http://www.fao.org/3/v7283s/V7283S06.htm)

## CAPÍTULO VI

### 6 METALES PESADOS Y EFECTOS SOBRE LA SALUD

#### 6.1 Cadmio (Cd)

##### 6.1.1 Información físico – química

*Cuadro 3: Información Físico - Química*

Fórmula	Cd
Masa atómica	112.4
Punto de Ebullición	765°C
Punto de Fusión	321°C
Densidad	8.6 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidad en agua	Ninguna
Temperatura de ignición	250°C (polvo metálico de cadmio)

*Fuente: Organización internacional del trabajo Organización Mundial de la Salud.” (2005) - Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs)*

##### 6.1.2 Efectos del Cadmio sobre la salud

Una alta exposición puede ocurrir con gente que vive cerca de los vertederos de residuos peligrosos o fabricas que liberan Cadmio en el aire y gente que trabaja en las industrias de refinerías del metal. Cuando la gente respira el Cadmio este puede dañar severamente los pulmones. Esto puede incluso causar la muerte. El Cadmio primero es transportado hacia el hígado por la sangre. Allí es unido a proteínas para formar complejos que son transportados hacia los riñones. El Cadmio se acumula en los riñones, donde causa un daño en el mecanismo de filtración. Esto causa la excreción de proteínas esenciales y azúcares del cuerpo y el consecuente daño de los riñones. Lleva bastante tiempo antes de que el Cadmio que ha sido acumulado en los riñones sea excretado del cuerpo humano.

Otros efectos sobre la salud que pueden ser causados por el Cadmio son:

- Diarreas, dolor de estómago y vómitos severos
- Fractura de huesos
- Fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad
- Daño al sistema nervioso central
- Daño al sistema inmune
- Desordenes psicológicos
- Posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer

(Jhon Emsley, 2001)

### 6.1.3 Efectos ambientales del Cadmio

Las aguas residuales con Cadmio procedentes de las industrias mayoritariamente terminan en suelos. Las causas de estas corrientes de residuos son por ejemplo la producción de Zinc, minerales de fosfato y las bioindustrias del estiércol. El Cadmio de las corrientes residuales puede también entrar en el aire a través de la quema de residuos urbanos y de la quema de combustibles fósiles. Debido a las regulaciones solo una pequeña cantidad de Cadmio entra ahora en el agua a través del vertido de aguas residuales o industriales.

Otra fuente importante de emisión de Cadmio es la producción de fertilizantes fosfatos artificiales. Parte del Cadmio terminara en el suelo después de que el fertilizante es aplicado en las granjas y el resto del Cadmio terminara en las aguas superficiales cuando los residuos del fertilizante son vertidos por las compañías productoras.

El Cadmio puede ser transportado a grandes distancias cuando es absorbido por el lodo. Este lodo rico en Cadmio puede contaminar las aguas superficiales y los suelos.

El Cadmio es fuertemente adsorbido por la materia orgánica del suelo. Cuando el Cadmio está presente en el suelo este puede ser extremadamente peligroso. Los suelos que son ácidos aumentan la acumulación de Cadmio por las plantas. Esto es un daño potencial para los animales que dependen de las plantas para sobrevivir. El Cadmio puede acumularse en sus cuerpos, especialmente cuando estos comen muchas plantas diferentes. Las vacas pueden tener grandes cantidades de Cadmio en sus riñones debido a esto.

Las lombrices y otros animales esenciales para el suelo son extremadamente sensibles al envenenamiento por Cadmio. Pueden morir a muy bajas concentraciones y esto tiene consecuencias en la estructura del suelo. Cuando las concentraciones de Cadmio en el suelo son altas esto puede influir en los procesos del suelo de microorganismos y amenazar a todo el ecosistema del suelo.

En ecosistemas acuáticos el Cadmio puede bioacumularse en mejillones, ostras, gambas, langostas y peces. La susceptibilidad al Cadmio puede variar ampliamente entre organismos acuáticos. Organismos de agua salada se sabe que son más resistentes al envenenamiento por Cadmio que organismos de agua dulce. Animales que comen o beben Cadmio algunas veces tienen la presión sanguínea alta, daños del hígado y daños en nervios y el cerebro. (Jhon Emsley, 2001)

## 6.2 Manganese (Mn)

### 6.2.1 Información Físico – Química

Cuadro 4: Información Físico - Química

Fórmula	Mn
Masa atómica	54.9
Punto de Ebullición	1962°C
Punto de Fusión	1244°C
Densidad	7.47 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidad en agua	Ninguna

Fuente: Organización internacional del trabajo Organización Mundial de la Salud. ” (2005) Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs)

### 6.2.2 Efectos del Manganese sobre la salud

El manganese es un compuesto muy común que puede ser encontrado en todas partes en la tierra. El manganese es uno de los tres elementos trazas tóxicos esenciales, lo cual significa que no es solo necesario para la supervivencia de los humanos, pero que es también tóxico cuando está presente en elevadas concentraciones en los humanos. Cuando la gente no cumple con la ración diaria recomendada su salud disminuirá. Pero cuando la toma es demasiada aparecen problemas en la salud.

La toma de Manganese por los humanos mayoritariamente tiene lugar a través de la comida, como son las espinacas, el té y la hierbas. Las comidas que contienen las más altas concentraciones son los granos y arroz, las semillas de soya, huevos, frutos secos, aceite de oliva, judías verdes y ostras. Después de ser absorbida en el cuerpo humano el manganese será transportado a través de la sangre al hígado, los riñones, el páncreas y las glándulas endocrinas.

Los efectos del Manganese mayormente ocurren en el tracto respiratorio y el cerebro. Los síntomas por envenenamiento con Manganese son alucinaciones, olvidos y daños en los nervios. El Manganese puede causar parkinson, embolia de los pulmones y bronquitis.

Cuando los hombres se exponen al Manganese por un largo periodo de tiempo el daño puede llegar a ser importante.

Un síndrome que es causado por el manganese tiene los siguientes síntomas: esquizofrenia, depresión, debilidad de músculos, dolor de cabeza e insomnio.

Porque el Manganese es un elemento esencial para la salud de los humanos la falta de este puede también causar efectos sobre la salud. Estos son los siguientes efectos:

- Engordar
- Intolerancia a la glucosa
- Coágulos de sangre
- Problemas de la piel
- Bajo niveles de colesterol
- El Desorden del esqueleto
- Defectos de nacimiento
- Cambios en el color del pelo
- Síntomas neurológicos

(Jhon Emsley, 2001)

### 6.2.3 Efectos ambientales del Manganese

Los compuestos del manganese existen de forma natural en el ambiente como sólidos en suelos y pequeñas partículas en el agua. El manganese en el aire está presente en las partículas de polvo. Estas usualmente se depositan en la tierra en unos pocos días.

Los humanos aumentan las concentraciones de Manganese en el aire por las actividades industriales y a través de la quema de productos fósiles. El Manganese que deriva de las fuentes humanas puede también entrar en la superficie del aguas, aguas subterráneas y aguas residuales. A través de la aplicación del Manganese como pesticida el Manganese entrara en el suelo.

Para los animales el Manganese es un componente esencial sobre unas 36 enzimas que son usadas para el metabolismo de carbohidratos, proteínas y grasas.

Los animales que comen muy poco Manganese interfieren en el crecimiento normal, la formación de huesos y en la reproducción.

Para algunos animales la dosis letal es bastante baja, lo cual significa que tienen pocas posibilidades de supervivencia incluso a pequeñas dosis de Manganese cuando este excede la dosis esencial. El Manganese puede causar disturbias en los pulmones, hígado y vasculares, decremento de la presión sanguínea, fallos en el desarrollo de fetos de animales y daños cerebrales.

Cuando el Manganese es tomado a través de la piel este puede causar temblores y fallos en la coordinación. Finalmente, las pruebas de laboratorio con animales han mostrado que diversos envenenamientos con Manganese deberían incluso ser capaces de causar el desarrollo de tumores en animales.

En plantas los iones del Manganese son transportados hacia las hojas después de ser tomados en el suelo. Cuando muy poco manganese puede ser absorbido desde el suelo esto causa

disturbaciones en los mecanismos de las plantas. Por ejemplo, disturbancias en la división del agua en hidrógeno y oxígeno, en lo cual el Manganeso juega un papel importante.

El Manganeso puede causar síntomas de toxicidad de Manganeso en suelo pueden causar inflamación de la pared celular, abrasamiento de las hojas y puntos marrones en las hojas. Las deficiencias pueden también causar estos efectos entre concentraciones tóxicas y concentraciones que causan deficiencias una pequeña área de concentraciones donde el crecimiento de la planta es óptimo puede ser detectado. (Jhon Emsley, 2001)

### 6.3 Zinc (Zn)

#### 6.3.1 Información Físico – Química

Cuadro 5: Información Físico - Químico

Fórmula	Zn
Masa atómica	65.4
Punto de Ebullición	907°C
Punto de Fusión	419°C
Densidad	7.1 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidad en agua	Reacciona
Temperatura de ignición	460°C

Fuente: Organización internacional del trabajo Organización Mundial de la Salud.” (2005) Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs)

#### 6.3.2 Efectos del Zinc sobre la salud

El Zinc es una substancia muy común que ocurre naturalmente. Muchos alimentos contienen ciertas concentraciones de Zinc. El agua potable también contiene cierta cantidad de Zinc. La cual puede ser mayor cuando es almacenada en tanques de metal. Las fuentes industriales o los emplazamientos para residuos tóxicos pueden ser la causa del Zinc en el agua potable llegando a niveles que causan problemas.

El Zinc es un elemento traza que es esencial para la salud humana. Cuando la gente absorbe demasiado por Zinc estos pueden experimentar una pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor y el olor. Pequeñas llagas, y erupciones cutáneas. La acumulación del Zinc puede incluso producir defectos de nacimiento.

Incluso los humanos pueden manejar proporcionalmente largas cantidades de Zinc, demasiada cantidad de Zinc puede también causar problemas de salud eminentes, como es ulceras de estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas y anemia. Niveles alto de Zinc pueden dañar el

páncreas y disturbar el metabolismo de las proteínas, y causar arterioesclerosis. Exposiciones al clorato de Zinc intensivas pueden causar desordenes respiratorios.

En el ambiente de trabajo el contacto con Zinc puede causar la gripe conocida como la fiebre del metal. Esta pasará después de dos días y es causada por una sobre sensibilidad. El Zinc puede dañar a los niños que no han nacido y a los recién nacidos. Cuando sus madres han absorbido grandes concentraciones de Zinc los niños pueden ser expuestos a este a través de la sangre de sus madres. (Jhon Emsley, 2001)

### 6.3.3 Efectos ambientales del Zinc

El Zinc se encuentra en el aire, agua y suelo, pero las concentraciones están aumentando, debido a la adición de Zinc a través de las actividades humanas. La mayoría del Zinc es adicionado durante actividades industriales, como en la minería, la combustión de carbón y residuos y el procesado del acero. La producción mundial de Zinc esta todavía creciendo. Esto significa básicamente que más y más Zinc termina en el ambiente.

El agua es contaminada con Zinc, debido a la presencia de grandes cantidades de Zinc en las aguas residuales de plantas industriales. Estas aguas residuales no son depuradas satisfactoriamente. Una de las consecuencias es que los ríos están depositando fango contaminado con Zinc en sus orillas. El Zinc puede también incrementar la acidez de las aguas.

Grandes cantidades de Zinc pueden ser encontradas en los suelos. Cuando los suelos son granjas y están contaminados con Zinc, los animales absorben concentraciones que son dañinas para su salud. El Zinc soluble en agua que está localizado en el suelo puede contaminar el agua subterránea.

El Zinc no sólo puede ser una amenaza para el ganado, también para las plantas. Las plantas a menudo tienen una concentración de Zinc que su sistema no puede manejar, debido a la acumulación de Zinc en el suelo. En suelos ricos en Zinc sólo un número limitado de plantas tiene la capacidad de sobrevivir. Esta es la razón por la cual no hay mucha diversidad de plantas cerca de depósitos de Zinc. Debido a que los efectos del Zinc sobre, las plantas es una amenaza seria para la producción de las granjas. A pesar de esto estiércol que contiene Zinc es todavía aplicado.

Finalmente, el Zinc puede interrumpir la actividad en los suelos, con influencias negativas en la actividad de microorganismos y lombrices. La descomposición de la materia orgánica posiblemente sea más lenta debido a esto. (Jhon Emsley, 2001)

## 6.4 Cobre (Cu)

### 6.4.1 Información Físico – Químico

Cuadro 6: Información Físico - Químico

Fórmula	Cu
Masa atómica	63.5
Punto de Ebullición	2595°C
Punto de Fusión	1083°C
Densidad relativa (agua=1)	8.9
Solubilidad en agua	Ninguna
Coeficiente de reparto octanol/ agua como log Pow	-0.57 (calculado)

Fuente: Organización internacional del trabajo Organización Mundial de la Salud.” (2005) Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs) “

### 6.4.2 Efectos del Cobre sobre la salud

El Cobre es una substancia que se extiende a través del ambiente a través de fenómenos naturales, los humanos usan ampliamente el Cobre. Por ejemplo, este es aplicado en industrias y en agricultura. La producción de Cobre se ha incrementado en las últimas décadas y debido a esto las cantidades de Cobre en el ambiente se ha expandido.

El Cobre puede ser encontrado en muchas clases de comidas, en el agua potable y en el aire. Debido a que absorbemos una cantidad eminente de cobre cada día por la comida, bebiendo y respirando. La absorción del Cobre es necesaria, porque el Cobre es un elemento traza que es esencial para la salud de los humanos. Aunque los humanos pueden manejar concentraciones de Cobre proporcionalmente altas, mucho Cobre puede también causar problemas de salud.

La mayoría de los compuestos del Cobre se depositarán y se enlazarán tanto a los sedimentos del agua como a las partículas del suelo. Compuestos solubles del Cobre forman la mayor amenaza para la salud humana. Usualmente compuestos del Cobre solubles en agua ocurren en el ambiente después de liberarse a través de aplicaciones en la agricultura.

Las concentraciones del Cobre en el aire son usualmente bastante bajas, así que la exposición al Cobre por respiración es descartable. Pero gente que vive cerca de fundiciones que procesan el mineral cobre en metal pueden experimentar esta clase de exposición.

La exposición profesional al Cobre puede ocurrir. En el Ambiente de trabajo el contacto con Cobre puede llevar a coger gripe conocida como la fiebre del metal. Esta fiebre pasará después de dos días y es causada por una sobre sensibilidad.

Exposiciones de largo periodo al cobre pueden irritar la nariz, la boca y los ojos y causar dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos y diarreas. Una toma grande de cobre puede causar daño al hígado y los riñones e incluso la muerte. (Jhon Emsley, 2001).

#### **6.4.3 Efectos ambientales del Cobre**

La producción mundial de Cobre está todavía creciendo. Esto básicamente significa que más y más Cobre termina en el medio ambiente. Los ríos están depositando barro en sus orillas que están contaminados con Cobre, debido al vertido de aguas residuales contaminadas con Cobre. El Cobre entra en el aire, mayoritariamente a través de la liberación durante la combustión de fuel. El Cobre en el aire permanecerá por un periodo de tiempo eminentemente, antes de depositarse cuando empieza a llover. Este terminará mayormente en los suelos, como resultado los suelos pueden también contener grandes cantidades de Cobre después de que esté sea depositado desde el aire.

El Cobre puede ser liberado en el medio ambiente tanto por actividades humanas como por procesos naturales. Ejemplo de fuentes naturales son las tormentas de polvo, descomposición de la vegetación, incendios forestales y aerosoles marinos. Unos pocos de ejemplos de actividades humanas que contribuyen a la liberación del Cobre han sido ya nombrado. Otros ejemplos son la minería, la producción de metal, la producción de madera y la producción de fertilizantes fosfatados.

El Cobre es a menudo encontrado cerca de minas, asentamientos industriales, vertederos y lugares de residuos.

Cuando el Cobre termina en el suelo este es fuertemente atado a la materia orgánica y minerales. Como resultado este no viaja muy lejos antes de ser liberado y es difícil que entre en el agua subterránea. En el agua superficial el cobre puede viajar largas distancias, tanto suspendido sobre las partículas de lodos como iones libres.

El Cobre no se rompe en el ambiente y por eso se puede acumular en plantas y animales cuando este es encontrado en suelos. En suelos ricos en Cobre sólo un número pequeño de plantas pueden vivir. Por esta razón no hay diversidad de plantas cerca de las fábricas de Cobres, debido al efecto del Cobre sobre las plantas, es una seria amenaza para la producción en las granjas. El Cobre puede seriamente influir en el proceso de ciertas tierras agrícolas, dependiendo de la acidez del suelo y la presencia de materia orgánica. A pesar de esto el estiércol que contiene Cobre es todavía usado.

El Cobre puede interrumpir la actividad en el suelo, su influencia negativa en la actividad de microorganismos y lombrices de tierra. La descomposición de la materia orgánica puede disminuir debido a esto.

Cuando los suelos de las granjas están contaminados con Cobre, los animales pueden absorber concentraciones de Cobre que dañan su salud. Principalmente las ovejas sufren un gran efecto por envenenamiento con Cobre, debido a que los efectos del Cobre se manifiestan a bajas concentraciones. (Jhon Emsley, 2001)

## 6.5 Contaminación de aguas por metales pesados

Los metales presentes en el agua son diversos y generalmente contaminan los cuerpos de agua por la actividad humana, causando graves estragos al medio ambiente y a la población en general, disminuyendo la ya reducida cantidad de agua para consumo humano ya existente.

Las aguas procedentes de las industrias como la minería, la de recubrimientos metálicos, las fundidoras y otras más, contaminan el agua con diversos metales. Por ejemplo, las sales de metales como el Zinc, el Mercurio, la Plata y el Cadmio son muy tóxicos para la flora y fauna terrestres y acústicas.

Las sales solubles en agua de los metales pesados son muy tóxicos y acumulables por los organismos que las absorben, los cuales a su vez son fuente de contaminación de las cadenas alimenticias al ser ingeridos por uno de sus eslabones dentro de los cuales podría estar el hombre (proceso de bioacumulación y bio magnificación). (Kurniawan, Chan, Wai, &Babel, 2006)

La presencia de metales pesados en el suelo, al igual que en aguas subterráneas y superficiales, pueden ser resultado de procesos naturales y de actividades antropogénicas, siendo esta ultima la principal responsable tanto de forma directa como indirecta del incremento de los niveles de metales pesados en el ambiente.

Proceso geoquímicos naturales que involucran a la erosión de rocas, consecuentemente la disolución y reacción química entre sólidos, líquidos y gases a través de los estados del ciclo hidrológico, permiten que metales que forman parte de la corteza terrestre, tales como Zinc (Zn), Selenio (Se), Arsénico (As), Níquel (Ni), Molibdeno (Mo), Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Cobre (Cu), Cobalto (Co), Cromo 8Cr, Cadmio (Cd), Manganese (Mn) y Bario (Ba) y otros sean esparcidos en el suelo y en aguas superficiales después de periodos de lluvia.

Por su parte, la actividad antropogénica es responsable del incremento de estos elementos en aguas superficiales (por medio de la descarga de residuos líquidos), en el aire (por medio de procesos de combustión y reducción de tamaño de minerales valiosos) y en el suelo (a través de actividades agropecuarias).

Los efluentes industriales son considerados como uno de los principales responsables tanto directos como indirectos de la contaminación de aguas superficiales. Efluentes como los producidos por refinerías de petróleo, industrias de pulpa y papel, textiles, metalúrgicas, industrias

productoras de químicos orgánicos e inorgánicos, plástico, curtiembres, mineras, galvanoplastia, entre otras, contienen una gran cantidad de metales pesados.

En el cuadro 7 se puede observar los distintos metales pesados que suelen estar presentes en los efluentes generados por estas industrias (Manzoor et al., 2006; Mohan y Pittman, 2006; Sial et al., 2006; Cavaco et al., 2007).

*Cuadro 7: Metales pesados presentes en residuos líquidos industriales*

Industria	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Al	Sn	Sb
Refinería de petróleo	X		X	X	X		X		X	X	X		
Pulpa y papel			X	X	X	X	X		X				
Textiles	X	X	X	X	X		X	X	X				
Metalurgia	X		X		X		X	X	X	X			X
Químicos orgánicos	X		X			X	X	X	X	X	X	X	
Químicos inorgánicos	X		X			X	X	X	X	X	X		
Plásticos	X												
Curtiembre									X				
Mineras		X		X		X	X	X		X			
Drenaje acido de minas	X	X	X	X						X	X		
Galvanoplastia		X	X	X	X		X		X				

*Fuente: Evaluación de escamas de pescado como adsorbente de metales pesados de agua residual  
Serapio Delgado Huallpa*

Entre los metales pesados que pueden estar presentes en la atmósfera se encuentran As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Se, Sn y Zn, estos pueden ser generados mediante la combustión de carbón y combustibles fósiles, en centrales eléctricas, manufactureras de cobre, hierro y acero y la combustión de residuos sólidos (Figueiredo et al., 2007; Quina et al., 2007).

Entre las actividades agropecuarias que incrementan la concentración de metales pesados se encuentran la aplicación de elementos tales como Cu, Zn, Fe, Mn y B utilizados para incrementar el rendimiento de los cultivos; la aplicación de fungicidas, pesticidas y herbicidas que contienen Cu, Zn, Fe, Mn y As; la aplicación de fertilizantes que contienen Cd y Pb como impurezas, como por ejemplo el superfosfato triple o fosfato calcio / magnesio, que contienen una cantidad variable de Cadmio, dependiendo de la roca fosfatada y la aplicación de biosólidos o compost (He et al., 2005). (Citado por Serapio Delgado Huallpa, 2013)

## 6.6 Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica

La siguiente disposición legal reglamenta la Ley del Medio Ambiente N°1333 del 27 de abril de 1992 en lo referente a la prevención y control de la contaminación hídrica, en el marco del Desarrollo sostenible.

A continuación, se muestra los valores máximos admisibles.

*Cuadro 8: Valores Máximos Admisibles de Parámetros en Cuerpos Receptores*

Cuadro No A – 1							
VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE PARÁMETROS EN CUERPOS RECEPtoRES							
Nro.	Parámetros	Unidad	Cancerígenos	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
1	Cadmio	mg/l	NO	0.005	0.005	0.005	0.005
2	Cobre	mg/l	NO	0.05 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu
3	Manganoso	mg/l	NO	0.5 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0 c. Mn
4	Zinc	mg/l	NO	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn	5.0 c. Zn	5.0 c. Zn

*Fuente: Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica – Ley 1333*

*Cuadro 9: Límites Permisibles para Descargas Liquidas*

ANEXO A – 2		
LIMITES PERMISIBLES PARA DESCARGAS LIQUIDAS EN mg/l		

NORMA - PARÁMETROS	Diaria	Mensual
Cobre	1.0	0.5
Zinc	3.0	1.5
Cadmio	0.3	0.15

*Fuente: Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica – Ley 1333*

**Diaria:** Hace referencia a la toma de muestra por un periodo de 24 horas en un día para realizar la medición del parámetro en la descarga líquida.

**Mensual:** Es el promedio mensual para 30 días de la medición diaria.

Como el Cuadro 8 muestra sobre si los metales son o no cancerígenos, podemos mencionar que según la **Guía para la calidad del agua potable** para los distintos metales tenemos:

- **Cadmio:** La absorción de los compuestos de Cadmio depende de su solubilidad. El Cadmio se acumula principalmente en los riñones y su semivida biológica en el ser humano es prolongada, de 10 a 35 años. Hay pruebas de que el Cadmio es cancerígeno por inhalación. No obstante, no hay pruebas de que sea cancerígeno por vía oral ni

pruebas concluyentes de su genotoxicidad. La toxicidad del cadmio afecta principalmente al riñón. La concentración critica de cadmio en la corteza renal que produciría una prevalencia del 10% de proteinuria de bajo peso molecular en la población general es de unos 200 mg/kg y se alcanzaría tras una ingesta alimentaria diaria de unos 175  $\mu\text{g}$  por persona durante 50 años.

- **Cobre:** La IPCS concluyo que el límite máximo aceptable de ingesta por vía oral para adultos resulta dudoso, pero el probable que sea del orden de varios miligramos al día (mas de 2 ó 3, pero no muchos). Esta evaluación se basó únicamente en estudios sobre los efectos gastrointestinales del agua de consumo contaminada con cobre. Se considero que los datos disponibles de toxicidad en animales no eran de utilidad para establecer el límite máximo aceptable de ingesta por vía oral, debido a la incertidumbre sobre el modelo adecuado para el ser humano, aunque se tuvieron en cuenta para determinar un modo de acción de la respuesta. Los datos sobre los efectos gastrointestinales del cobre deben emplearse con precaución, ya que la concentración del cobre ingerido influye mas en los efectos observados que la masa total o dosis ingerida durante 24 horas. En estudios recientes se ha definido el umbral de concentración de cobre en el agua de consumo que produce efectos sobre el aparato digestivo, pero todavía hay ciertas dudas respecto a los efectos del cobre a largo plazo en poblaciones sensibles, como los portadores del gen de la enfermedad de Wilson o los afectados por otros trastornos metabólicos de la homeostasis del cobre.
- **Manganoso:** El manganeso es un elemento esencial para el ser humano y otros animales. Tanto la carencia como la sobreexposición pueden causar efectos adversos. Se sabe que el manganeso produce efectos neurológicos tras la exposición por inhalación, especialmente de tipo laboral, y hay estudios epidemiológicos que han notificado efectos neurológicos aversos tras la exposición prolongada a concentraciones muy altas en el agua de consumo. Sin embargo, en esos estudios hay varios posibles factores de confusión significativos y en otros varios estudios no se han observado efectos adversos tras la exposición por el agua de consumo. Los datos de estudios en animales, especialmente los de roedores, no son convenientes para la evaluación de riesgos en las personas debido a que las necesidades orgánicas de manganeso varían entre las especies. Además, el valor de los roedores para la evaluación de efectos neuroconductuales es limitado, debido a que los efectos neurológicos observados en los primates (como los temblores o los trastornos de la marcha) a menudo van precedidos o acompañados de síntomas psíquicos (como irritabilidad o inestabilidad emocional) que no se observan en los roedores. La utilidad para una evaluación cuantitativa de riesgos del único estudio en primates es limitada, debido a que se estudió una sola dosis en un número reducido de animales y no se informó del contenido de manganeso en la alimentación de base.

- **Zinc:** Las necesidades diarias de un hombre adulto son de 15 a 20 mg/día. A la luz de estudios recientes realizados en personas, se consideró que no era necesario calcular un valor de referencia en ese momento. No obstante, el agua de consumo con concentraciones de cinc mayores de 3 mg/l puede resultar inaceptable para los consumidores.



## CAPÍTULO VII

### 7 MÉTODOS APLICADOS PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES INORGÁNICOS

#### 7.1 Tratamiento convencional

- Precipitación química

Es la técnica más utilizada en los procesos industriales ya que es relativamente sencilla de operar, económica y selectiva, aunque su mantenimiento si es costoso debido a la alta generación de lodos.

Igualmente se emplea la precipitación por sulfuros, aunque con solubilidades bajas y precipitados no anfóteros, por lo que puede lograr altos rendimientos; también se han empleado sustancias quelantes, aunque presentan desventajas considerables como la carencia de uniones necesarias y demasiados riesgos ambientales (Chen, et al; 2009).

- Coagulación – floculación

Es el método mediante el cual se logra desestabilizar el coloide y aglomerar posteriormente. En la primera etapa la coagulación elimina la doble capa eléctrica que caracteriza a los coloides y con la floculación se aglomeran los coloides mediante la atracción de partículas con el aglutinamiento de los floculantes. Los factores más importantes que se deben tener en cuenta para esta técnica son la dosis química apropiada, el efecto energético de la mezcla y el tiempo de la mezcla; los coagulantes químicos que se utilizan comúnmente en el tratamiento de aguas residuales incluyen alumbre ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ), sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (Ismail, et al; 2012).

- Filtración por Membrana

Esta tecnología presenta altas eficiencias, requiere poco espacio, no es selectiva y es de fácil operación, pero genera una gran cantidad de lodos que contienen metales. Se emplea en procesos para el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales y en menor medida aguas residuales domésticas. Las membranas pueden clasificarse de acuerdo a diferentes características como su peso molecular de corte, material de la membrana (sintéticos o polímeros naturales modificados, acoplados y estructurados), permeabilidad y solubilidad del soluto y el solvente en la película, superficie y espesor activo de la película, así como la carga de su superficie (Taylor & Wiesner, 2002). La separación por membrana se emplea comúnmente para tratar y recuperar sales metálicas de residuos generados en procesos galvanoplásticos, en el reciclaje de aceites, en la producción alimentos y bebidas y en la explotación y producción de hidrocarburos (Nemerow & Dasgupta, 1998; Ji, 2015).

## 7.2 Bioadsorción

Durante los años 1970 la concientización y la preocupación ambiental dirigió la búsqueda de nuevas técnicas capaces de ofrecer tratamiento de bajo costo de aguas residuales contaminadas con metales pesados. La búsqueda de nuevas tecnologías que permiten la eliminación de metales tóxicos de las aguas residuales ha dirigido la atención a la bioadsorción basada en las capacidades de unión de diversos materiales biológicos. Hasta la fecha, la investigación en el ámbito de la bioadsorción sugiere que una alternativa ideal para la descontaminación de aguas residuales con metales pesados y colorantes.

El proceso de bioadsorción implica una fase sólida (adsorbente; material biológico) y una fase líquida (disolvente) que contiene una especie de sólidos disueltos para ser adsorbidos (meta o colorantes). Debido a la mayor afinidad del adsorbente para la especie adsorbato, este último es atraído y obligado allí por diferentes mecanismos. El proceso continúa hasta que se establece el equilibrio entre la cantidad de especies de adsorbato sólido enlazados y su porción restante en la solución. El grado de afinidad adsorbente para el adsorbato determina su distribución entre las fases sólida y líquida.

Hay muchos tipos de adsorbentes, los bosques y las plantas de la tierra, el mar y de agua, algas, todos los seres vivos, incluidos los animales son todas biomassas adsorbentes.

El carácter renovable de la biomasa que crece, alimentado directamente o indirectamente por el sol, hace que sea una piscina inagotable de productos químicos de todo tipo.

La bioadsorción tiene ventajas en comparación con las técnicas convencionales (Volesky, 1999). Algunos de ellos se enumeran a continuación.

- **Económico:** El costo de los bioadsorbentes es bajo ya que a menudo se hacen de abundante material o residuos industriales.
- **Selectividad:** El rendimiento de adsorción del metal o colorantes por diferentes tipos de biomasa puede ser más menos selectiva; esto depende de varios factores tales como el tipo de biomasa, naturaleza del agua residual, sistemas multicomponentes de metales, el tipo de preparación de la biomasa y el tratamiento físico – químico.
- **Regenerativa:** Los bioadsorbentes son reutilizables, a su vez permite a recuperación de los metales adsorbidos con valor económico.
- **No hay generación de lodos:** No hay problemas secundarios con lodos, no se producen con bioadsorción, como es el caso con muchas otras técnicas, por ejemplo, a precipitación.

- **Es posible la recuperación de metales:** En el caso de los metales, que pueden ser recuperados después de haber sido adsorbido de la solución.
- **Desempeño competitivo:** La bioadsorción es capaz de ofrecer un rendimiento comparable a la técnica más similar como el tratamiento por intercambio catiónico de resinas sintéticas. El intercambio iónico es, como se menciona anteriormente, bastante costoso, por lo que el bajo costo de bioadsorción es un factor importante para la selección de tecnología.

Los bioadsorbentes destinados para aplicaciones ambientales de biorremediación son residuos de biomasa de los cultivos, algas, hongos, bacterias, etc., que son la forma natural y abundante. La bioadsorción por microorganismos tiene varias desventajas con respecto a las condiciones de trabajo, transporte y almacenamiento; por lo tanto, muchos adsorbentes de bajo costo (productos, subproductos industriales y desechos agrícolas) se utilizan cada vez más como bioadsorbentes. (Serapio Delgado Huallpa, 2013)



## CAPÍTULO VIII

### 8 SELECCIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO

#### 8.1 Muestra natural de un efluente minero “MINA SAN JOSÉ DE ORURO”

##### 8.1.1 Ubicación de la Mina San José

La mina San José está localizada en las cercanías de la ciudad de Oruro, esta mina data de los tiempos de la colonia, actualmente están administradas por COMIBOL y las Cooperativas Mineras.

La distancia del recorrido de las aguas acidas desde la bocamina hasta la salida del pantano es de aproximadamente 14 Km. con desnivel de 103 m. Otros parámetros técnicos, indican las variaciones de pH a lo largo del recorrido mostrados en el cuadro 10.

*Cuadro 10: Medición de las aguas acidas de la mina de San José*

Distancia Km	Altitud m	Temperatura °C	pH	Nota
0	3815	23.3	1.13	Bocamina
0.24	3812	21.9	1.23	
0.62	3760	19.4	1.19	Almacén COMIBOL
2.96	3727	15.3	1.63	Canal abierto
3.63	3716	10.9	2.01	Rio Tagarete
6.7	3716	11.5	2.26	Rio Tagarete
9.63	3715	15.6	3.18	Cerca alcantarillado
12.6	3714	12.6	4.6	Después de mezclarse con aguas residuales
14.84	3712	7.8	7.56	Salida pantano
15.65	3711	15.65	8.09	Entrega al lago Uru Uru

*Fuente: Programa de Gestión de Los Recursos Naturales de la Cuenca del Lago Poopó 2011*

Estas aguas son de una extrema acidez pH de 1,13 a 2. La carga de metales disueltos anual que es de: 761 Kg de Hierro; 22 Kg de Zinc; 14 Kg de Plomo; 13 Kg de Arsénico; 11 Kg de Cobre; 1 Kg de Cadmio; 0,3 Kg de Antimonio. (Gerardo Zamora Echenique, 2016)

Las aguas bombeadas de la Mina de San José al exterior llega aproximadamente a 770 m<sup>3</sup> por día y su impacto ambiental se traduce en la contaminación del curso de agua, lagos y aguas subterráneas, eliminando la flora y la fauna en los largos tramos fluviales y degradando la calidad del agua hasta niveles no seguros en los suelos y el lago Uru Uru se constituye en el receptor final (Figuras 12 y 13) (Plan de Desarrollo Municipal - Oruro, 2013 – 2018)

### 8.1.2 Ubicación geográfica



Figura 22: Ubicación Mina San José



Fuente: Google Earth

Fotografía 1: Bocamina Mina San José



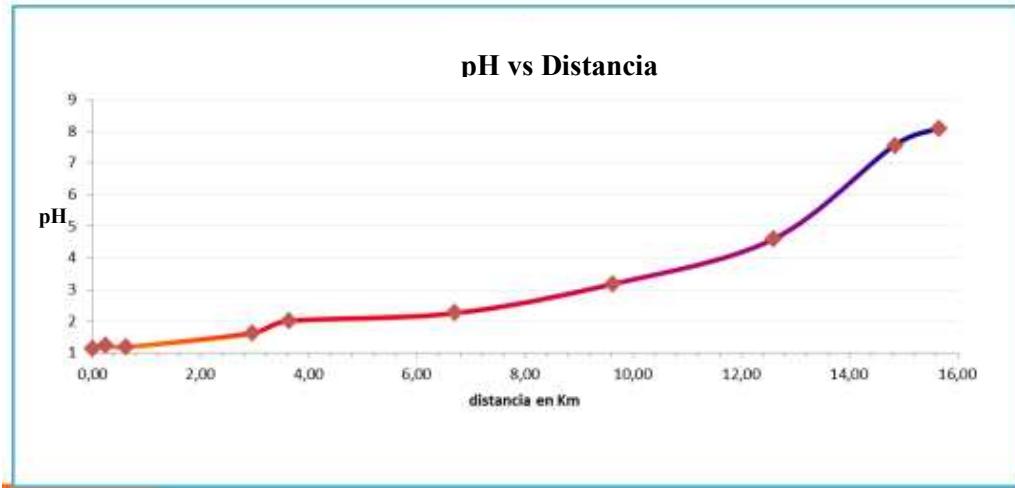
Fuente: Elaboración Propia

Figura 23: Recorrido de las Aguas acidas, Variación de PH a lo largo del recorrido

### RECORRIDO DE LAS AGUAS ACIDAS



### VARIACIÓN DEL PH



Fuente: Aguas acidas en Oruro, Programa de gestión sostenible de los Recursos Naturales de la cuenca del Lago Poopó.

#### 8.1.3 Ubicación del punto de muestreo

Las aguas ácidas son bombeadas del interior de la mina para luego desembocar por medio de un canal hacia el sector sur de la ciudad (Bocamina). (Fotografía 2).

*Fotografía 2: Bocamina Mina San José – Punto de Muestreo*



*Fuente: Elaboración propia*

## **8.2 Accesibilidad**

El punto de muestreo seleccionado fue de fácil acceso ya que se encuentra cerca de las vías vehiculares y peatonales que son necesarias, ya que permitió obtener las muestras y transportarlas fácilmente.

## **8.3 Preservación de muestras**

Las muestras en las cuales se va a analizar metales totales deben ser acidificadas a pH 2 inmediatamente después de tomada la muestra por adición de ácido nítrico de alta pureza para minimizar la adsorción de metales en la pared del envase. Normalmente un volumen de 1,5 ml de ácido nítrico concentrado ó 3 ml de ácido nítrico 1+ 1 por litro de muestra es suficiente para alcanzar el pH deseado. Después de la acidificación, la muestra debe mantenerse en refrigeración a 4 °C para prevenir la perdida de volumen por evaporación. Bajo estas condiciones las muestras que poseen algunos microgramos de metales pueden ser estables hasta 6 meses con excepción del mercurio que debe ser analizado en un plazo de 14 a 28 días. Las muestras con muy bajos niveles de metales deben analizarse inmediatamente después de colectadas. (CEPIS, 1995)

## **8.4 Volumen de muestra**

Se tomo una muestra de 100 ml de agua residual minera, en 5 envases de plástico de 20 litros como se muestra en la fotografía 2.

## CAPÍTULO IX

### 9 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO (BIOADSORCIÓN) DE IONES METÁLICOS EN AGUAS RESIDUALES

#### 9.1 Preparación del adsorbente

En el cuadro 11 se muestra el Material de origen orgánico, reactivos, Materiales y equipo de laboratorio que se utilizó para el estudio del adsorbente

*Cuadro 11: Materiales, Reactivos y Equipos*

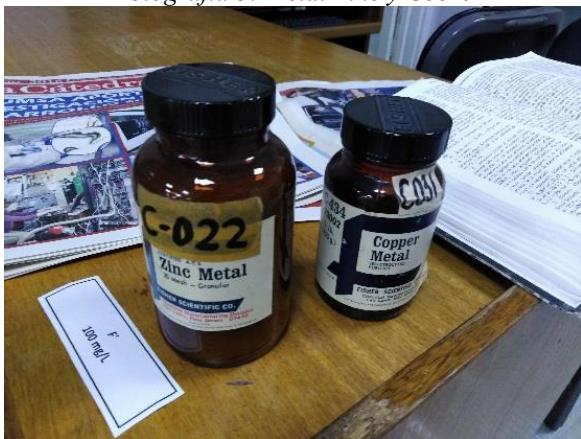
Material de origen orgánico
* Escama de pescado (Sábalo) * Escama de pescado (Pejerrey)
Reactivos
* Agua desionizada * Ácido Nítrico HNO <sub>3</sub> * Metal Manganese, Cobre, Zinc y Cadmio (Fotografía 3) * Hidróxido de Sodio Na (OH) 6N * Ácido Clorhídrico HCl
Materiales
* Matraces aforado de 1000, 100 y 10 ml * Vasos de precipitado de 1000 y 50 ml * Matraz Erlenmeyer de 200 ml * Pipeta aforada de 10 ml * Probeta de 100 ml * Embudos de vidrio * Espátula * Recipiente de vidrio * Papel filtro Nro. 41 (Fotografía 5)
Equipo de Laboratorio
* Espectrofotómetro de absorción atómica (Fotografía 4) * Equipo de Prueba de Jarras * Horno * Balanza analítica (Fotografía 6) * Moledor manual * Juego de Tamices de la serie Tyler * pH - Metro

*Fuente: Elaboración propia*

“REMOCIÓN DE METALES EN AGUA RESIDUAL MINERA POR MEDIO DE COAGULANTE NATURAL DE ESCAMA DE PESCADO”

---

*Fotografía 3: Metal Zinc y Cobre*



*Fuente: Elaboración propia*

*Fotografía 4: Espectrofotómetro de adsorción atómica*



*Fuente: Elaboración propia*

*Fotografía 5: Papel filtro Nro. 41*



*Fuente: Elaboración propia*

*Fotografía 6: Balanza Analítica*



*Fuente: Elaboración propia*

La preparación del adsorbente proveniente de las escamas de pescado se realizó según la secuencia del cuadro 12 y fotografías 7, 8 y 9.

*Cuadro 12: Preparación del adsorbente de Escama de Pescado*

<b>Extracción</b>
Se utilizó como adsorbentes escamas de pescado de dos tipos de especie sábalo y pejerrey. Para ello se realizó la extracción de escamas de ambas especies de pescado.
<b>Lavado</b>
Las escamas extraídas, se lavó con agua desionizada repitiendo el proceso tres veces.
<b>Secado</b>
Luego del lavado se llevó al horno para su secado a una temperatura de 60 °C por un tiempo de 72 horas.
<b>Molido</b>
Posteriormente se realizó el molido de la escama con moledor manual, teniendo en cuenta regularlo para diferentes tamaños.
<b>Tamizado</b>
Para separar los diferentes tamaños de molido del adsorbente, se realizó el tamizado por medio de mallas correspondientes a la serie Tyler.
<b>Almacenamiento</b>
Luego de realizar todo el proceso se almacenó el material tratado en envases libres de humedad, preparados para su aplicación.

*Fuente: Elaboración propia*

*Fotografía 7: Lavado del adsorbente (escamas de pescado) con agua desionizada*



*Fuente: Elaboración propia*

*Fotografía 8: Secado del adsorbente (escamas de pescado)*



*Fuente: Elaboración propia*

*Fotografía 9: Tamizado del adsorbente*



*Fuente: Elaboración propia*

## 9.2 Preparación de las muestras sintéticas

Se realizó la preparación de las soluciones sintéticas de los diferentes metales según lo indica el

Cuadro 13 y Fotografía 10, 11 y 12.

*Cuadro 13: Preparación de las soluciones sintéticas*

Manganese (Mn)
<ul style="list-style-type: none"><li>• Se peso 1 gr de Manganese (Mn)</li><li>• Posteriormente se preparó una solución (1 + 1) de 10 ml HNO<sub>3</sub> en 10 ml de agua desionizada, mismo que servirá para diluir el Manganese metálico en un vaso de precipitado.</li><li>• A continuación, se preparó una solución de HCl al 1% mezclando 10 ml de Ácido Clorhídrico en 1000 ml de agua desionizada. Con esta solución aforar hasta 1000 ml la solución obtenida en el anterior punto.</li><li>• Con dicha solución se obtuvo una concentración de 1000 mg/l de Manganese (Mn)</li></ul>
Cobre (Cu)
<ul style="list-style-type: none"><li>• Se peso 1 gr de Cobre (Cu)</li><li>• Posteriormente se preparó una solución (1 + 1) de 10 ml HNO<sub>3</sub> en 10 ml de agua desionizada, mismo que servirá para diluir el Cobre metálico en un vaso de precipitado.</li><li>• A continuación, se preparó una solución de HNO<sub>3</sub> al 1% mezclando 10 ml de Ácido Nítrico en 1000 ml de agua desionizada. Con esta solución aforar hasta 1000 ml la solución obtenida en el anterior punto.</li><li>• Con dicha solución se obtuvo una concentración de 1000 mg/l de Cobre (Cu)</li></ul>

Zinc (Zn)
<ul style="list-style-type: none"><li>• Se peso 0.5 gr de Zinc (Zn)</li><li>• Posteriormente se preparó una solución (1 + 1) de 10 ml HCl en 10 ml de agua desionizada, mismo que servirá para diluir el Zinc metálico en un vaso de precipitado.</li><li>• A continuación, se preparó una solución de HCl al 1% mezclando 10 ml de Ácido Clorhídrico en 1000 ml de agua desionizada. Con esta solución aforar hasta 1000 ml la solución obtenida en el anterior punto.</li><li>• Con dicha solución se obtuvo una concentración de 500 mg/l de Zinc (Zn)</li></ul>
Cadmio (Cd)
<ul style="list-style-type: none"><li>• Se peso 1 gr de Cadmio (Cd)</li><li>• Posteriormente se preparó una solución (1 + 1) de 10 ml HCl en 10 ml de agua desionizada, mismo que servirá para diluir el Cadmio metálico en un vaso de precipitado.</li><li>• A continuación, se preparó una solución de HCl al 1% mezclando 10 ml de Ácido Clorhídrico en 1000 ml de agua desionizada. Con esta solución aforar hasta 1000 ml la solución obtenida en el anterior punto.</li><li>• Con dicha solución se obtuvo una concentración de 1000 mg/l de Cadmio (Cd)</li></ul>

Fuente: *Manual Perkin Elmer*

Fotografía 10: 1 gr de Cobre y Solución al 1% de Ácido Nítrico



Fuente: *Elaboración propia*

Fotografía 11: Dilución de Cobre con (1+1) de Ácido Nítrico



Fuente: *Elaboración propia*

Fotografía 12: Almacenamiento de reactivos



Fuente: Elaboración propia

### 9.3 Proceso de adsorción de las escamas de pescado en muestras sintéticas

Para llevar a cabo el proceso de adsorción se preparó una solución de 1 L, inicialmente con una concentración de Manganese, Cobre, Zinc y Cadmio de 5 mg/l, para luego aumentar la concentración de metales a 10, 20 y 30 mg/l.

Posteriormente se agregó una cantidad conocida de adsorbente, el mismo se llevó al equipo de Prueba de Jarras, se realizó la mezcla rápida a una velocidad de 100 RPM y un tiempo determinado.

Pasando por la prueba de digestión por 2 horas, y su filtrado correspondiente se llevó a cabo la lectura en el equipo de adsorción atómica.

### 9.4 Proceso de adsorción mediante las escamas de pescado de una mezcla iónica de metales Cadmio (Cd), Manganese (Mn), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) en una muestra sintética mediante la Prueba de Jarras

#### 9.4.1 Efecto del tamaño de malla

Se realizó el análisis del tamaño de las Escamas de pescado mediante el modelo matemático de Langmuir, donde la mencionada ecuación no describe el mecanismo del proceso de adsorción ya que solamente proporciona información sobre la capacidad de retención del adsorbente y refleja el equilibrio del proceso de adsorción. El modelo es el siguiente:

$$q = q_{max} \frac{b \times C_{eq}}{1 + b \times C_{eq}}$$

Donde:

$q_{\max}$ : Capacitación máxima del sorbato bajo condiciones dadas; por ejemplo (mg/g)

b: Es un coeficiente relacionado a la afinidad entre el sorbente y el sorbato.

$C_{eq}$ : Concentración final en mg/l

La relación de Langmuir puede ser trazada linealmente graficando

$$(1/q) \text{ vs } (1/C_{eq}) \text{ o } C_{eq} \text{ vs } (C_{eq}/q)$$

El modelo de Langmuir se usa a menudo porque contiene dos parámetros ( $q_{\max}$  y b) y por ello es fácilmente entendible y porque ambos reflejan dos características importantes del sistema de sorción (Holan y Volesky, 1995).

La cantidad retenida por el sorbente se determina a través de la ecuación:

$$q \text{ [mg/g]} = \frac{V(l)(C_0 - C_{eq})[\text{mg/l}]}{m[\text{g}]}$$

Donde:

q: Representa la cantidad en mg, retenida por un gramo de sorbente.

V: Volumen de la solución que se ha tomado para realizar el proceso de biosorción (1 litro).

$C_0$ : Concentración inicial (mg/l)

$C_{eq}$ : Concentración final (mg/l)

m: Masa de sorbente (g)

## ESCAMAS DE SÁBALO

Para realizar dicha evaluación se estudió 3 rangos, clasificados por medio de tamices de la serie de Tyler, detallados en la Tabla 1 y con parámetros adoptados mostrados en la Tabla 2.

Tabla 1: Tamaño de Abertura Serie Tyler

Nro. de mallas	Tamaño de abertura
4	4.75 mm
8 - 12	2.36 mm – 1.70 mm
16 - 20	1.18 mm – 0.85mm

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2: Parámetros adoptados para el análisis

$C_0$ = Concentración inicial Cobre $C_0$ (mg/l)	5
TMR= Tiempo de mezcla rápida (min)	10
Dosis de escama (gr/lt)	5
VMR= Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100

Fuente: Elaboración propia

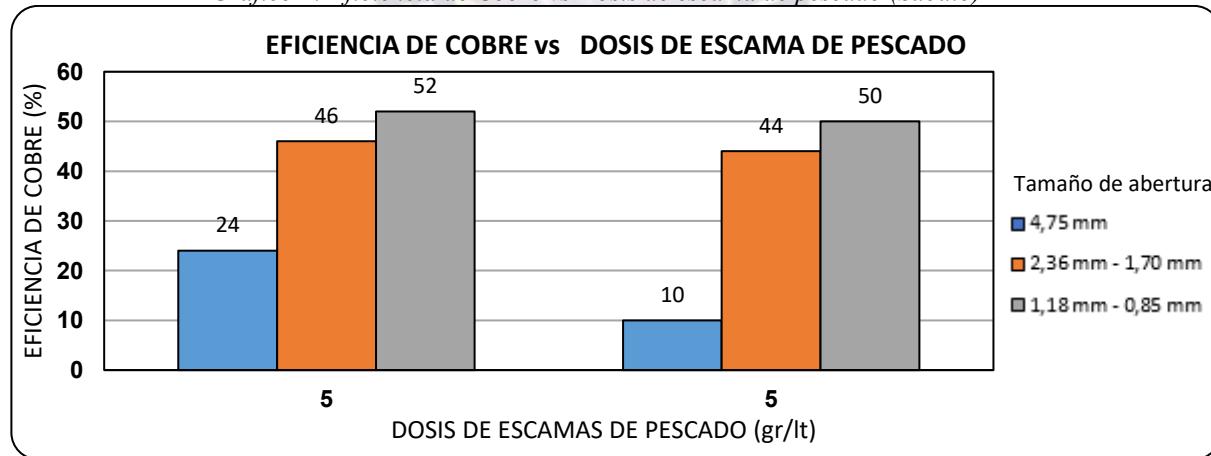
## Cobre

Tabla 3: Efecto de tamaño de malla para Cobre - Escama de Sábalo

$C_0$ Cobre (mg/l)	Tamaño de abertura 4.75 mm		Tamaño de abertura 2.36 - 1.70 mm		Tamaño de abertura 1.18 - 0,85 mm	
	Concentración final de Cobre (mg/l)	Eficiencia (%)	Concentración final de Cobre (mg/l)	Eficiencia (%)	Concentración final de Cobre (mg/l)	Eficiencia (%)
5	3,8	24	2,7	46	2,4	52
5	4,5	10	2,8	44	2,5	50

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 1: Eficiencia de Cobre vs Dosis de escama de pescado (Sábalo)



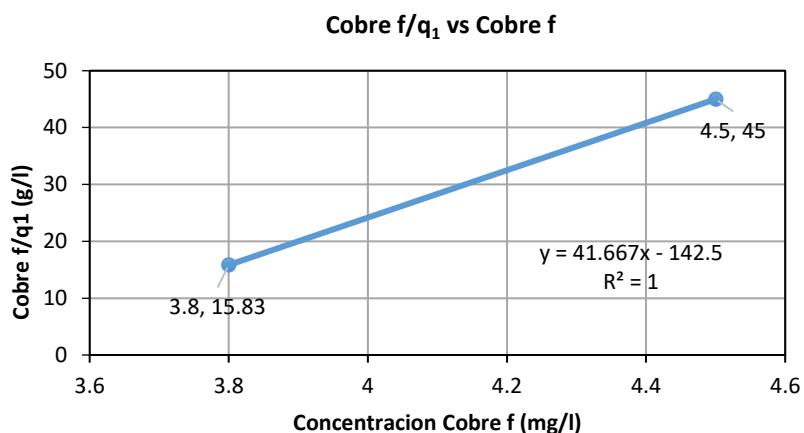
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Sábalo

Dosis de escama (gr/lt)	COBRE INICIAL (muestra sintética) mg/l	Caso 1		Caso 2		Caso 3		
		COBRE FINAL Tamaño de escama 4,75 mm (mg/l)	$q_1$ (mg/g)	COBRE FINAL 1/ $q_1$ (g/L)	COBRE FINAL Tamaño de escama 2,36 mm - 1,70 mm (mg/l)	$q_2$ (mg/g)	COBRE FINAL 1/ $q_2$ (g/L)	COBRE FINAL Tamaño de escama 1,18 mm -0,85 mm (mg/l)
5	5	3,8	0,24	15,83	2,7	0,46	5,87	2,4
5	5	4,5	0,1	45	2,8	0,44	6,36	2,5

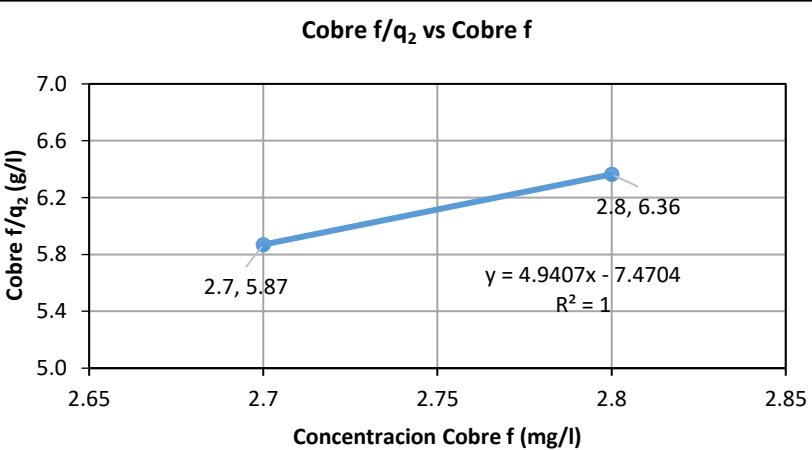
Fuente: Elaboración Propria

Gráfico 2: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (**CASO 1**)



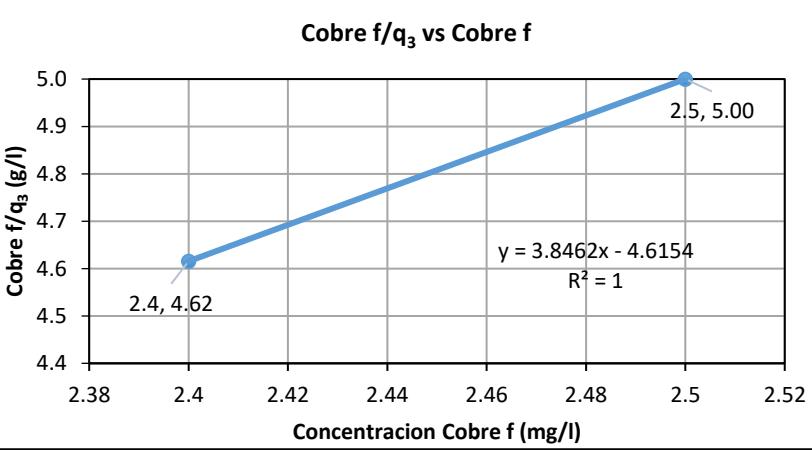
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 3: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (**CASO 2**)



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 4: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (**CASO 3**)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5: Proceso de linealización

LANGMUIR			
Ecuacion de Isoterma	Caso 1: Tamaño de escama de 4,75 mm (Malla 4) Cobre f/q1= 41.667 Cobre f - 142.5	Caso 2: Tamaño de escama de 2,36 mm - 1,70 mm (Malla 8 - 12) Cobre f/q2= 4.9407 Cobre f - 7.4704	Caso 3: Tamaño de escama de 1,18 mm - 850 um (Malla 16 -20) Cobre f/q3= 3.8462 Cobre f - 4.6154
R <sup>2</sup>	1	1	1
Pendiente (1/q <sub>max</sub> )	41,667	4,9407	3,8462
Intercepto (1/q <sub>max</sub> b)	-142,5	-7,4704	-4,6154
q <sub>max</sub>	0,024	0,202	0,260
b	-0,292	-0,661	-0,833

Fuente: Elaboración Propia

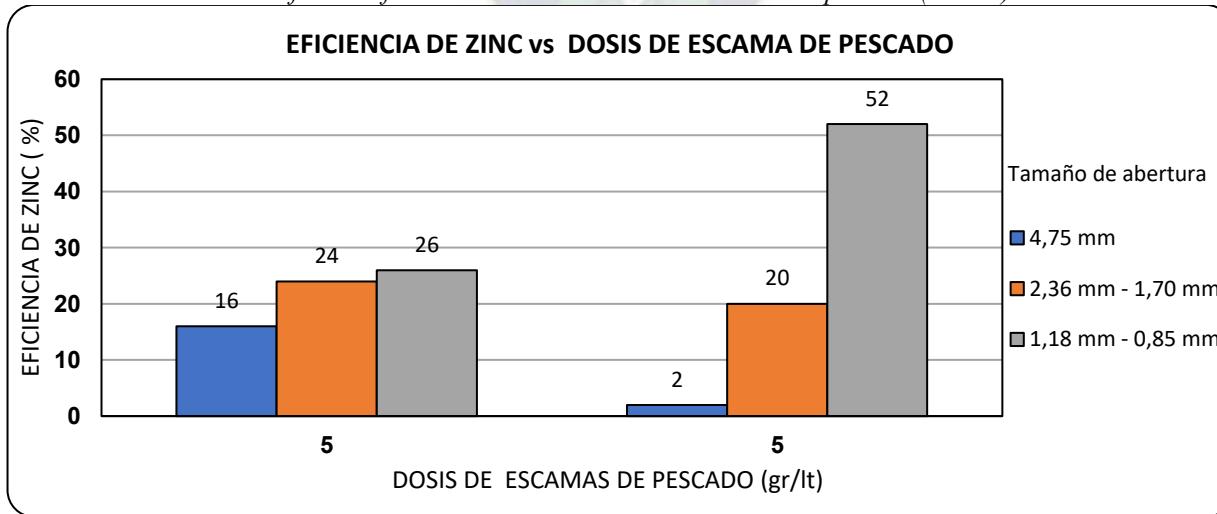
## Zinc

Tabla 6: Efecto de tamaño de malla para Zinc - Escamas de Sábalo

C <sub>0</sub> Zinc (mg/l)	Tamaño de abertura 4.75 mm		Tamaño de abertura 2.36 - 1.70 mm		Tamaño de abertura 1.18 - 0,85 mm	
	Concentración final de Zinc (mg/l)	Eficiencia (%)	Concentración final de Zinc (mg/l)	Eficiencia (%)	Concentración final de Zinc (mg/l)	Eficiencia (%)
5	4,2	16	3,8	24	3,7	26
5	4,9	2	4	20	2,4	52

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5: Eficiencia de Zinc vs Dosis de escamas de pescado (Sábalo)



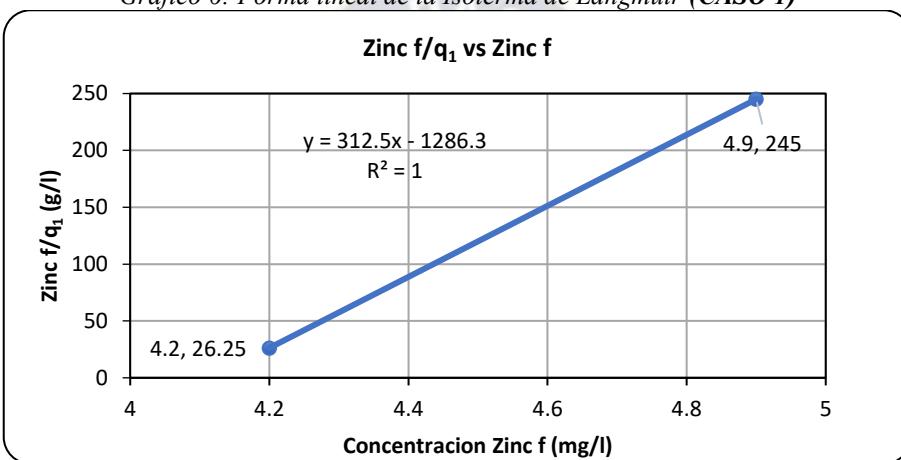
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Sábalo

Caso	Caso 1			Caso 2			Caso 3				
	Dosis de escamas (gr/lt)	ZINC INICIAL (muestra sintética) mg/l	ZINC FINAL Tamaño de escama 4,75 mm (mg/l)	q <sub>1</sub> (mg/g)	ZINC FINAL 1/q <sub>1</sub> (g/L)	ZINC FINAL Tamaño de escama 2,36 mm - 1,70 mm (mg/l)	q <sub>2</sub> (mg/g)	ZINC FINAL 1/q <sub>2</sub> (g/L)	ZINC FINAL Tamaño de escama 1,18 mm - 0.850 mm (mg/l)	q <sub>3</sub> (mg/g)	ZINC FINAL 1/q <sub>3</sub> (g/L)
1	5	5	4,2	0,16	26,25	3,8	0,24	15,83	3,7	0,26	14,23
2	5	5	4,9	0,02	245	4,0	0,2	20,00	2,4	0,52	4,62

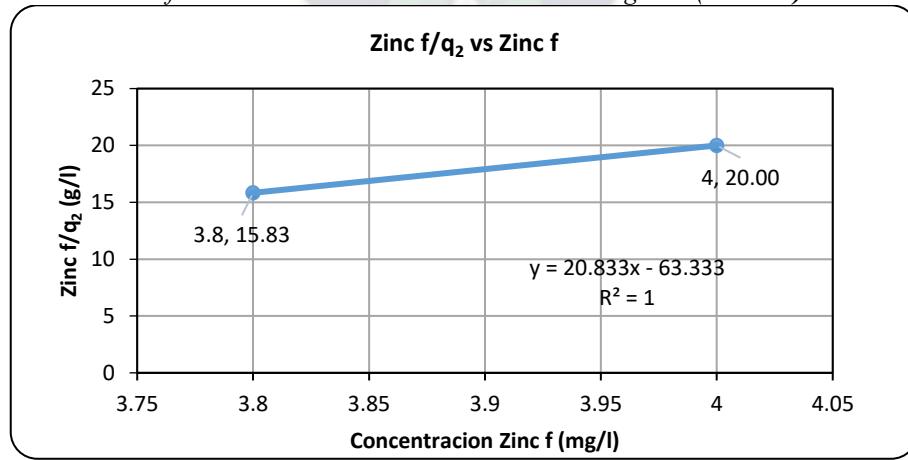
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 6: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 1)



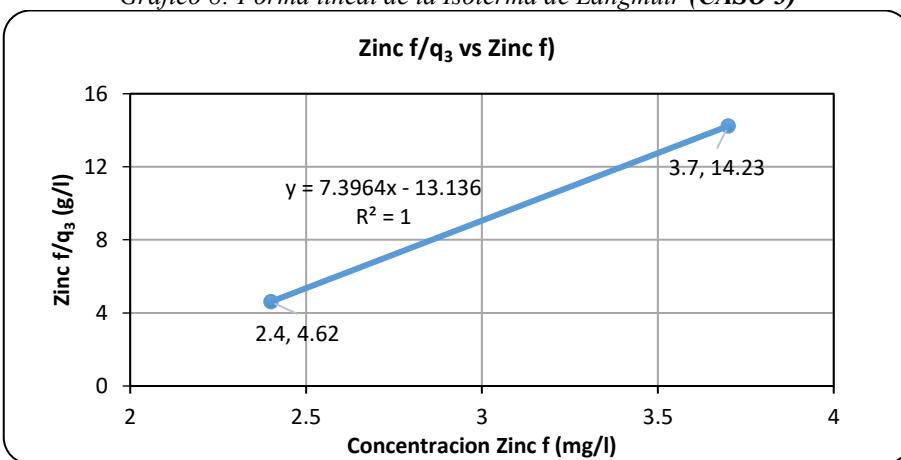
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 7: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 2)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 8: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (**CASO 3**)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Proceso de linealización

LANGMUIR			
Ecuación de Isoterma	Caso 1: Tamaño de escama de 4,75 mm (Malla 4) Zinc f/q <sub>1</sub> = 312.5 Zinc f - 1286.3	Caso 2: Tamaño de escama de 2,36 mm - 1,70 mm (Malla 8 - 12) Zinc f/q <sub>2</sub> = 20.833 Zinc f - 63.333	Caso 3: Tamaño de escama de 1,18 mm - 850 um (Malla 16 -20) Zinc f/q <sub>3</sub> = 7,3964 Zinc f - 13,136
R <sup>2</sup>	1	1	1
Pendiente (1/q <sub>max</sub> )	312,5	20,833	7,3964
Intercepto (1/q <sub>max</sub> b)	-1286,3	-63,333	-13,136
q <sub>max</sub>	0,003	0,048	<b>0,135</b>
b	-0,243	-0,329	-0,563

Fuente: Elaboración Propia

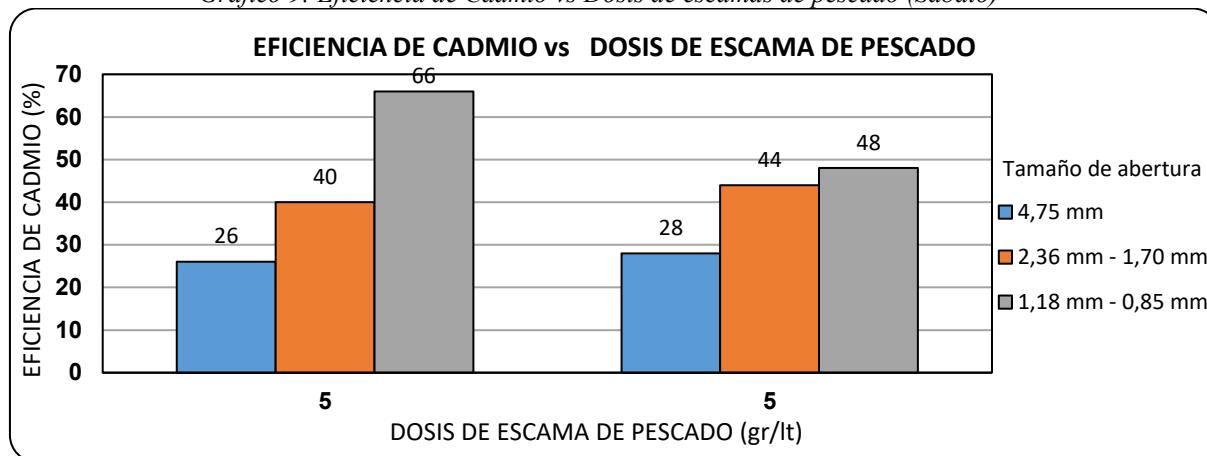
## Cadmio

Tabla 9: Efecto de tamaño de malla para Cadmio – Escamas de Sábalo

C <sub>0</sub> Cadmio (mg/l)	Tamaño de abertura 4.75 mm		Tamaño de abertura 2.36 - 1.70 mm		Tamaño de abertura 1.18 - 0,85 mm	
	Concentración final de Cadmio (mg/l)	Eficiencia (%)	Concentración final de Cadmio (mg/l)	Eficiencia (%)	Concentración final de Cadmio (mg/l)	Eficiencia (%)
5	3,7	26	3	40	<b>1,7</b>	<b>66</b>
5	3,6	28	2,8	44	<b>2,6</b>	<b>48</b>

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 9: Eficiencia de Cadmio vs Dosis de escamas de pescado (Sábalo)



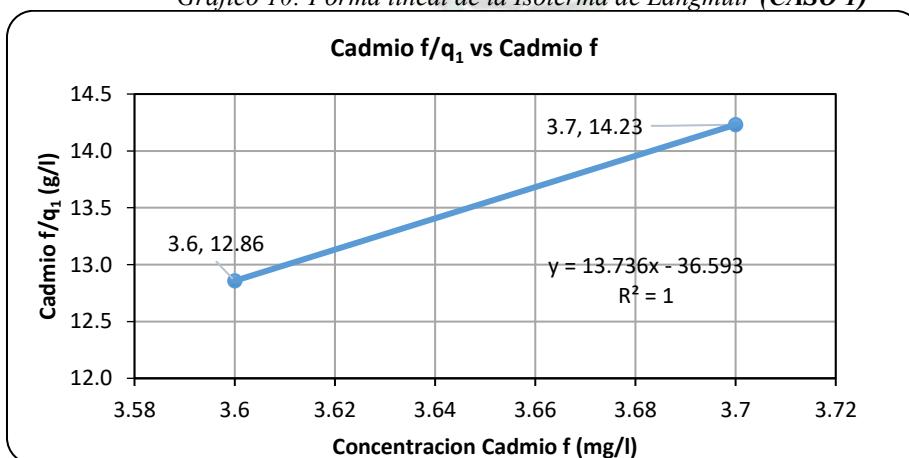
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Sábalo

		Caso 1			Caso 2			Caso 3		
Dosis de escamas (gr/lt)	CADMIO INICIAL (muestra sintética) mg/l	CADMIO FINAL Tamaño de escama 4,75 mm (mg/l)	$q_1$ (mg/g)	CADMIO FINAL $1/q_1$ (g/L)	CADMIO FINAL Tamaño de escama 2,36 mm - 1,70 mm (mg/l)	$q_2$ (mg/g)	CADMIO FINAL $1/q_2$ (g/L)	CADMIO FINAL Tamaño de escama 1,18 mm -0,850 mm (mg/l)	$q_3$ (mg/g)	CADMIO FINAL $1/q_3$ (g/L)
5	5	3,7	0,26	14,23	3,0	0,4	7,50	1,7	0,66	2,58
5	5	3,6	0,28	12,86	2,8	0,44	6,36	2,6	0,48	5,42

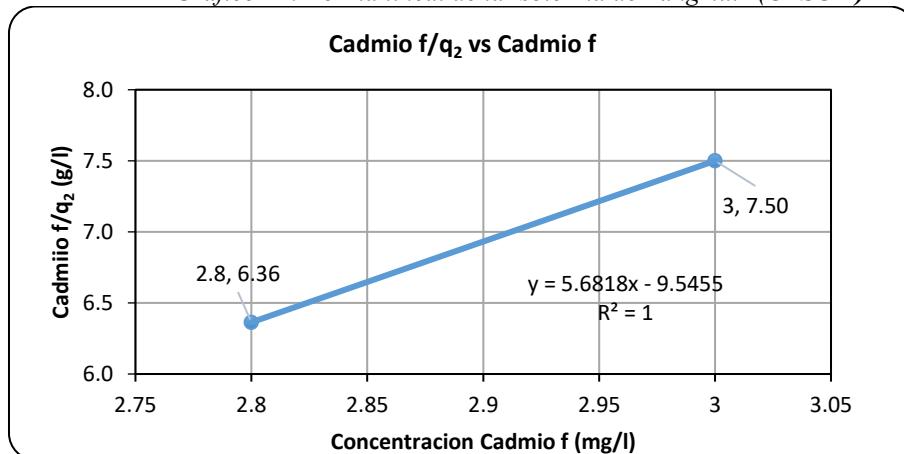
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 10: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 1)



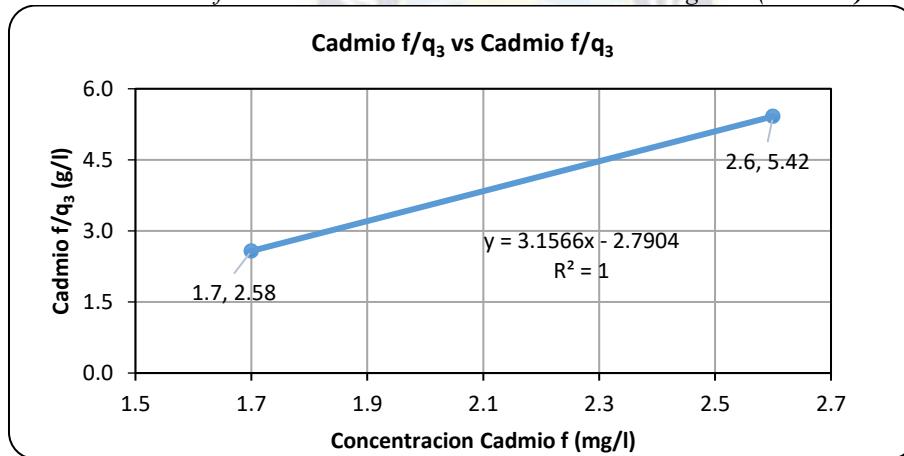
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 11: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 2)



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 12: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 3)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11: Proceso de linealización

LANGMUIR			
Ecuación de Isoterma	Caso 1: Tamaño de escama de 4,75 mm (Malla 4) Cd f/q₁=13.736 Cd f - 36.593	Caso 2: Tamaño de escama de 2,36 mm - 1,70 mm (Malla 8 - 12) Cd f/q₂=5.6818 Cd f - 9.5455	Caso 3: Tamaño de escama de 1,18 mm - 850 um (Malla 16 -20) Cd f/q₃=3.1566 Cd f - 2.7904
R²	1	1	1
Pendiente (1/q <sub>max</sub> )	13,736	5,6818	3,1566
Intercepto (1/q <sub>max</sub> b)	-36,593	-9,5455	-2,7904
q <sub>max</sub>	0,073	0,176	<b>0,317</b>
b	-0,375	-0,595	-1,131

Fuente: Elaboración Propia

Fotografía 13: Peso de adsorbente de escama de pescado (Sábalo)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 14: Prueba de Jarras para definir el tamaño de la malla (Sábalo)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 15: Proceso de Digestión por 2 horas (Sábalo)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 16: Proceso de Filtración para su posterior lectura



Fuente: Elaboración propia

Para el caso del estudio de las escamas de Sábalo se utilizó 3 tamaños como se muestra en la Tabla 1, se empleó la escama en la prueba de jarras con los parámetros adoptados mostrados en la Tabla 2.

En la Tabla 5, 8, 11 y grafico 2,3 y 4 para Cobre, 6,7,8 para Zinc y 10, 11, 12 para Cadmio muestra la forma lineal de la ecuación de Langmuir, siendo la máxima capacidad de adsorción de Cobre, Zinc y Cadmio ( $q_{\max}$ ) 0.260, 0.172 y 0.317 mg/g respectivamente por el Caso 3, donde el tamaño de la escama está en el rango de 1.18 mm – 0.850 mm correspondiente a la escama retenida en las mallas (16-20) y este tamaño es el que se adoptara para las posteriores pruebas debido a su mayor porcentaje de adsorción.

## ESCAMAS DE PEJERREY

Para realizar la evaluación del efecto del tamaño de malla se estudiaron 2 rangos, clasificados por medio de la serie de tamices de la serie de Tyler detallados en la Tabla 12 y con parámetros adoptados en la Tabla 13.

*Tabla 12: Tamaño de Abertura Serie Tyler*

Nro. de mallas	Tamaño de abertura
16 - 20	1.18 mm – 0.85 mm
30 - 40	0.6mm – 0.425 mm

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 13: Parámetros adoptados para el análisis*

$C_o$ = Concentración inicial Cobre $C_o$ (mg/l)	5
$T_{MR}$ = Tiempo de mezcla rápida (min)	20
Dosis de escama (gr/lt)	5
$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	60

*Fuente: Elaboración propia*

## Cobre

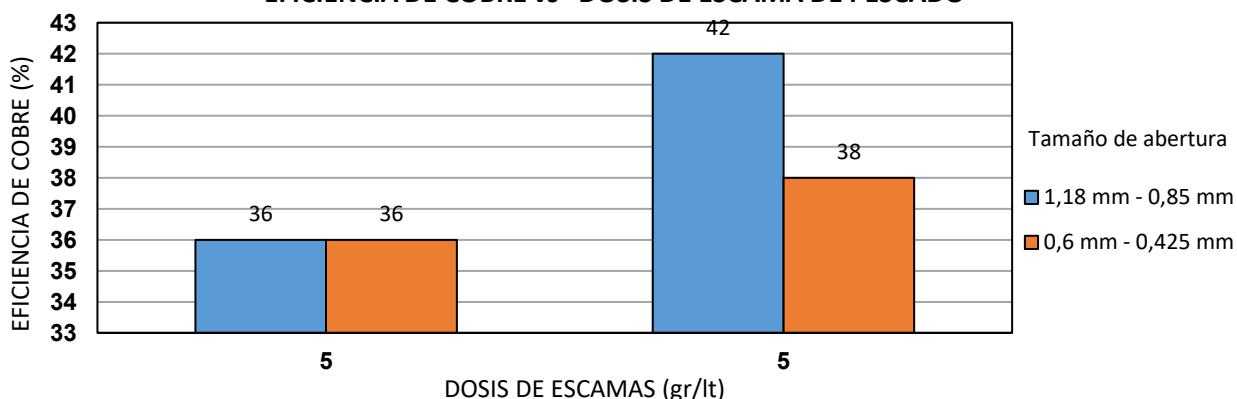
*Tabla 14: Efecto de tamaño de malla para Cobre – Escamas de Pejerrey*

$C_o$ Cobre (mg/l)	Tamaño de abertura = 1.18 - 0,850 mm		Tamaño de abertura = 0,6 - 0,425 mm	
	Concentración final de Cobre (mg/l)	Eficiencia (%)	Concentración final de Cobre (mg/l)	Eficiencia (%)
5	3,2	36	3,2	36
5	2,9	42	3,1	38

*Fuente: Elaboración propia*

*Gráfico 13: Eficiencia de Cobre vs Dosis de escamas de pescado (Pejerrey)*

### EFICIENCIA DE COBRE vs DOSIS DE ESCAMA DE PESCADO



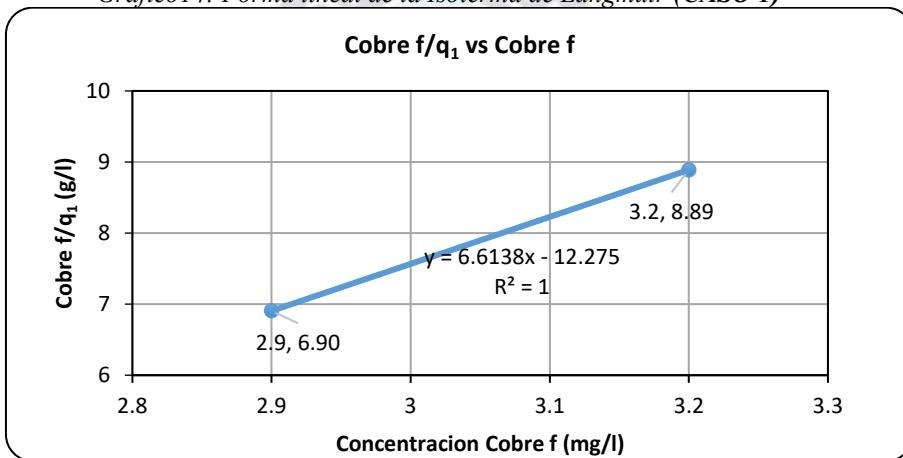
*Fuente: Elaboración Propia*

Tabla 15: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Pejerrey

Dosis de escamas (gr./lt)	COBRE INICIAL (muestra sintética) mg/l	Caso 1			Caso 2		
		Tamaño de escama 1,18 mm - 0,85 mm (mg/l)	q <sub>1</sub> (mg/g)	COBRE FINAL 1/q <sub>1</sub> (g/L)	Tamaño de escama 0,6 mm - 0,425 mm (mg/l)	q <sub>2</sub> (mg/g)	COBRE FINAL 1/q <sub>2</sub> (g/L)
5	5	3,2	0,36	8,89	3,2	0,36	8,89
5	5	2,9	0,42	6,90	3,1	0,38	8,16

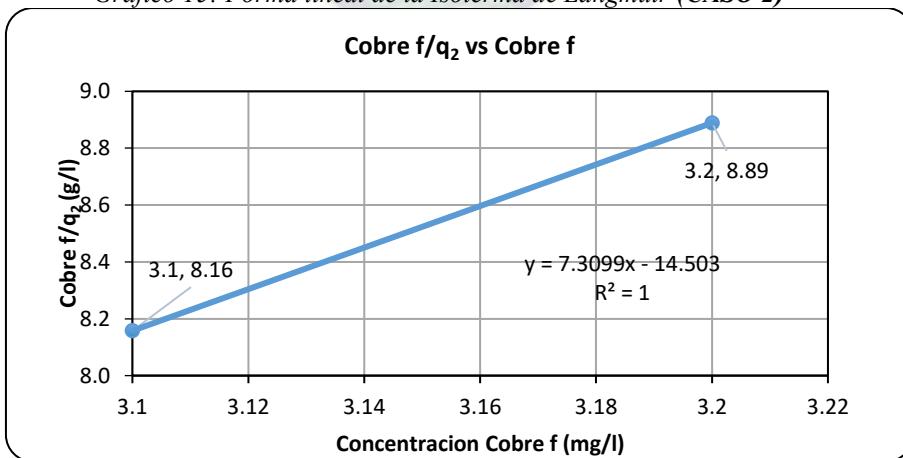
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 14: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 1)



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 15: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 2)



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 16: Proceso de linealización

LANGMUIR		
Ecuacion de Isoterma	Caso 1: Tamaño de escama de 1,18 mm - 0,85 mm (Malla 16 - 20) Cobre f/q1= 6.6138 Cobre f - 12.275	Caso 2: Tamaño de escama de 0,6 mm - 0,425 mm (Malla 30 - 40) Cobre f/q2= 7.3099 Cobre f - 14.503
R <sup>2</sup>	1	1
Pendiente (1/q <sub>max</sub> )	6,6138	7,3099
Intercepto (1/q <sub>max</sub> b)	-12,275	-14,503
q <sub>max</sub>	<b>0,151</b>	0,137
b	-0,539	-0,504

Fuente: Elaboración Propia

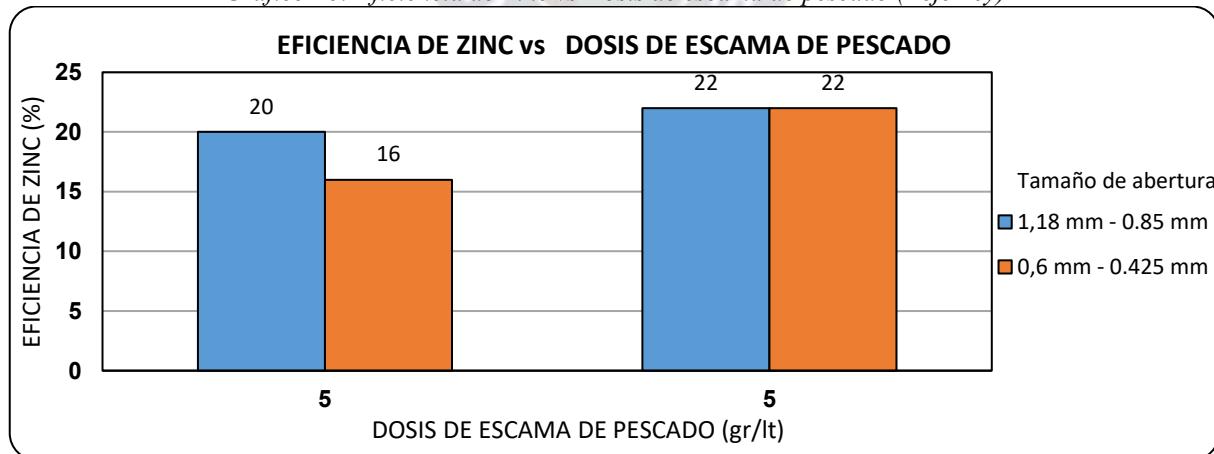
## Zinc

Tabla 17: Efecto de tamaño de malla para Zinc – Escama de Pejerrey

C <sub>0</sub> Zinc (mg/l)	Tamaño de abertura = 1.18 - 0,85 mm		Tamaño de abertura = 0,6 - 0,425 mm	
	Concentración final de Zinc (mg/l)	Eficiencia (%)	Concentración final de Zinc (mg/l)	Eficiencia (%)
5	<b>4</b>	<b>20</b>	4,2	16
5	<b>3,9</b>	<b>22</b>	3,9	22

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 16: Eficiencia de Zinc vs Dosis de escama de pescado (Pejerrey)



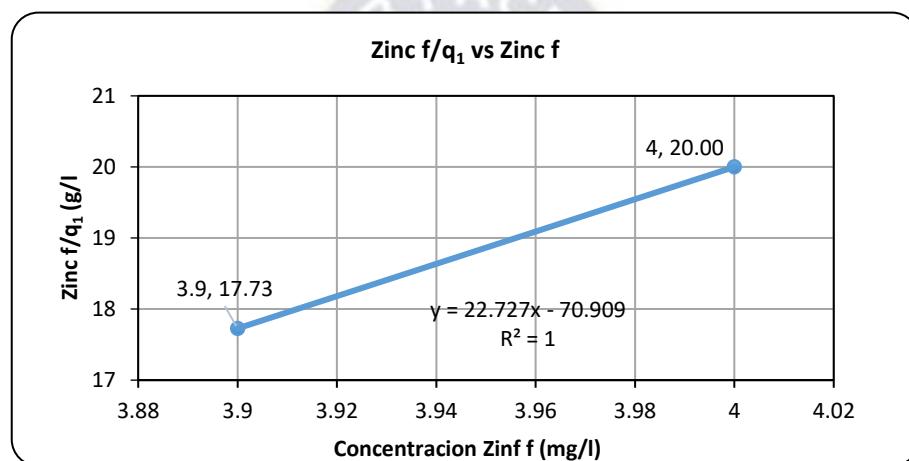
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Pejerrey

Dosis de escamas (gr/l)	ZINC INICIAL (muestra sintética) mg/l	Caso 1			Caso 2		
		ZINC FINAL Tamaño de escama 1,18 mm –0,850 mm	q <sub>1</sub> (mg/l)	ZINC FINAL 1/q <sub>1</sub> (g/L)	ZINC FINAL Tamaño de escama 0,6 mm –0,425 mm	q <sub>2</sub> (mg/l)	ZINC FINAL 1/q <sub>2</sub> (g/L)
5	5	4	0,2	20,00	4,2	0,16	26,25
5	5	3,9	0,22	17,73	3,9	0,22	17,73

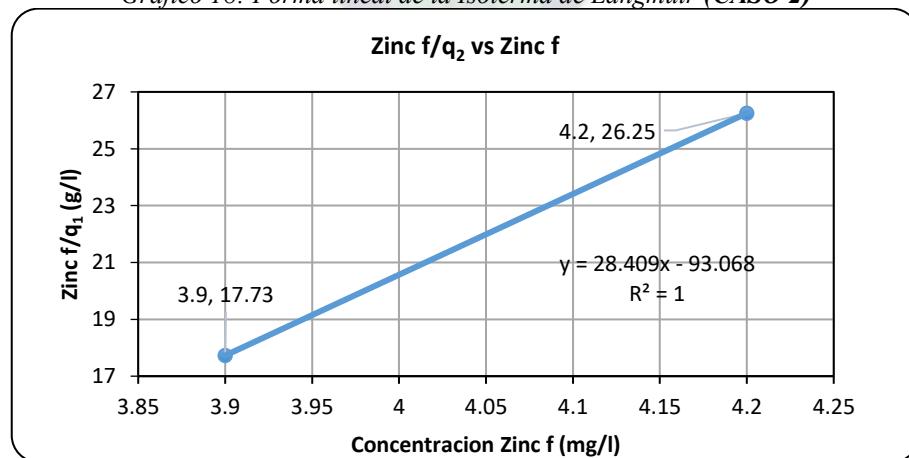
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 17: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 1)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 18: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 2)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 19: Proceso de linealización

LANGMUIR		
Ecuacion de Isoterma	Caso 1: Tamaño de escama de 1,18 mm - 850 um (Malla 16 -20) Zinc f/q1= 22.727 Zinc f - 70.909	Caso 2: Tamaño de escama de 600 um - 425 um (Malla 30 -40) Zinc f/q2= 28.409 Zinc f - 93.068
R <sup>2</sup>	1	1
Pendiente (1/q <sub>max</sub> )	22,727	28,409
Intercepto (1/q <sub>max</sub> b)	-70,909	-93,068
q <sub>max</sub>	<b>0,044</b>	0,035
b	-0,321	-0,305

Fuente: Elaboración Propia

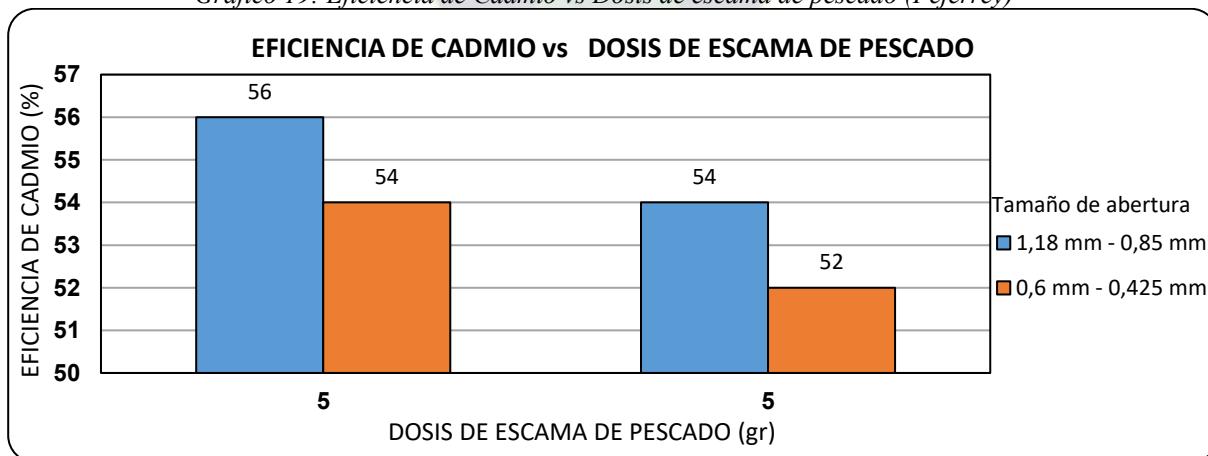
## Cadmio

Tabla 20: Efecto de tamaño de malla para Cadmio – Escama de Pejerrey

C <sub>0</sub> Cadmio (mg/l)	Tamaño de abertura = 1.18 - 0,85 mm		Tamaño de abertura = 0,6 - 0,425 mm	
	Concentración final de Cadmio (mg/l)	Eficiencia (%)	Concentración final de Cadmio (mg/l)	Eficiencia (%)
5	<b>2,2</b>	<b>56</b>	2,3	54
5	<b>2,3</b>	<b>54</b>	2,4	52

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 19: Eficiencia de Cadmio vs Dosis de escama de pescado (Pejerrey)



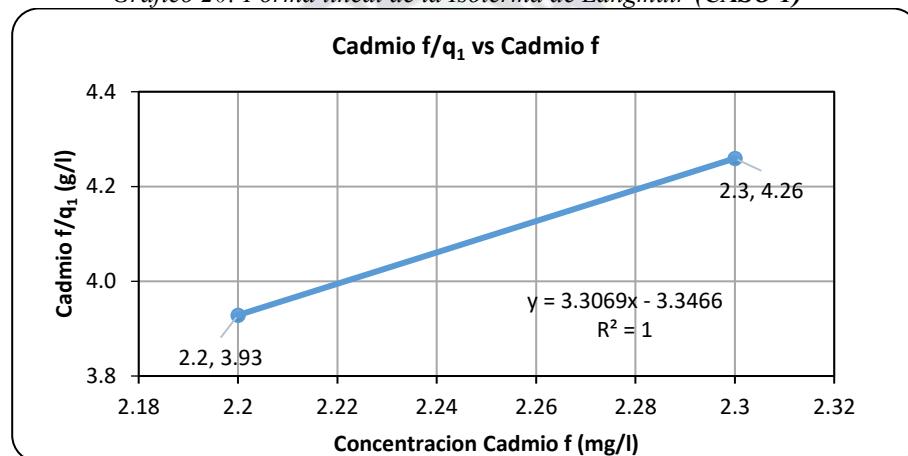
Fuente: Elaboración propia

Tabla 21: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Pejerrey

Dosis de escamas (gr/lit)	CADMIO INICIAL (muestra sintética) mg/l	Caso 1		Caso 2	
		CADMIO FINAL Tamaño de escama 1.18 mm – 0.85 mm (mg/l)	$q_1$ (mg/g)	CADMIO FINAL $1/q_1$ (g/L)	CADMIO FINAL Tamaño de escama 0.6mm – 0.425 mm (mg/l)
5	5	2,2	0,56	3,93	2,3
5	5	2,3	0,54	4,26	2,4

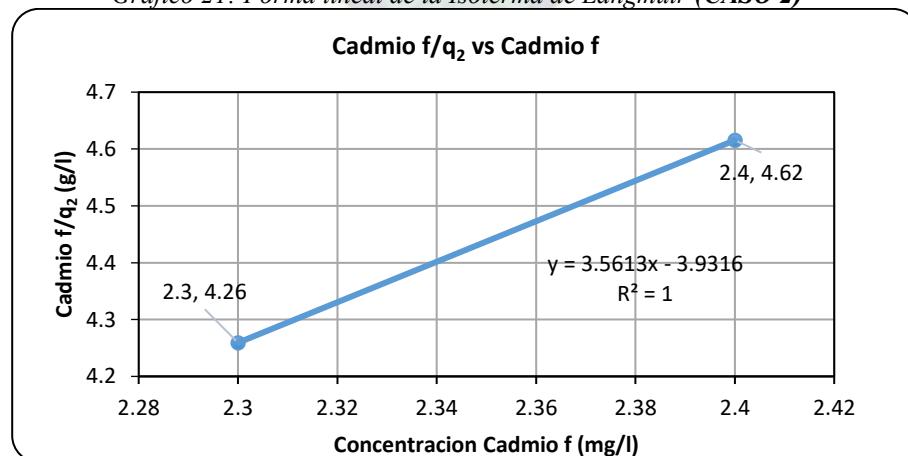
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 20: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 1)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 21: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 2)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 22: Proceso de linealización

LANGMUIR		
Ecuacion de Isoterma	Caso 1: Tamaño de escama de 1,18 mm - 850 um (Malla 16 -20) Cadmio f/q1= 3.3069 Cadmio f - 3.3466	Caso 2: Tamaño de escama de 600 um - 425 um (Malla 30 -40) Cadmio f/q2= 3.5613 Cadmio f - 3.9316
R <sup>2</sup>	1	1
Pendiente (1/q <sub>max</sub> )	3,3069	3,5613
Intercepto (1/q <sub>max</sub> b)	-3,3466	-3,9316
q <sub>max</sub>	<b>0,302</b>	0,281
b	-0,988	-0,906

Fuente: Elaboración propia

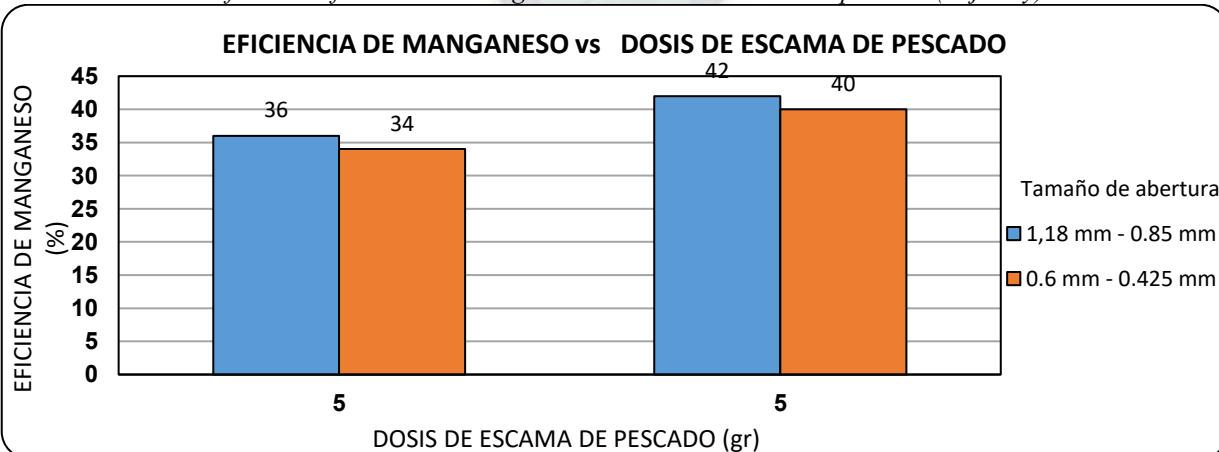
## Manganoso

Tabla 23: Efecto de tamaño de malla para Manganoso – Escamas de Pejerrey

C <sub>0</sub> Manganoso (mg/l)	Tamaño de abertura = 1.18 - 0,85 mm	Tamaño de abertura = 0,6 - 0,425 mm		
	Concentración final de Manganoso (mg/l)	Eficiencia (%)	Concentración final de Manganoso (mg/l)	Eficiencia (%)
5	<b>3,2</b>	<b>36</b>	3,3	34
5	<b>2,9</b>	<b>42</b>	3	40

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 22: Eficiencia de Manganoso vs Dosis de escama de pescado (Pejerrey)



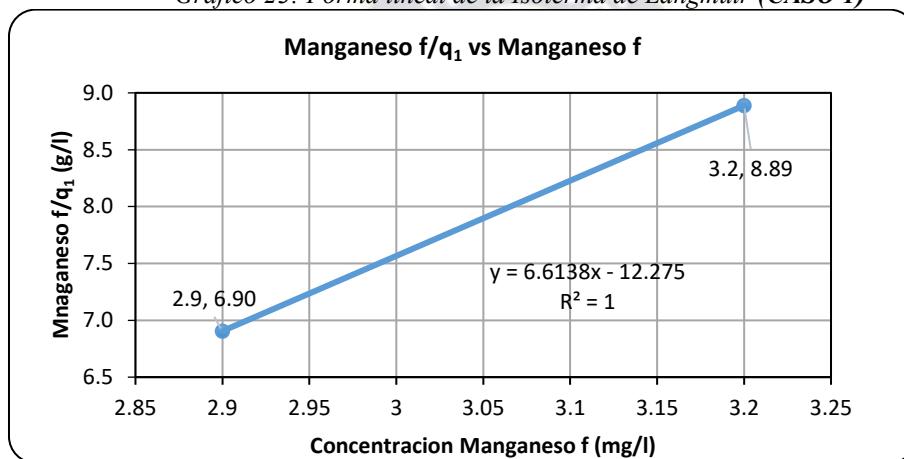
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24: Evaluación de la capacidad de Adsorción de las Escamas de Pejerrey

Dosis de escamas (gr/lt)	MANGANESO INICIAL (muestra sintética) mg/l	Caso 1			Caso 2		
		MANGANESO FINAL	Tamaño de escama 1,18 mm -0.85 mm (mg/l)	$q_1$ (mg/g)	MANGANESO FINAL 1/ $q_1$ (g/l)	MANGANESO FINAL	Tamaño de escama 0,6 mm - 0.425 mm (mg/l)
5	5	3,2	0,36	8,89	3,3	0,34	9,71
5	5	2,9	0,42	6,90	3	0,4	7,50

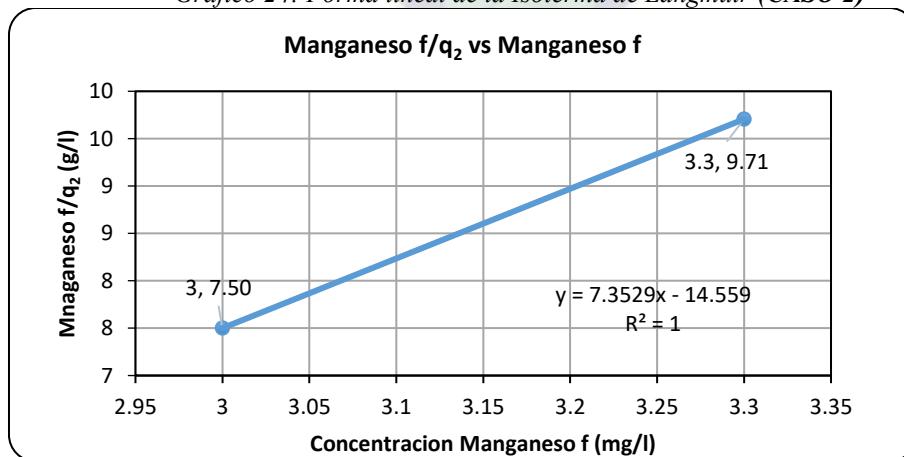
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 23: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 1)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 24: Forma lineal de la Isoterma de Langmuir (CASO 2)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 25: Proceso de linealización

LANGMUIR		
Ecuacion de Isoterma	Caso 1: Tamaño de escama de 1,18 mm - 850 um (Malla 16 -20) Manganoso f/q1= 6.6138 Manganoso f - 12.275	Caso 2: Tamaño de escama de 600 um - 425 um (Malla 30 -40) Manganoso f/q2= 7.3529 Manganoso f - 14.559
R <sup>2</sup>	1	1
Pendiente (1/q <sub>max</sub> )	6,6138	7,3529
Intercepto (1/q <sub>max</sub> b)	-12,275	-14,559
q <sub>max</sub>	<b>0,151</b>	0,136
b	-0,539	-0,505

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del estudio de la escama de Pejerrey se utilizó 2 tamaños como se muestra en la Tabla 12, se empleó la escama en la prueba de jarras con los parámetros adoptados mostrados en la Tabla 13.

En la Tabla 16, 19, 22 y 25 y grafico 14, 15 para Cobre, 17, 18 para Zinc, 20, 21 para Cadmio y 23, 24 para Manganoso muestra la forma lineal de la ecuación de Langmuir, siendo la máxima capacidad de adsorción de Cobre, Zinc, Cadmio y Manganoso (q<sub>max</sub>) 0.151, 0.044, 0.302 y 0.151 mg/g respectivamente por el Caso 1, donde el tamaño de la escama está en el rango de 1.18 mm – 0.850 mm correspondiente a la escama retenida en las mallas (16-20), por lo tanto, es el tamaño elegido para las posteriores pruebas.

#### 9.4.2 Dosis optima del adsorbente de escamas de pescado

Para implementar la prueba de jarras se llenaron vasos de precipitado de 1 litro, con una concentración de Cobre, Zinc y Cadmio de 5 mg/l. (Fotografía 17).

Se evaluó la capacidad de adsorción con diferentes dosis de escamas de pescado.

Tabla 26: Parámetros iniciales para el análisis

C <sub>0</sub> = Concentración inicial Cu, Zn, Cd Co(mg/l)	5
T <sub>MR</sub> = Tiempo de mezcla rápida (min)	10
V <sub>MR</sub> = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100
Tamaño óptimo de escamas (mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2,27

Fuente: Elaboración propia

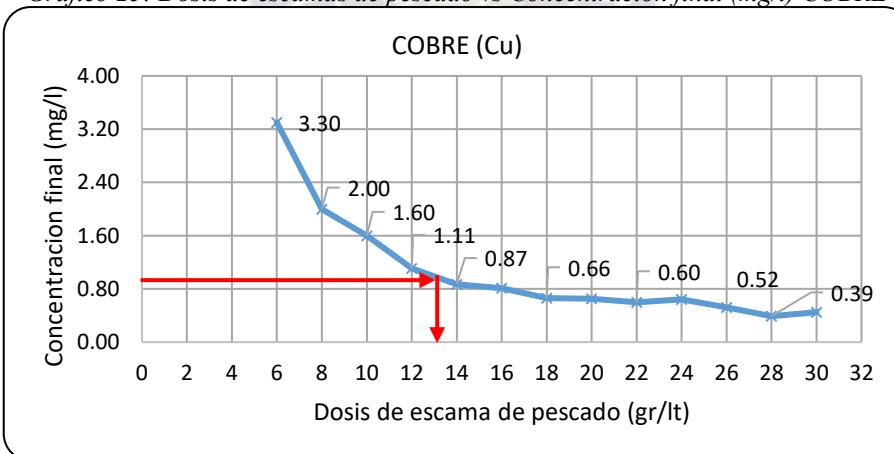
## ESCAMAS DE SÁBALO

Tabla 27: Dosis de escamas de pescado en función de la concentración para Cobre, Zinc y Cadmio

Dosis de escamas de pescado (gr/lt)	pH final	Cobre (Cu) mg/l	Remoción (%)	Zinc (Zn) mg/l	Remoción (%)	Cadmio (Cd) mg/l	Remoción (%)
6	3,87	3,30	34,00	5,00	0,00	3,20	36,00
8	4,41	2,00	60,00	4,10	18,00	2,50	50,00
10	4,63	1,60	68,00	3,40	32,00	2,10	58,00
12	4,97	1,11	77,80	3,90	22,00	1,50	70,00
14	5,09	0,87	82,60	3,40	32,00	1,00	80,00
16	5,23	0,81	83,80	2,60	48,00	1,00	80,00
18	5,56	0,66	86,80	0,90	82,00	0,61	87,80
20	5,58	0,65	87,00	0,82	83,60	0,57	88,60
22	5,65	0,60	88,00	0,67	86,60	0,46	90,80
24	5,73	0,64	87,20	0,62	87,60	0,44	91,20
26	5,77	0,52	89,60	0,53	89,40	0,39	92,20
<b>28</b>	<b>5,83</b>	<b>0,39</b>	<b>92,20</b>	<b>0,37</b>	<b>92,60</b>	<b>0,27</b>	<b>94,60</b>
30	5,85	0,45	91,00	0,40	92,00	0,31	93,80

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 25: Dosis de escamas de pescado vs Concentración final (mg/l) COBRE



Fuente: Elaboración propia

Dosis de escama de pescado: 13 gr/lt

Límite permisible: 1 mg/lit

Gráfico 26: Dosis de escamas de pescado vs Concentración final (mg/l) ZINC

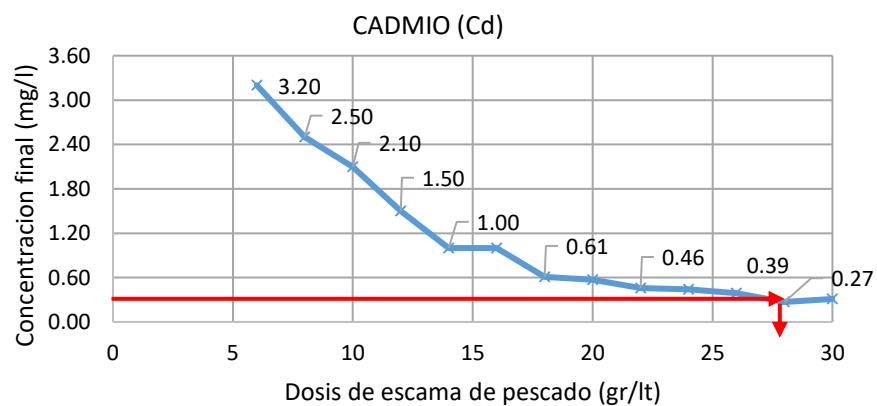


Fuente: Elaboración propia

Dosis de escama de pescado: 15 gr/lt

Límite permisible: 3 mg/lt

Gráfico 27: Dosis de escamas de pescado vs Concentración final (mg/l) CADMIO



Fuente: Elaboración propia

Dosis de escama de pescado: 28 gr/lt

Límite permisible: 0.3 mg/lt

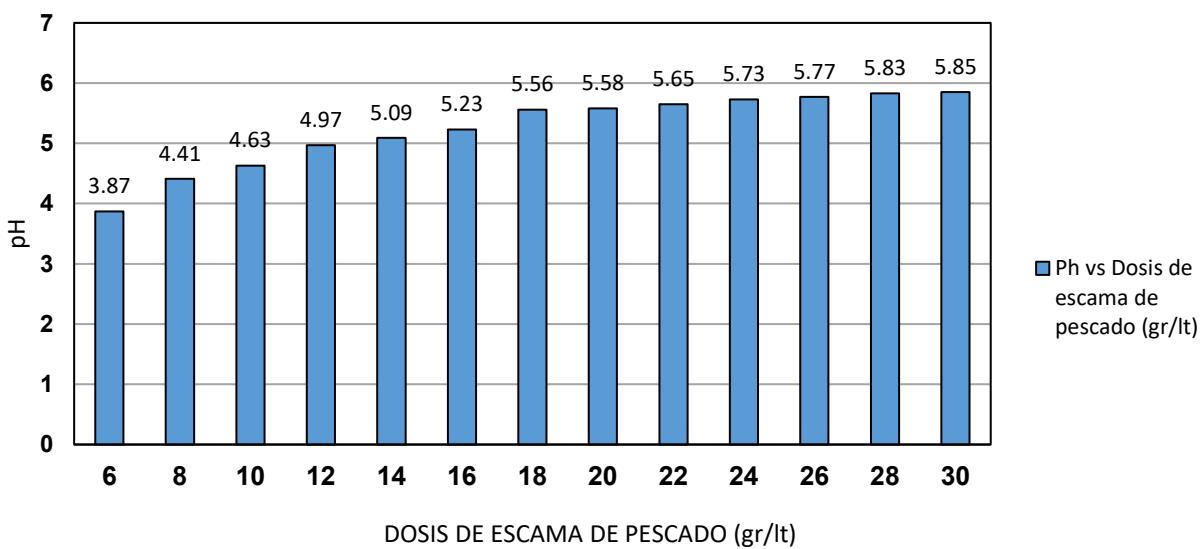
Fotografía 17: Prueba de Jarras para encontrar la dosis de adsorbente (Sábalo)



Fuente: Elaboración propia

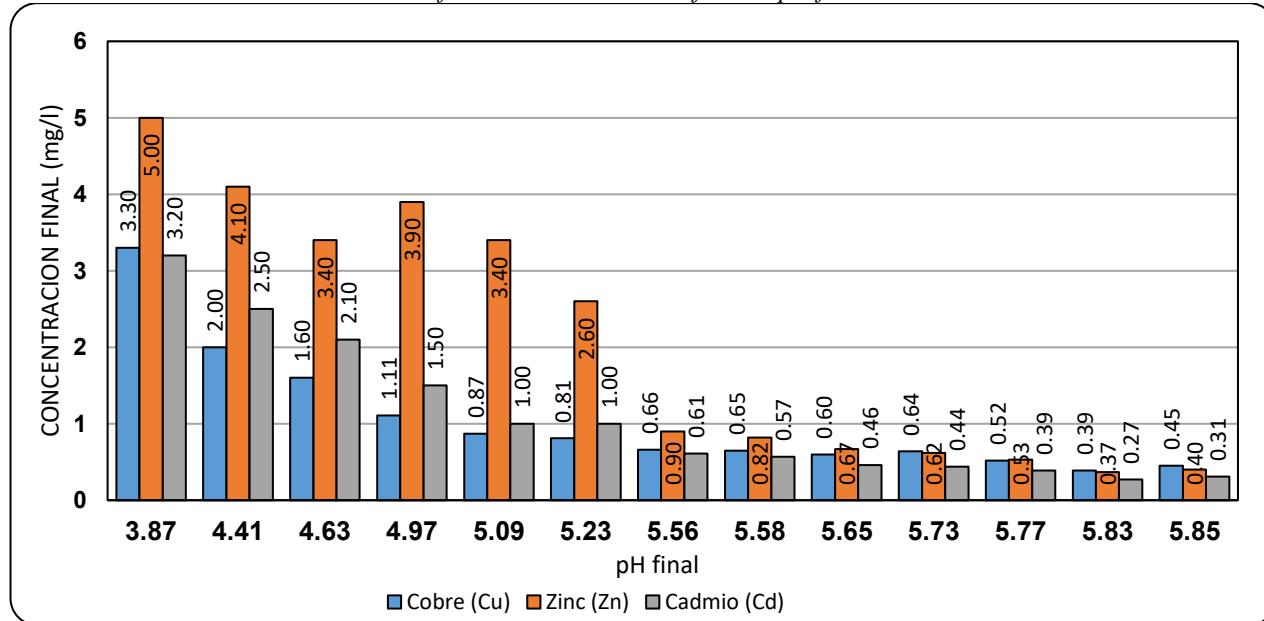
Gráfico 28: pH vs Dosis de escamas de pescado

pH vs DOSIS DE ESCAMA DE PESCADO (gr/lt)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 29: Concentración final vs pH final



Fuente: Elaboración propia

La dosis óptima que se necesitan de escama de pescado de Sábalo para llegar a los límites máximos admisibles por el Reglamento de descargas líquidas para la remoción del Cobre es de 13 gr/lt de escamas de pescado, para el Zinc 15 gr/lt de escamas y Cadmio 28 gr/lt, como se muestran en los Gráficos 25, 26 y 27 para Cobre, Zinc y Cadmio correspondientemente.

Por otro lado, se pudo observar que a medida que se aumenta la dosis de escama de pescado el pH asciende (Tabla 27 y Grafico 28). Al mismo tiempo cuanto mayor es el pH, mayor en la remoción de los metales pesados (Tabla 27 y Grafico 29).

#### 9.4.3 Determinación del Tiempo de sedimentación óptima

Con la dosis óptima de escama de pescado determinadas anteriormente se evaluó el tiempo de sedimentación óptima para 0 y 10 minutos, siguiendo el mismo procedimiento de Prueba de Jarras. Añadiendo 28 gr/lt de escamas a los vasos de precipitado de 1 litro, teniendo una concentración inicial de 5 mg/l.

## ESCAMA DE SÁBALO

Tabla 28: Parámetros adoptados para el análisis

$C_0$ = Concentración inicial Cu, Zn, Cd $C_0$ (mg/l)	5
$T_{MR}$ = Tiempo de mezcla rápida (min)	10
$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100
Tamaño óptimo de escamas (mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2,27
Dosis de escama de pescado (gr/lt)	28

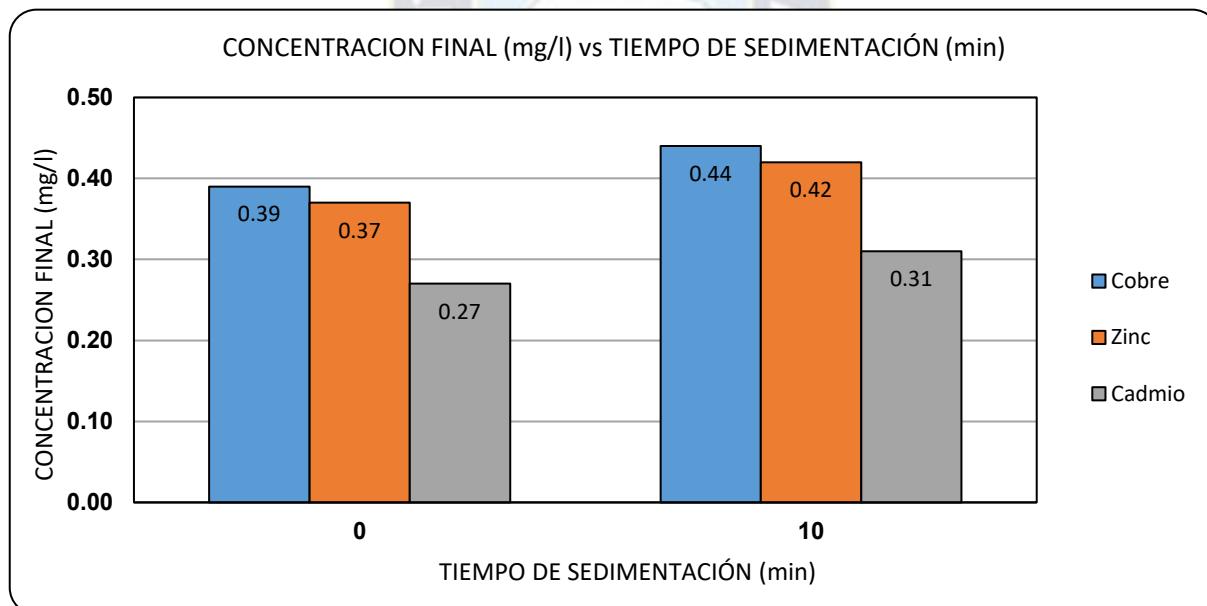
Fuente: Elaboración propia

Tabla 29: Tiempo de sedimentación óptima

Tiempo de sedimentación (min)	Concentración final		
	Cobre (Cu)	Zinc (Zn)	Cadmio (Cd)
0	0,39	0,37	0,27
10	0,44	0,42	0,31

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 30: Concentración final vs Tiempo de sedimentación



Fuente: Elaboración propia

Se pudo observar que se tiene una mayor remoción cuando tenemos un tiempo de sedimentación de 0 minutos, es decir tomar la muestra inmediatamente después del ensayo de Prueba de Jarras. (Tabla 29 y Grafico 30).

#### 9.4.4 Determinación del gradiente de velocidad óptima

Se continúo con la determinación de la velocidad óptima, para el análisis se tuvo en cuenta 2 velocidades de 60 y 100 RPM. Este estudio se realizó con la dosis óptima de cada metal.

*Tabla 30: Parámetros adoptados para el análisis*

$C_0$ = Concentración inicial Cu, Zn, Cd $C_0$ (mg/l)	5
T <sub>MR</sub> = Tiempo de mezcla rápida (min)	10
Tamaño óptimo de escamas (mm - mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2,27
Tiempo de sedimentación óptima (min)	0

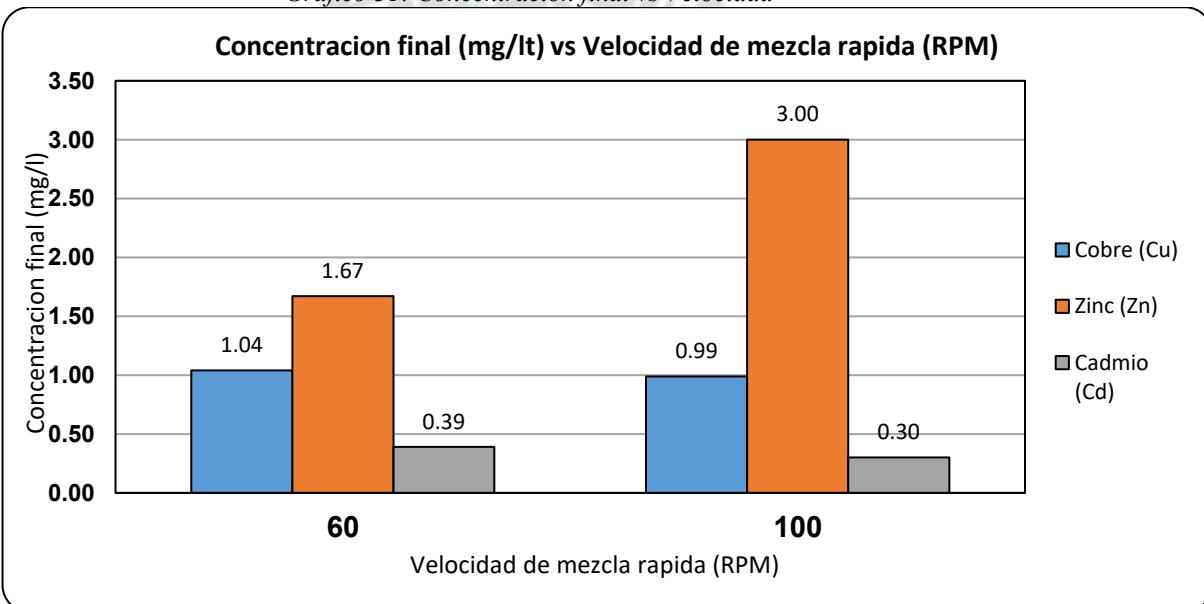
*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 31: Gradiente de velocidad óptima*

Velocidad (RPM)	Concentración final		
	Cobre (mg/l); Dosis optima de escama de pescado = 13 (gr/lt)	Zinc (mg/l); Dosis optima de escama de pescado = 15 (gr/lt)	Cadmio (mg/l); Dosis optima de escama de pescado = 28 (gr/lt)
60	1,04	1,67	0,39
100	0,99	3,00	0,30

*Fuente: Elaboración propia*

*Gráfico 31: Concentración final vs Velocidad*



*Fuente: Elaboración propia*

La velocidad óptima hallada fue de 60 RPM. (Tabla 31 y Grafico 31)

Como se puede ver con 60 RPM se tiene mayor remoción para Zinc, por el contrario, para Cobre y Cadmio es más eficiente 100 RPM, pero no tiene una diferencia considerable con la de 60 RPM. Por lo que por factores de energía se concluyó realizar con una velocidad de 60 RPM para las posteriores pruebas.

#### 9.4.5 Determinación del Tiempo óptimo de Mezcla rápida

Se analizó la influencia del tiempo de mezcla rápida durante el proceso de adsorción aplicando el adsorbente proveniente de la escama de pescado para un tiempo de 10 y 20 minutos. Este estudio se realizó con la dosis óptima de cada metal.

### ESCAMA DE SÁBALO

Tabla 32: Parámetros adoptados para el análisis

$C_0$ = Concentración inicial Cu, Zn, Cd $C_0$ (mg/l)	5
$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	60
Tamaño óptimo de escamas (mm - mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2,27
Tiempo de sedimentación óptima (min)	0

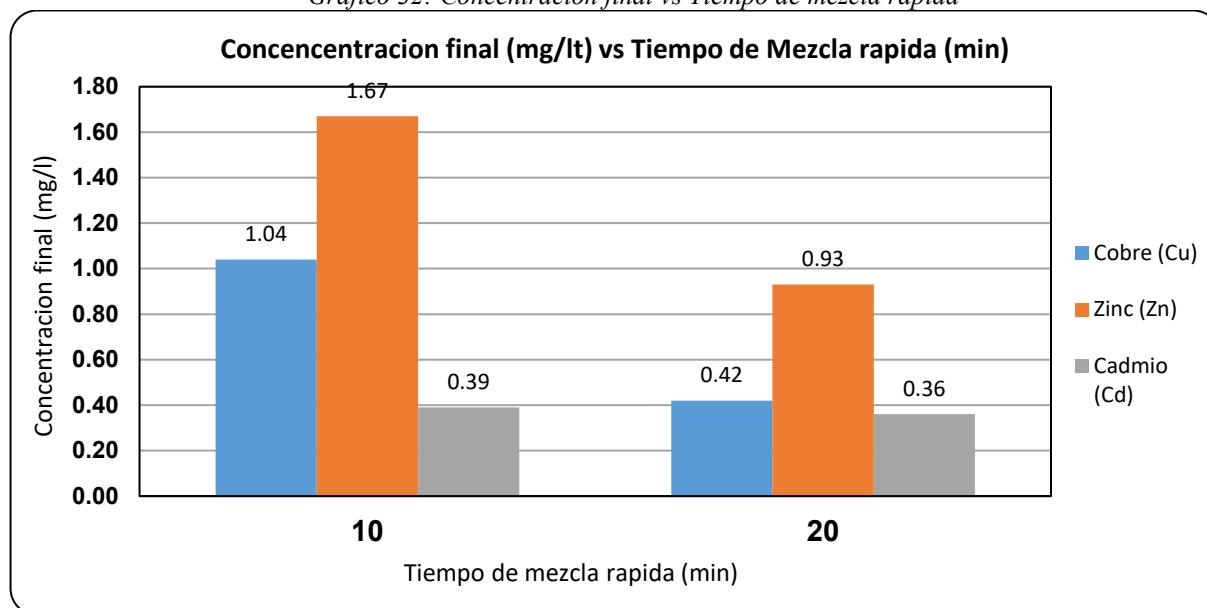
Fuente: Elaboración propia

Tabla 33: Tiempo óptimo de mezcla rápida

Tiempo de mezcla rápida (min)	Concentración final		
	Cobre (mg/l); Dosis óptima de escama de pescado = 13 (gr/l)	Zinc (mg/l); Dosis óptima de escama de pescado = 15 (gr/l)	Cadmio (mg/l); Dosis óptima de escama de pescado = 28 (gr/l)
10	1,04	1,67	0,39
20	0,42	0,93	0,36

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 32: Concentración final vs Tiempo de mezcla rápida



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 18: Prueba de Jarras con velocidad de 60 RPM; tiempo de 10 y 20 minutos de mezcla rápida (Sábalos)



Fuente: Elaboración propia

Como resultado se tuvo que el tiempo óptimo de mezcla rápida es 20 minutos, ya que con este tiempo tenemos mayores remociones para el mismo. (Tabla 33 y Grafico 32)

#### 9.4.6 Efecto de la concentración

### ESCAMAS DE SÁBALO Y PEJERREY

Para el efecto de la concentración se preparó muestras sintéticas con concentraciones iniciales de Manganese, Cobre, Zinc y Cadmio en las disoluciones, de 10 mg/l, 20 mg/l y 30 mg/l al cual se añadieron diferentes dosis de adsorbente de escamas de pescado.

*Tabla 34: Parámetros adoptados para el análisis*

V <sub>MR</sub> = Velocidad de mezcla rápida óptimo (RPM)	60
Tamaño óptimo de escamas (mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2,27
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0
T <sub>MR</sub> = Tiempo de mezcla rápida (min)	20

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 35: Efecto de la concentración - MANGANESO*

Dosis de escama (gr/l)	Concentración inicial de Manganese (Muestra sintética) mg/l	Sábalo		Pejerrey	
		Concentración final de Manganese mg/l	pH	Concentración final de Manganese mg/l	pH
30	10	0,54	5,8	3,3	5,42
40	20	2,1	5,38	8,5	4,95
50	30	3,3	5,2	11,8	4,85

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 36: Efecto de la concentración - COBRE*

Dosis de escama (gr/l)	Concentración inicial de Cobre (Muestra sintética) mg/l	Sábalo		Pejerrey	
		Concentración final de Cobre mg/l	pH	Concentración final de Cobre mg/l	pH
30	10	1,4	5,8	6	5,42
40	20	2,6	5,38	9,6	4,95
50	30	2,7	5,2	12,8	4,85

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 37: Efecto de la concentración - ZINC*

Dosis de escama (gr/l)	Concentración inicial de Zinc (Muestra sintética) mg/l	Sábalo		Pejerrey	
		Concentración final de Zinc mg/l	pH	Concentración final de Zinc mg/l	pH
30	10	5,6	5,8	1,4	5,42
40	20	3,5	5,38	3,6	4,95
50	30	3,2	5,2	3,9	4,85

*Fuente: Elaboración propia*

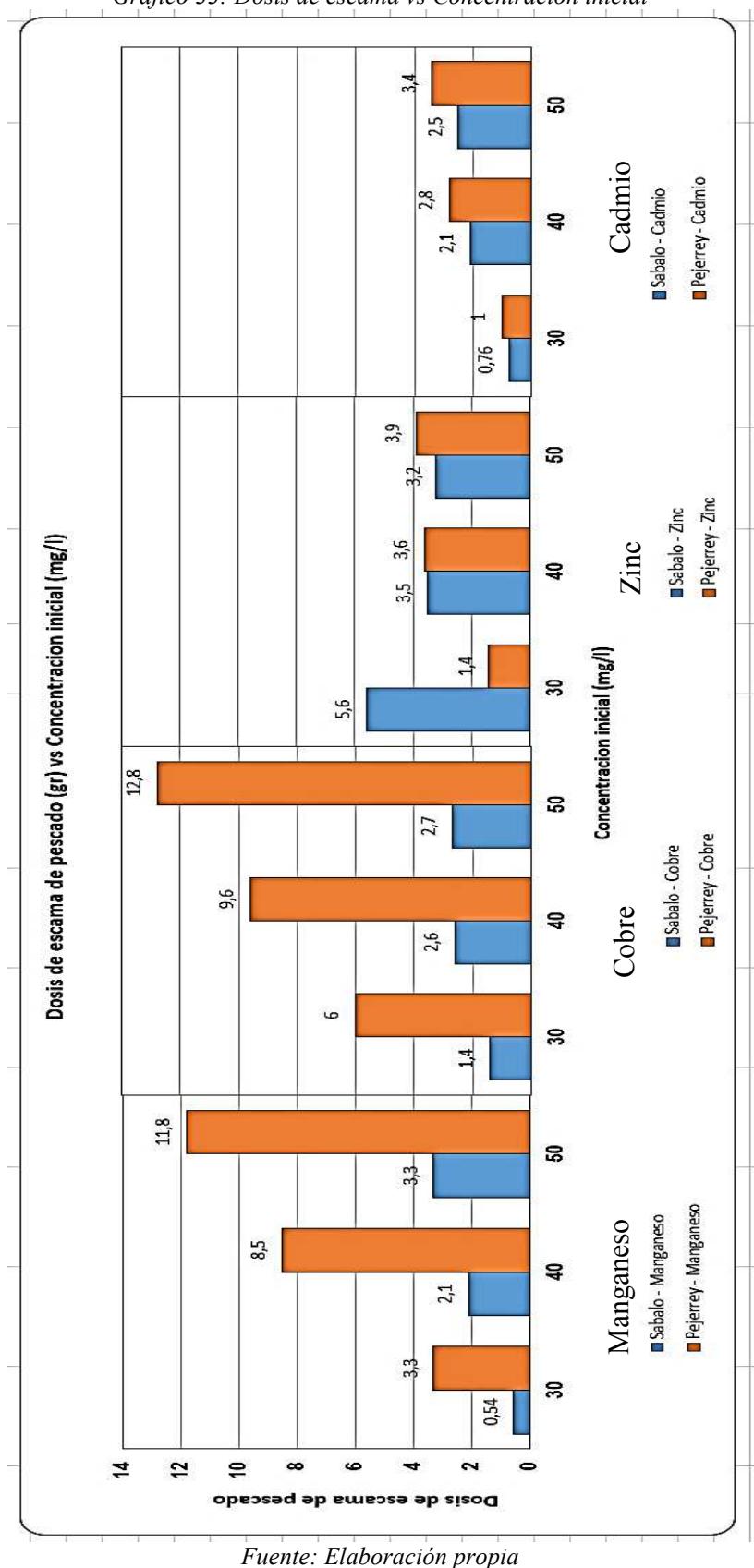
Tabla 38: Efecto de la concentración - CADMIO

Dosis de escama (gr/lt)	Concentración inicial de Cadmio (Muestra sintética) mg/l	Sábalo		Pejerrey	
		Concentración final de Cadmio mg/l	pH	Concentración final de Cadmio mg/l	pH
30	10	0,76	5,8	1	5,42
40	20	2,1	5,38	2,8	4,95
50	30	2,5	5,2	3,4	4,85

Fuente: Elaboración propia

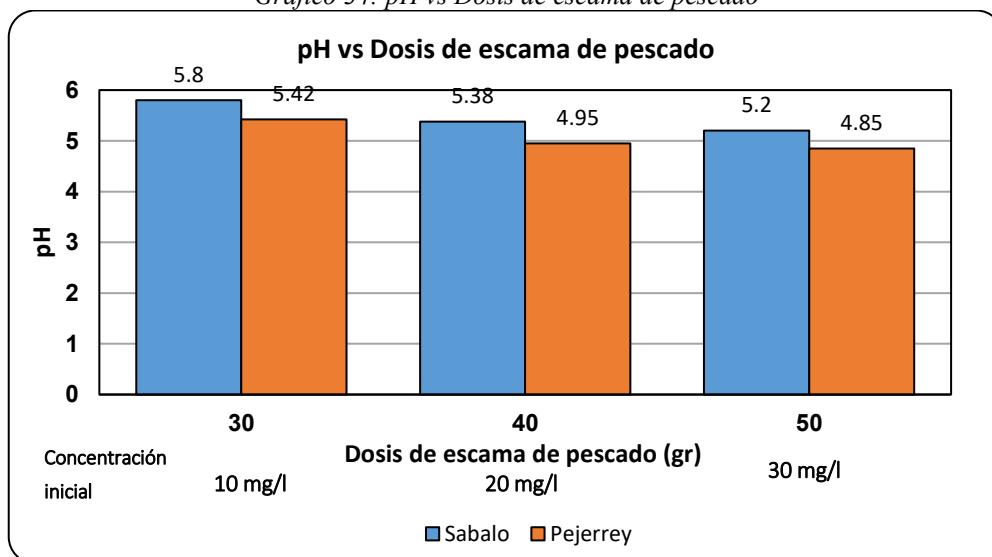


Gráfico 33: Dosis de escama vs Concentración inicial (mg/l)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 34: pH vs Dosis de escama de pescado



Fuente: Elaboración propia

El objetivo de este análisis fue para saber si el adsorbente estudiado (escamas de pescado) tiene efecto cuando se tiene altas concentraciones. Como resultado se obtuvo que el adsorbente si funciona para altas concentraciones, siempre y cuando se aumente la dosis de escama de pescado. (Tabla 35, 36, 37 y 38; Grafico 33). Teniendo mayor efecto la escama de sábalo, excepto para el Zinc que se observó que es el Pejerrey el mejor adsorbente.

En cuanto al pH se vio que a mayor concentración el pH es menor. (Grafico 34)

Fotografía 19. Prueba de Jarras para evaluar el efecto de la concentración (Sábalo)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 20: Prueba de Jarras para evaluar el efecto de la concentración (Pejerrey)



Fuente: Elaboración propia

## 9.5 Proceso de adsorción mediante las escamas de pescado de una mezcla iónica de metales Cadmio (Cd), Manganeso (Mn), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) en el efluente de la Mina San José mediante la Prueba de Jarras

### 9.5.1 Dosis óptima del adsorbente de escamas de pescado

En los vasos de precipitado de 1 litro se puso el efluente minero de la Mina, añadiendo en cada una diferentes dosis de escama de pescado (Tabla 41), con los parámetros descritos en la Tabla 39 se realizó la Prueba de Jarras.

## ESCAMAS DE SÁBALO

Tabla 39: Parámetros adoptados para el análisis

Tamaño óptimo de escamas (mm)	1,18 - 0,85
T <sub>MR</sub> = Tiempo de mezcla rápida óptima (min)	20
V <sub>MR</sub> = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100
pH inicial	1,28
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40: Concentración inicial de metales pesados de la Mina San José

	Concentración inicial (mg/l)
Manganeso (Mn)	20,9
Cobre (Cu)	61
Zinc (Zn)	156
Cadmio (Cd)	4,6

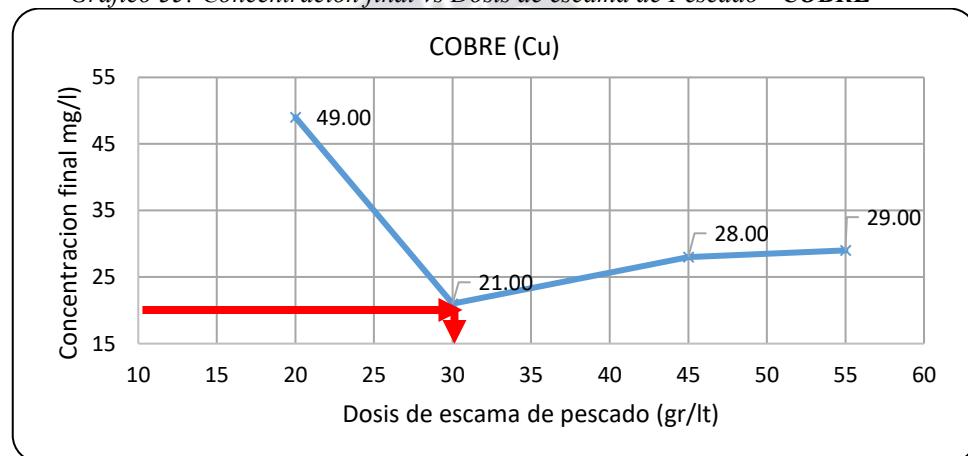
Fuente: Elaboración propia

Tabla 41: Dosis óptima del adsorbente de escamas de pescado

Dosis (gr/lt)	pH final	Mn	Remoción (%)	Cu	Remoción (%)	Zn	Remoción (%)	Cd	Remoción (%)
20	2,07	20,00	4,31	49,00	19,67	149,00	4,49	4,60	0,00
<b>30</b>	<b>2,22</b>	<b>15,00</b>	<b>28,23</b>	<b>21,00</b>	<b>65,57</b>	<b>106,00</b>	<b>32,05</b>	<b>4,60</b>	<b>0,00</b>
45	2,53	20,00	4,31	28,00	54,10	122,00	21,79	4,60	0,00
55	2,76	20,00	4,31	29,00	52,46	129,00	17,31	4,60	0,00

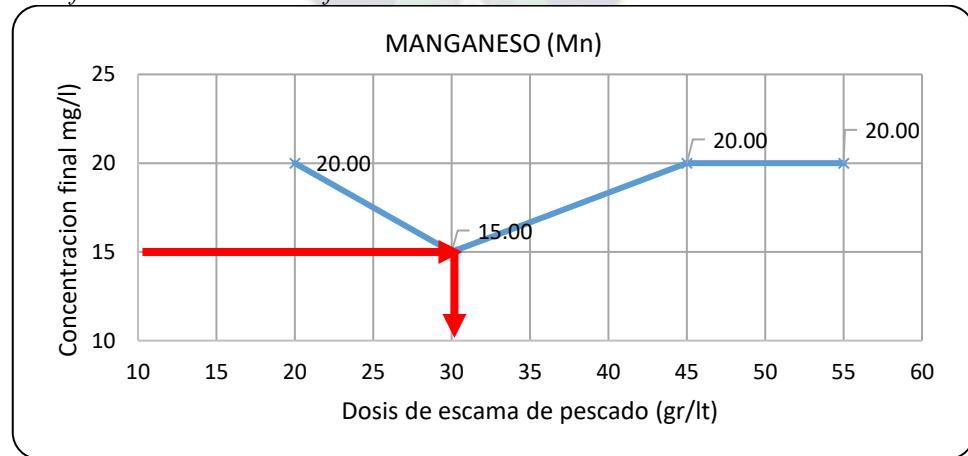
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 35: Concentración final vs Dosis de escama de Pescado - COBRE



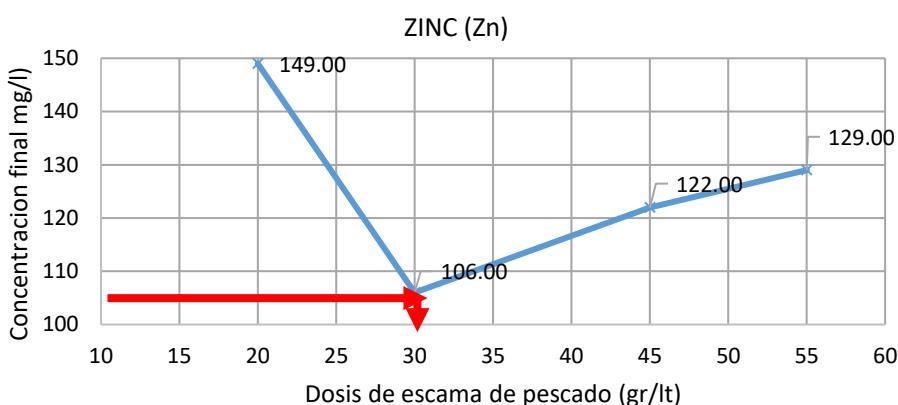
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 36: Concentración final vs Dosis de escama de Pescado - MANGANESO



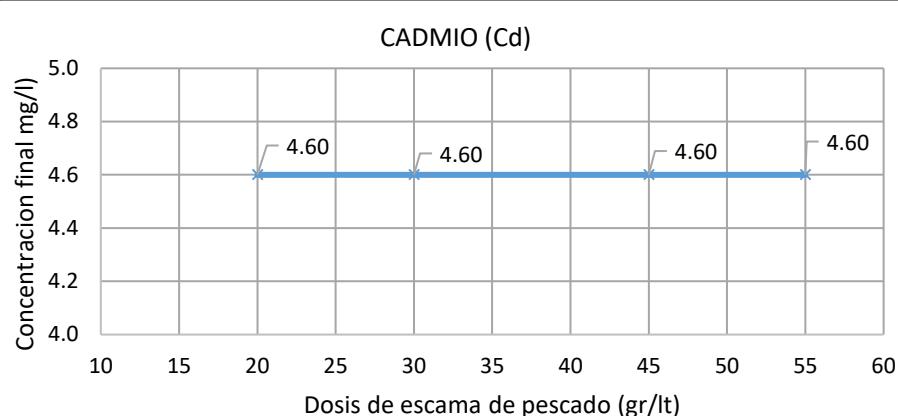
Fuente: Elaboración propia

*Gráfico 37: Concentración final vs Dosis de escama de Pescado - ZINC*



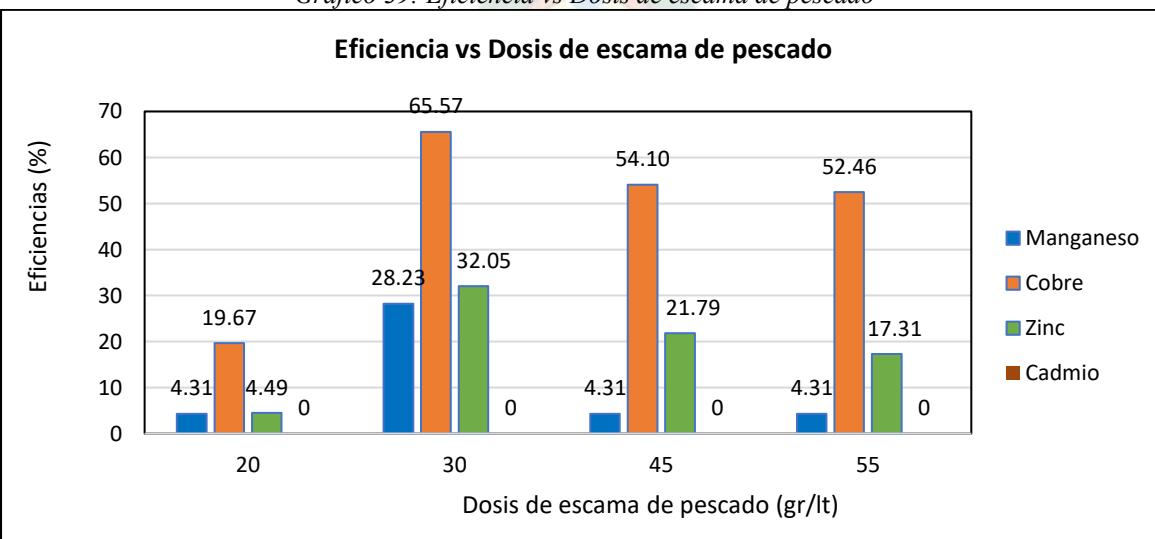
*Fuente: Elaboración propia*

*Gráfico 38: Concentración final vs Dosis de escama de Pescado - CADMIO*



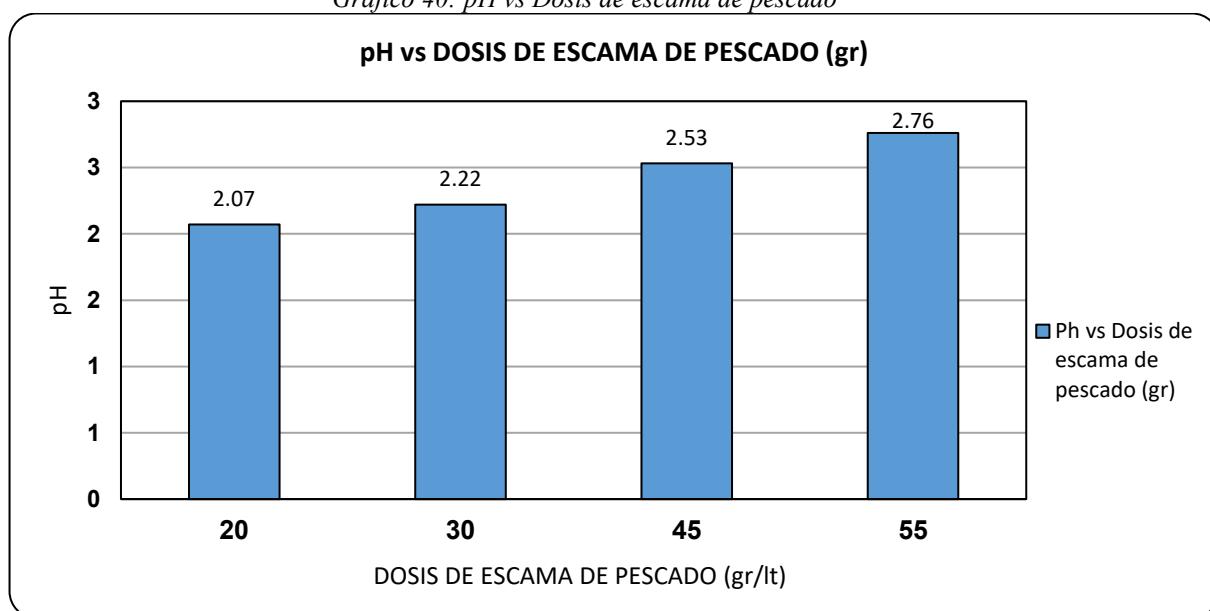
*Fuente: Elaboración propia*

*Gráfico 39: Eficiencia vs Dosis de escama de pescado*



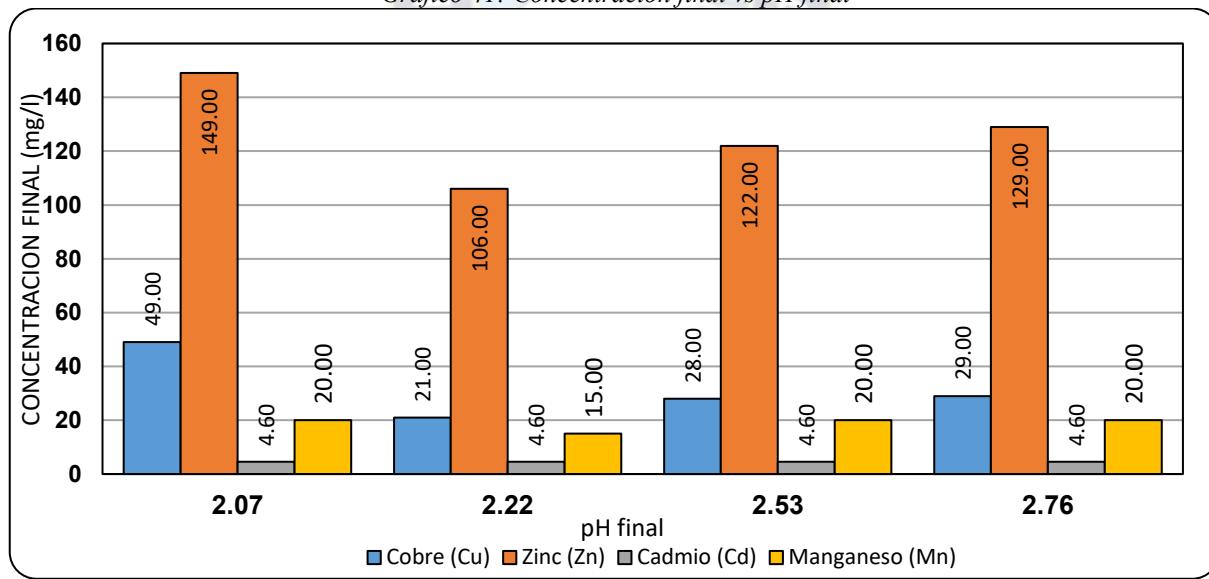
*Fuente: Elaboración propia*

Gráfico 40: pH vs Dosis de escama de pescado



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 41: Concentración final vs pH final



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 21: Prueba de Jarras para definir la dosificación de adsorbente (Sábalo - Muestra minera)



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 41 se puede observar que la dosis óptima de escama de pescado es 30 gr/lit, si bien no se llega a los límites permisibles por el reglamento (Ver Anexo 1), por otro lado, se observa que al añadir mayor dosis de escama de pescado se tiene menores eficiencias, exceptuando al Cadmio que se observa que no existe remoción alguna.

En cuanto al pH, la Tabla 41 y grafico 40, muestran claramente que a medida que se aumenta la dosis de escama de pescado el pH aumenta, además que conforme va subiendo el valor de pH, la remoción de metales va subiendo (Grafico 41)

Inicialmente tenemos un pH de 1,28 del efluente minero, y al añadir 55 gr/lit de escama, el pH solo se incrementa a 2,76, por lo tanto, se realizarán otros estudios para subir el pH de manera significativa.

### 9.5.2 Efecto del pH

## ESCAMAS DE SÁBALO

Tabla 42: Parámetros adoptados para el análisis

Tamaño óptimo de escamas (mm)	1,18 - 0,85
T <sub>MR</sub> = Tiempo de mezcla rápida óptimo (min)	20
V <sub>MR</sub> = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100
pH inicial	1,28
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0
Dosis de escama (gr/lit)	30

Fuente: Elaboración propia

Tabla 43: Concentración inicial de metales pesados de la Mina San José

	Concentración inicial (mg/l)
Manganoso (Mn)	20,9
Cobre (Cu)	61
Zinc (Zn)	156
Cadmio (Cd)	4,6

Fuente: Elaboración propia

a) Efecto del pH con Hidróxido de sodio

Debido a que en el proceso anterior no se obtuvo buenos resultados y además que el pH inicial es muy Ácido, se determinó en aumentar el pH con Hidróxido de Sodio al 6N, con una dosis de escama de pescado de 30 gr/l.

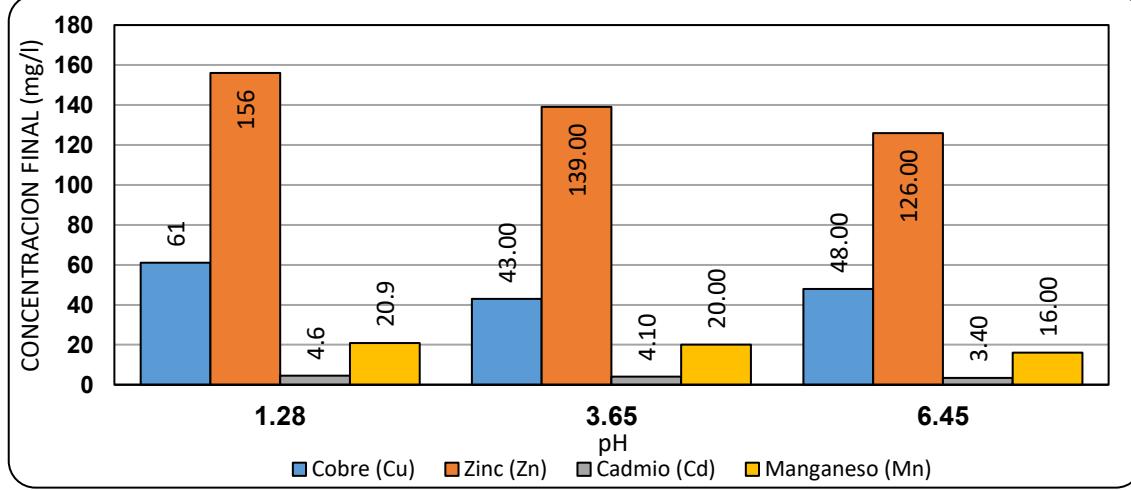
Para lo cual se realizó con dos valores de pH, 3,65 y 6,45 como se muestra en la tabla 44.

Tabla 44: Efecto del pH con la adición de Hidróxido de Sodio

Dosis (gr/lt)	NaOH (ml) 6N	pH final	Manganoso (Mn) mg/l	Remoción (%)	Cobre (Cu) mg/l	Remoción (%)	Zinc (Zn) mg/l	Remoción (%)	Cadmio (Cd) mg/l	Remoción (%)
30	17,00	3,65	20,00	23,44	43,00	29,51	139,00	10,90	4,10	10,87
	53,00	6,45	16,00	4,31	48,00	21,31	126,00	19,23	3,40	26,09

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 42: Concentración final vs pH



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla 44 y grafico 42, añadiendo el Hidróxido de Sodio no se tiene buenos resultados, no se alcanza a los límites permitidos por el reglamento, por lo tanto, se realizará otro estudio.

b) Efecto del pH con Cal

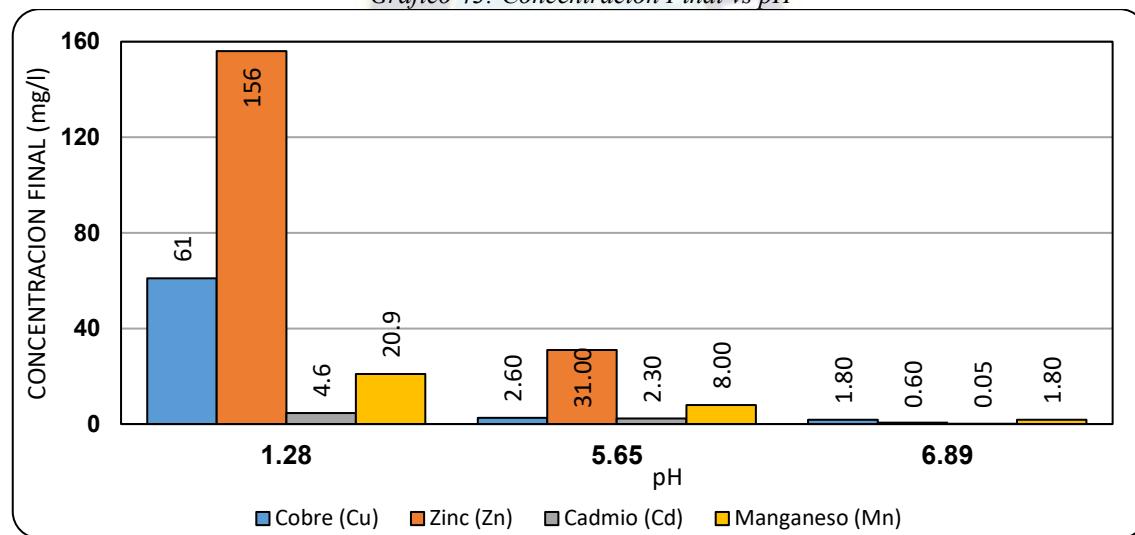
La adición de Hidróxido de Sodio no tuvo buenos resultados, por lo tanto, a continuación, será con la adición de cal al 40% con 2 variaciones de pH 5,65 y 6,89 como se muestra en la Tabla 45 y grafico 43.

Tabla 45:: Efecto del pH con la adición de Cal

Dosis (gr/lt)	Cal (ml)	pH final	Manganoso (Mn) mg/l	Remoción (%)	Cobre (Cu) mg/l	Remoción (%)	Zinc (Zn) mg/l	Remoción (%)	Cadmio (Cd) mg/l	Remoción (%)
30	235,00	5,65	8,00	61,72	2,60	95,74	31,00	80,13	2,30	50,00
	400,00	6,89	1,80	91,39	1,80	97,05	0,60	99,62	0,05	98,91

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 43: Concentración Final vs pH



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos de la remoción fueron mayores, la desventaja de realizar con Cal fue que generaba mucho lodo (Fotografía 25), además que se hizo un estudio solamente con cal, es decir sin la adición de escama de pescado y se obtuvo similares resultados, dando como conclusión que en la Tabla 45 solo la cal fue la que removió los metales y no el adsorbente de escamas de pescado

“REMOCIÓN DE METALES EN AGUA RESIDUAL MINERA POR MEDIO DE COAGULANTE NATURAL DE ESCAMA DE PESCADO”

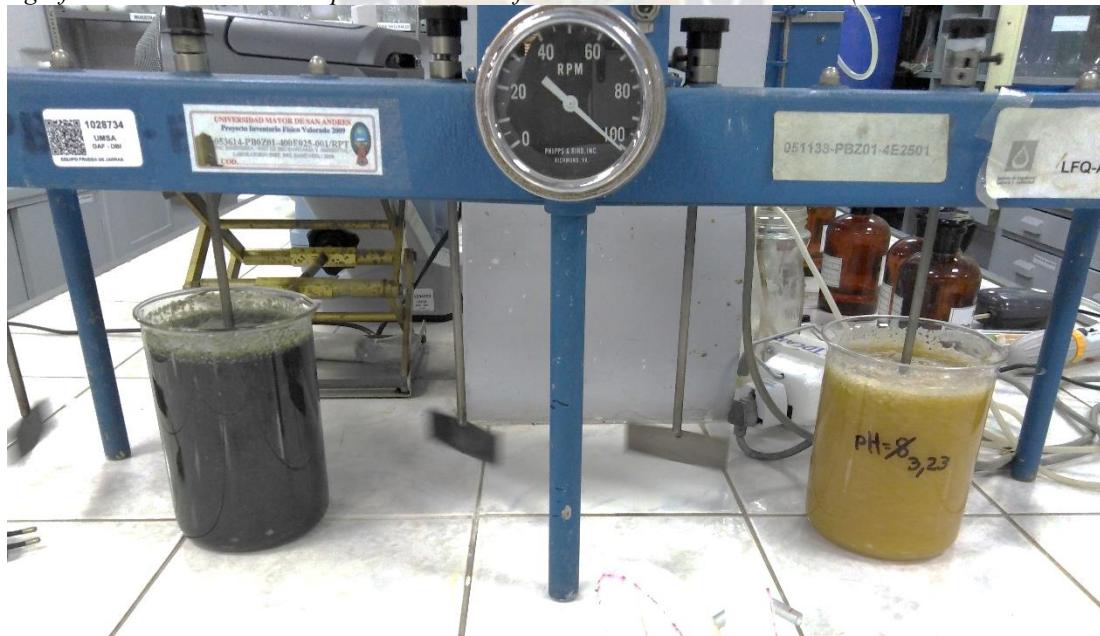
---

Fotografía 22: Adición de Hidróxido de Sodio 6 N (Sábalo – Muestra minera)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 23: Prueba de Jarras para evaluar la eficacia del Hidróxido de Sodio (Sábalo - Muestra minera)



Fuente: Elaboración propia

*Fotografía 24: Adición de cal para subir pH del agua minera (Sábalo - Muestra minera)*



*Fuente: Elaboración propia*

*Fotografía 25: Lodo generado por la adición de cal (Sábalo - Muestra minera)*



*Fuente: Elaboración propia*

### 9.5.3 Tratamiento en serie

#### ESCAMAS DE SÁBALO Y PEJERREY

Tabla 46: Parámetros adoptados para el análisis

Tamaño óptimo de escamas (mm)	1,18 - 0,85
$T_{MR}$ = Tiempo de mezcla rápida óptimo (min)	20
$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida óptima (RPM)	100
pH inicial	1,28
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0
Dosis de escama (gr/litro)	30

Fuente: Elaboración propia

Como no se obtuvo buenos resultados con el primer tratamiento, se optó por aumentar la dosis de escama de pescado, pero al aumentar la dosis hay la posibilidad de que no todas las escamas estén en contacto con el agua minera, por lo que se hizo una recirculación de agua, es decir:

- Se realizó la prueba de jarras con 1000 ml de muestra minera, para un tiempo de mezcla de 20 minutos y una velocidad de mezcla de 100 RPM, 30 gr/litro de dosis de escamas de pescado, como se muestra en la Fotografía 26 (M - 0).
- Posteriormente se recirculó el agua del primer tratamiento con un coladero, desecharon las escamas ya utilizadas y colocando nuevamente 30 gr/litro de escamas al agua recirculada (Fotografía 27)
- Este proceso se repitió 5 veces, aumentando en cada proceso 30 gr/litro de escama adicional, puesto que es la dosis óptima hallada en la tabla 41.

A continuación, en la tabla 47 y 48, se muestra los ensayos realizados para el estudio del adsorbente proveniente de las escamas de pescado de sábalo y pejerrey respectivamente.

Donde el nro. de proceso esta bajo la siguiente denominación.

**Agua sin tratar:** Agua residual minera sin ser tratada.

**0:** Agua residual minera con 30 gr de escamas de pescado por 1 litro de agua residual y un tiempo de mezcla rápida de 20 minutos. Teniendo inicialmente un pH = 1.28

**1:** Agua residual minera con la **primera recirculación**, añadiendo nuevamente 30 gr de escamas de pescado para 1 litro de agua residual minera y con un tiempo de mezcla rápida de 20 minutos.

**2:** Agua residual minera con la **segunda recirculación** de agua, añadiendo nuevamente 30 gr de escamas de pescado para 1 litro de agua residual minera y con un tiempo de mezcla rápida de 20 minutos.

**3:** Agua residual minera con la **tercera recirculación** de agua, añadiendo nuevamente 30 gr de escamas de pescado para 1 litro de agua residual minera y con un tiempo de mezcla rápida de 20 minutos.

**4:** Agua residual minera con la **cuarta recirculación** de agua, añadiendo nuevamente 30 gr de escamas de pescado para 1 litro de agua residual minera y con un tiempo de mezcla rápida de 20 minutos.

**5:** Agua residual minera con la **quinta recirculación** de agua, añadiendo nuevamente 30 gr de escamas de pescado para 1 litro de agua residual minera y con un tiempo de mezcla rápida de 20 minutos. Llegando a un pH final de 5,52 para Sábalo y 5,04 para Pejerrey.

Tabla 47: Tratamiento en serie - Escama de Sábalo

Tiempo de mezcla rápida (min)	0	20	20	20	20	20	20	Limites Permisibles por el Reglamento
Dosis de escama de pescado (gr/lt)	0	30	30	30	30	30	30	
Nº de Proceso	Aqua sin tratar	0	1	2	3	4	5	
pH	1,28	2,22	3,38	4,56	5,03	5,19	5,52	
Concentración final (mg/l)								
Cobre (Cu)	61	21	17	4,9	3,7	2	1,8	1,0
Manganoso (Mn)	20,9	15	21	19	16	14	13	0,5
Zinc (Zn)	156	106	122	58	48	36	36	3,0
Cadmio (Cd)	4,6	4,6	4,2	3,2	2,5	2,2	1,8	0,3
Volumen (ml)	1000	1000	850	800	600	790	600	
Remoción (%)								
Cobre (Cu)	0	66	72	92	94	97	97	
Manganoso (Mn)	0	28	0	9	23	33	38	
Zinc (Zn)	0	32	22	63	69	77	77	
Cadmio (Cd)	0	0	9	30	46	52	61	

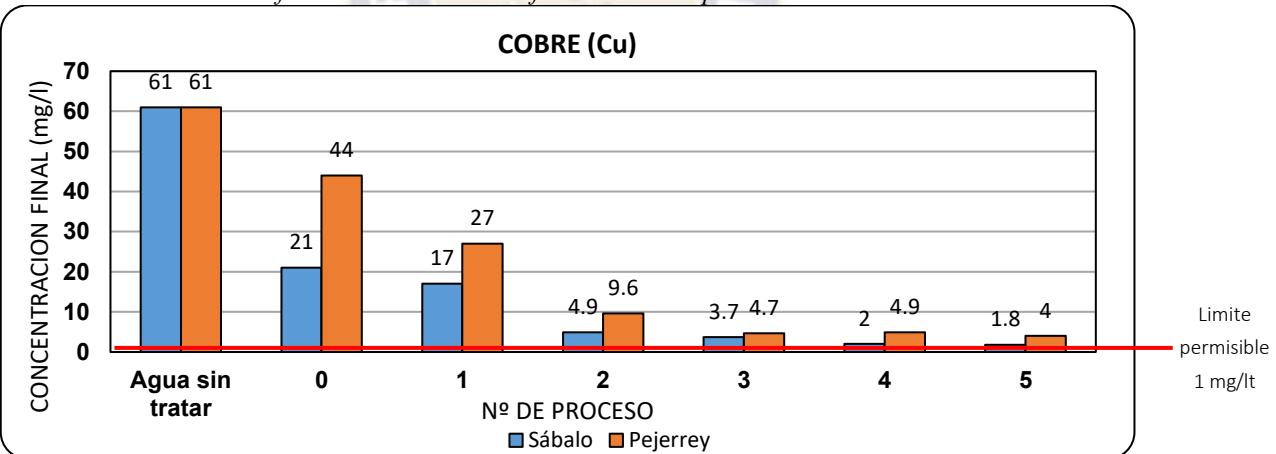
Fuente: Elaboración propia

Tabla 48: Tratamiento en serie - Escama de Pejerrey

Tiempo de mezcla rápida (min)	0	20	20	20	20	20	<b>20</b>	Limites Permisibles por el Reglamento
Dosis de escama de pescado (gr/lt)	0	30	30	30	30	30	<b>30</b>	
Nº de Proceso	Agua sin tratar	0	1	2	3	4	<b>5</b>	
pH	1,28	2,2	3,12	4,04	4,5	4,73	5,04	
Concentración final (mg/l)								
Cobre (Cu)	61	44	27	9,6	4,7	4,9	<b>4</b>	1,0
Manganoso (Mn)	20,9	19	18	16	12	11	<b>6,5</b>	0,5
Zinc (Zn)	156	117	78	39	12	24	<b>32</b>	3,0
Cadmio (Cd)	4,6	4	3,5	3	2,3	1,9	<b>1,3</b>	0,3
Volumen (ml)	1000	1000	950	900	690	700	<b>500</b>	
Remoción (%)								
Cobre (Cu)	0	28	56	84	92	92	<b>93</b>	
Manganoso (Mn)	0	9	14	23	43	47	<b>69</b>	
Zinc (Zn)	0	25	50	75	92	85	<b>79</b>	
Cadmio (Cd)	0	13	24	35	50	59	<b>72</b>	

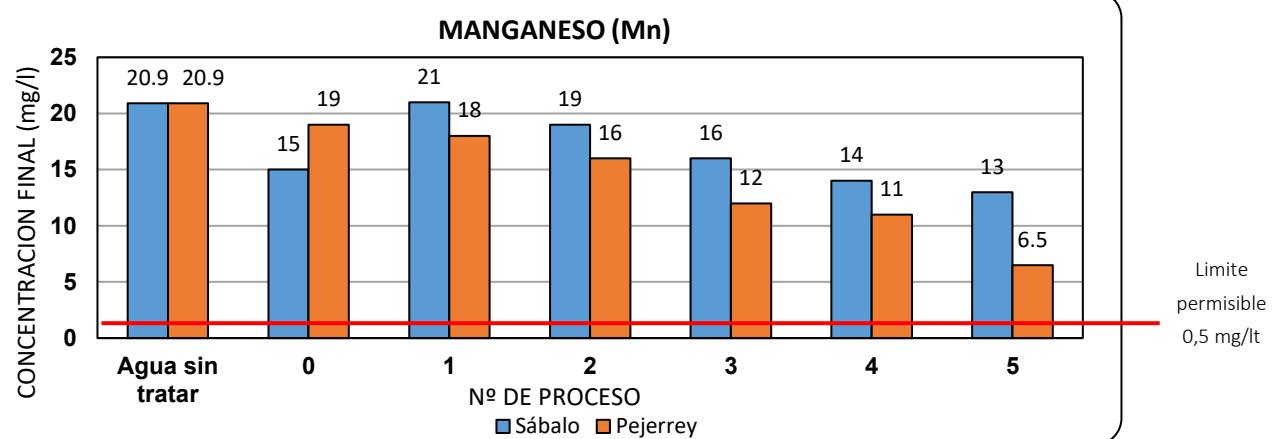
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 44: Concentración final vs Nro. de proceso - COBRE



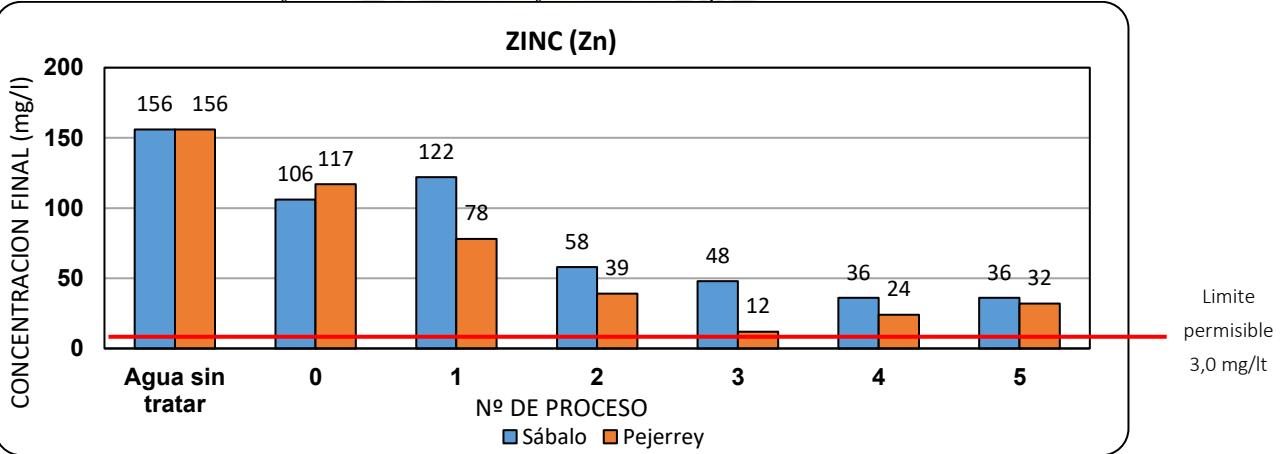
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 45: Concentración final vs Nro. de proceso - **MANGANESO**



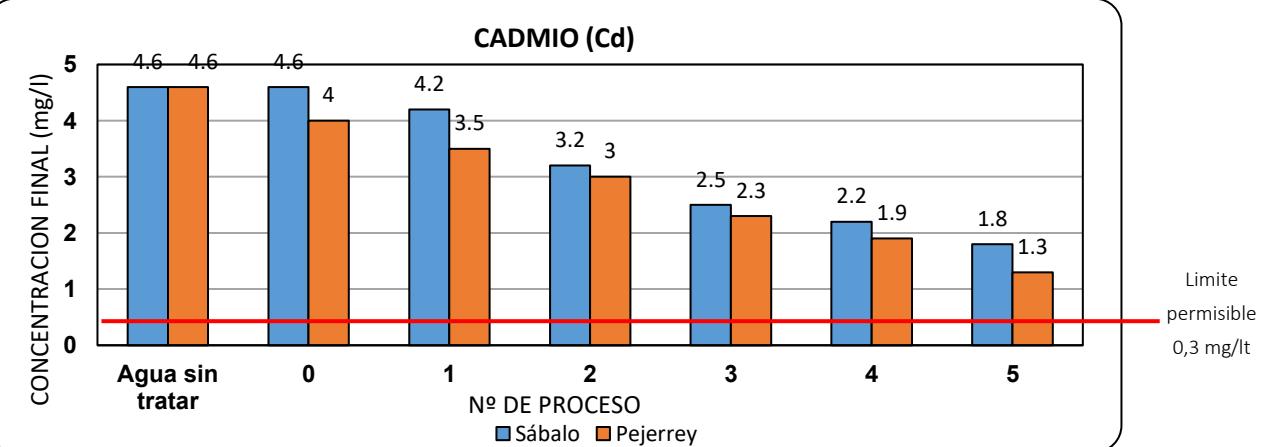
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 46: Concentración final vs Nro. de proceso - **ZINC**



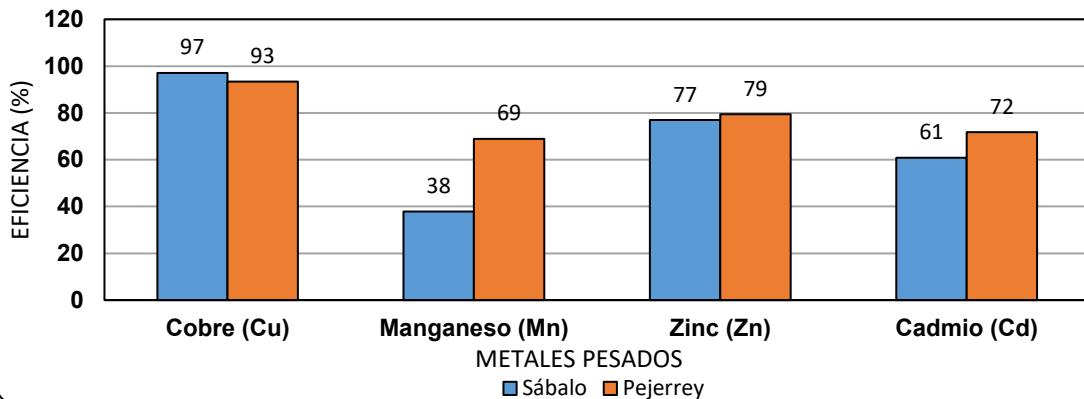
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 47: Concentración final vs Nro. de proceso - **CADMIO**



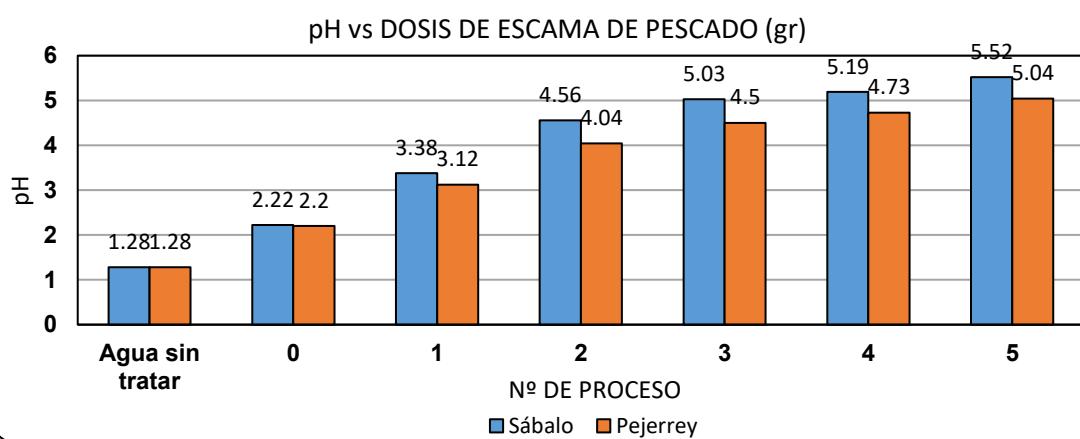
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 48: Eficiencia vs Metales pesados (SÁBALO Y PEJERREY)



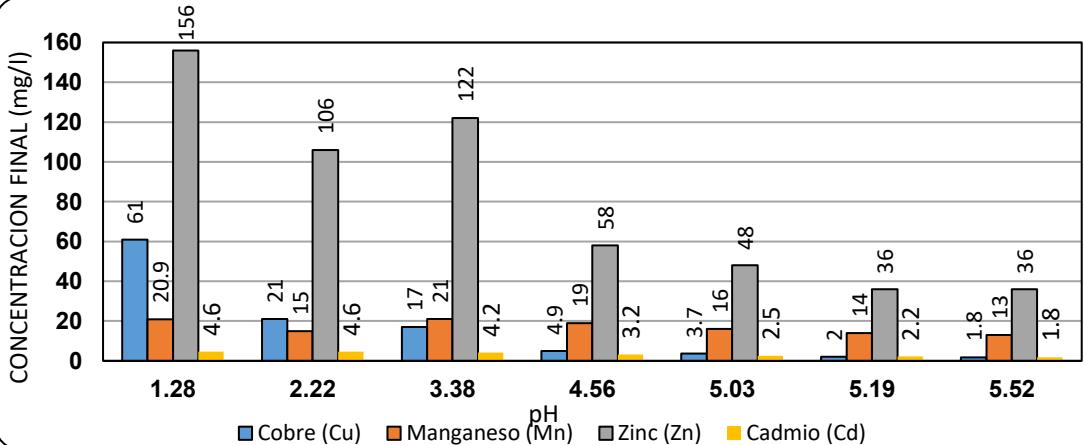
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 49: pH vs Nro. de proceso (SÁBALO y PEJERREY)



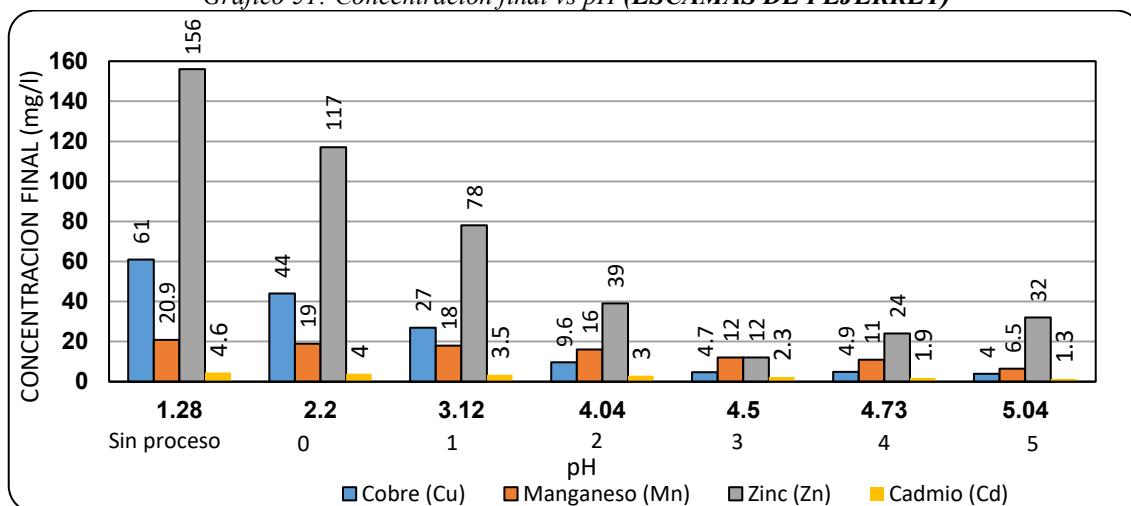
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 50: Concentración final vs pH (ESCAMAS DE SÁBALO)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 51: Concentración final vs pH (ESCAMAS DE PEJERREY)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 26: Tratamiento en serie, prueba de jarras para M-0 (Sábalo - Muestra minera)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 27: Recirculación de agua con coladera (Sábalo - Muestra minera)



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 28: Nuevamente Prueba de Jarras para M – 1 con otros 30 g de adsorbente (Sábalo - Muestra minera)



Fuente: Elaboración propia

Como resultado del tratamiento en serie se alcanzó que con la 5ta recirculación y con 180 gr/lt de escama de pescado de Sábalo se alcanzó eficiencias de 97%, 38%, 77% y 61% para Cobre, Manganeso, Zinc y Cadmio respectivamente. No se vio necesario la 6ta recirculación puesto que no habrá una variación considerable, ya que la 4ta y 5ta recirculación no tiene diferencias considerables. (Tabla 47).

En cuando a la escama de pescado de Pejerrey se obtuvieron eficiencias de 93%, 69%, 79% y 72% para Cobre, Manganeso, Zinc y Cadmio respectivamente. No se vio necesario la 6ta recirculación puesto que no habrá una variación considerable, ya que la 4ta y 5ta recirculación no tiene diferencias considerables. (Tabla 48)

Los gráficos 44, 45, 46 y 47 muestran claramente las remociones alcanzadas para Cobre, Manganeso, Zinc y Cadmio respectivamente, donde se observa que tenemos mayores eficiencias con la escama del Pejerrey exceptuando el Cobre, donde tenemos mejores remociones con la escama del Sábalo (Grafico 48).

El pH incrementa a medida que se añade más escamas de pescado en los procesos, teniendo un alto pH con la escama del Sábalo. (Grafico 49).

En los gráficos 50 y 51 se observa que a medida que aumenta el pH, se tiene mayores remociones tanto para las escamas de Sábalo y Pejerrey. Como conclusión tenemos que con un pH de 5.04 tenemos las más altas remociones para pejerrey.

#### 9.5.4 Tratamiento en serie con la adición de cal

En la tabla 49 se muestran los parámetros adoptados para el análisis.

*Tabla 49: Parámetros adoptados para el análisis*

Tamaño óptimo de escamas (mm)	1,18 - 0,85
T <sub>MR</sub> = Tiempo de mezcla rápida óptimo (min)	20
V <sub>MR</sub> = Velocidad de mezcla rápida óptimo (RPM)	100
pH inicial	1,28
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0
Dosis de escama (gr/lt)	30

*Fuente: Elaboración propia*

Se siguió el mismo procedimiento indicado en el punto anterior.

Después de la 5ta recirculación se adiciono 40 ml de cal al 40%, y nuevamente se hizo la Prueba de Jarras, con un tiempo de mezcla rápida de 20 minutos y 100 RPM de velocidad.

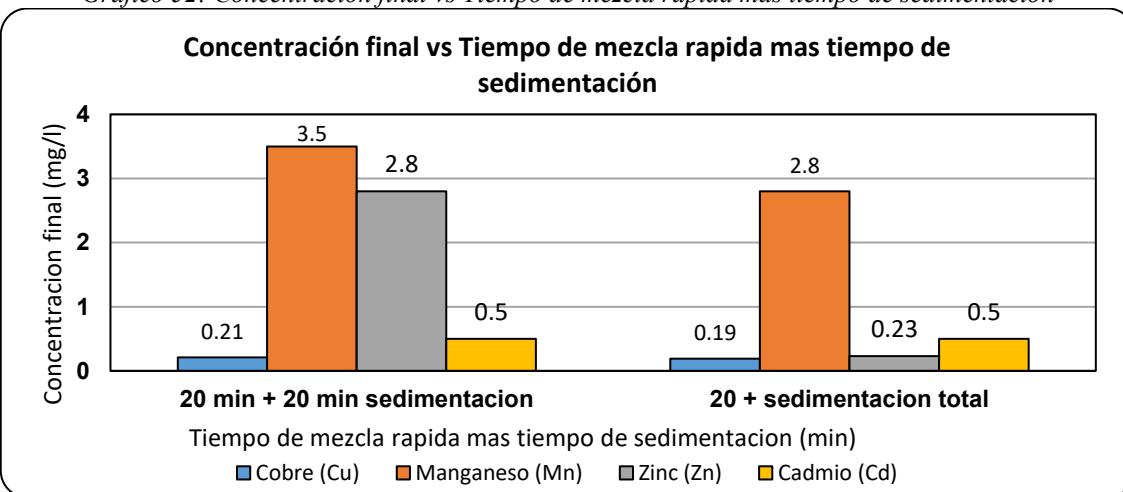
En la tabla 50 se observa los datos obtenidos con la adición de cal.

*Tabla 50: Tratamiento en Serie con adición de cal*

Tiempo de mezcla rápida (min)	0	20	20 min + 20 min de sedimentacion	20 min + 20 min de sedimentacion total	Limites Permisibles por el Reglamento
Dosis de escama de pescado (gr/lt)	0	30	30 gr/lt de escama + 40 ml de cal	30 gr/lt de escama + 40 ml de cal	
Nº de Proceso	Aqua sin tratar	5	Cal 40%	Cal 40%	
pH	1.28	5.52	8.02	8.02	
Concentracion final (mg/l)					
Cobre (Cu)	61	-	0.21	0.19	1.0
Manganese (Mn)	20.9	-	3.5	2.8	0.5
Zinc (Zn)	156	-	2.8	0.23	3.0
Cadmio (Cd)	4.6	-	0.5	0.5	0.3
Volumen (ml)	1000	-	730	730	
Remocion (%)					
Cobre (Cu)	0	-	99.7	99.7	
Manganese (Mn)	0	-	83.3	86.6	
Zinc (Zn)	0	-	98.2	99.9	
Cadmio (Cd)	0	-	89.1	89.1	

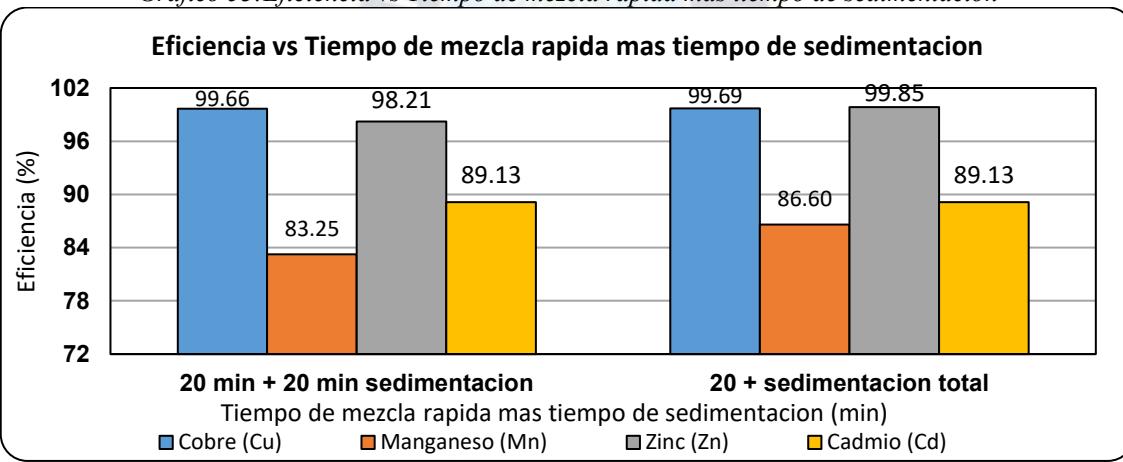
*Fuente: Elaboración propia*

Gráfico 52: Concentración final vs Tiempo de mezcla rápida más tiempo de sedimentación



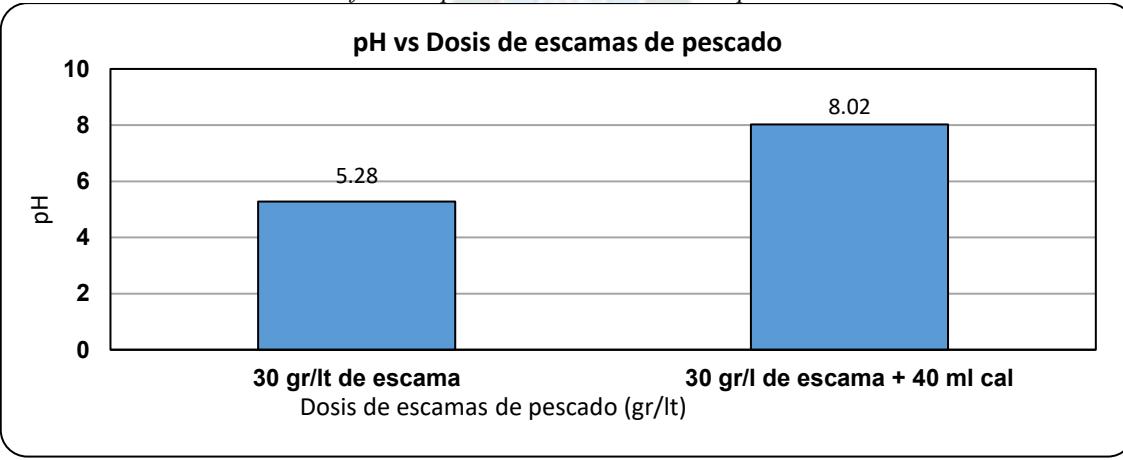
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 53: Eficiencia vs Tiempo de mezcla rápida más tiempo de sedimentación



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 54: pH vs Dosis de escamas de pescado



Fuente: Elaboración propia

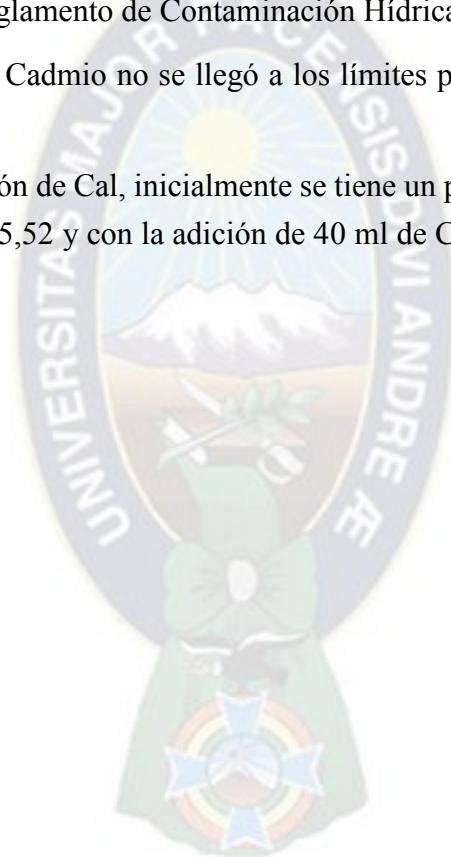
Para las escamas de Sábalo como resultado del tratamiento en serie se alcanzó que, con la 5ta recirculación, 180 gr/lt de escama de pescado de Sábalo, 40 ml de Cal al 40% y con una sedimentación de 20 minutos, se alcanzó eficiencias de 99,7%, 83,3%, 98,2% y 89,1% para Cobre, Manganeseo, Zinc y Cadmio respectivamente. (Tabla 50).

Por otro lado, como resultado para una sedimentación total, se alcanzó eficiencias de 99,7%, 86,6%, 99,9% y 89,1% para Cobre, Manganeseo, Zinc y Cadmio respectivamente. (Tabla 50).

Los gráficos 52 y 53 muestran claramente las remociones alcanzadas para Cobre, Manganeseo, Zinc y Cadmio respectivamente, donde se observa que para el caso de Cobre y Zinc se llegó a los Límites permisibles por el Reglamento de Contaminación Hídrica.

Para el caso de Manganeseo y Cadmio no se llegó a los límites permisibles, pero se obtuvo altas eficiencia de remoción.

El pH incrementa con la adición de Cal, inicialmente se tiene un pH=1,28; con 180 gr de escamas de pescado se tiene un pH de 5,52 y con la adición de 40 ml de Cal se llega a pH = 8,02 (Grafico 54)



## CAPÍTULO X

### 10 COSTOS DE PROCESAMIENTO

#### 10.1 Análisis y costo del tratamiento con coagulante natural

Se estima el tratamiento de 1 m<sup>3</sup> de aguas residuales contaminadas por el efluente minero por metales pesados disueltos.

- Costo de tratamiento para adsorbente de escama de pescado (Sábalo)

El kilogramo de pescado en bruto es 35 bs, y el costo de la escama de pescado es 4 bs el Kilogramo.

En la tabla 47 se muestra que para 1 litro de agua minera se utilizó 180 gramos de escama de pescado para ambos casos, por lo tanto, para 1 m<sup>3</sup> de agua minera se necesitarán 180 kilogramos.

Tenemos que:

Tabla 51:: Costo de adsorbente (Sábalo)

ESCAMAS DE SÁBALO	
Volumen de efluente a tratar (m3)	1
Peso de adsorbente a utilizar (kg)	180
Costo de adsorbente (Bs/kg)	4
<b>Costo de tratamiento (Bs)</b>	<b>720</b>

Fuente: Elaboración propia

- Costo de tratamiento para adsorbente de escama de pescado (Pejerrey)

El kilogramo de pescado en bruto es 60 bs, y el costo de la escama de pescado es 4,5 bs el Kilogramo.

En la tabla 48 se muestra que para 1 litro de agua minera se utilizó 180 gramos de escama de pescado para ambos casos, por lo tanto, para 1 m<sup>3</sup> de agua minera se necesitarán 180 kilogramos.

Tenemos que:

Tabla 52: Costo de adsorbente (Pejerrey)

ESCAMAS DE PEJERREY	
Volumen de efluente a tratar (m3)	1
Peso de adsorbente a utilizar (kg)	180
Costo de adsorbente (Bs/kg)	4,5
<b>Costo de tratamiento (Bs)</b>	<b>810</b>

Fuente: Elaboración propia

Por consiguiente, el tratamiento con escama de sábalo es más económico siendo 810 Bs por m<sup>3</sup> de efluente minero, pero se debe aclarar que estos costos son variables debido a que puede subir o bajar, sin embargo, en algunos mercados las escamas no tenían costo alguno.

## CAPÍTULO XI

### 11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 11.1 Conclusiones

- a) Se observó que para transformar la biomasa en adsorbente existen factores importantes pero sencillos y poco costosos, entre ellos está realizar el lavado del material para eliminar posibles interferencias, por esta razón es mejor que el lavado se realice con agua desionizada y la temperatura de secado es simplemente para obtener la biomasa totalmente seca en el menor tiempo posible sin que ésta se calcine, en el estudio se determinó que esa temperatura es de 60°C por un tiempo 72 hrs para su posterior molienda y almacenamiento. (Cuadro 12)
- b) Para llevar a cabo el tratamiento de adsorción en la **muestra sintética**, para el primer adsorbente de **escama de pescado (sábalo)** se analizaron diferentes parámetros, entre los cuales se concluye lo siguiente:
  - El tamaño elegido para la remoción de Cobre, Zinc y Cadmio fue el rango de diámetros comprendido entre 1.18 mm – 0.850 mm ya que según el índice de Langmuir se obtuvo  $q_{\max}$  de 0.260, 0.135, 0.317 mg/g respectivamente, por lo que se concluye que cuanto más pequeña es la partícula mayor remoción se tiene.
  - Como se puede observar en los gráficos 25, 26 y 27 en cuanto a la dosificación del adsorbente, se concluye que para llegar a los límites establecidos por el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (Cuadro 8 y 9) se necesitan 28 gramos de dosis de escama, mencionando que para la remoción de Cobre y Zinc solamente se necesita 13 y 15 gramos por litro respectivamente. Por otro lado, se pudo observar que a medida que se aumenta la dosis de escama de pescado el pH asciende (Tabla 27 y Grafico 28). Al mismo tiempo cuanto mayor es el pH, mayor en la remoción de los metales pesados (Tabla 27 y Grafico 29).
  - A continuación, se estudió el tiempo de sedimentación entre 0 y 10 minutos y alcanzando mejores resultados para un tiempo de sedimentación de 0 minutos, es decir, tomando la muestra inmediatamente después de realizar la mezcla rápida (Tabla 29 y Grafico 30).
  - Por otro lado, se obtuvo que a una velocidad de 60 RPM se tiene mejores remociones que para 100 RPM. Como se puede ver en la Tabla 31 con 60 RPM se tiene mayor remoción para Zinc, por el contrario, para Cobre y Cadmio es más eficiente 100 RPM, pero no tiene una diferencia considerable con la de 60 RPM. Por lo que se concluyó realizar con una velocidad de 60 RPM para las posteriores pruebas.

- Ahora bien, el tiempo óptimo de mezcla influye en las remociones, puesto que se obtiene mejores resultados con un tiempo de mezcla rápida de 20 minutos, comparando con un tiempo de 10 minutos. Se tiene mayores eficiencias de remoción a los 20 minutos. (Tabla 33 y Grafico 32) del 91.6 %, 81.4%, 92.8% para el Cobre, Zinc y Cadmio respectivamente.
  - Se verifico que para la escama de pescado (Sábalo y Pejerrey) si funciona para altas concentraciones, teniendo en cuenta que al aumentar la concentración se debe aumentar la dosis de adsorbente. (Tabla 35,36,37 y 38 para Manganese, Cobre, Zinc y Cobre respectivamente y Grafico 33)
- c) Para llevar a cabo el tratamiento de adsorción en la **muestra sintética**, para el segundo adsorbente de **escama de pescado (pejerrey)** se analizaron diferentes parámetros, entre los cuales se concluye lo siguiente:
- El tamaño elegido para la remoción de Cobre, Zinc, Cadmio y Manganese fue el rango de diámetros comprendido entre 1.18 mm – 0.85 mm ya que según el índice de Langmuir se obtuvo  $q_{max}$  de 0.151, 0.044, 0.302, 0.151 respectivamente.
  - Los demás parámetros serán los mismos hallados en el estudio de la escama de Sábalo.
- d) Para llevar a cabo el tratamiento de adsorción en la **muestra de efluente minero** (Mina San José), para el primer adsorbente de **escama de pescado (sábalo)** se adoptaron los parámetros de análisis encontrados en la muestra sintética y se llegó a las siguientes conclusiones:
- El tamaño de partícula adoptada fue el mismo que para la muestra sintética de 1.18 mm – 0.85 mm
  - En cuanto a la dosificación del adsorbente se puede ver en la Tabla 41 que 30 gramos por litro es la dosis óptima para esta muestra y obteniendo mayor eficiencia de remoción para Manganese 28.23 %, Cobre 21%, Zinc 32.05% y en el caso de Cadmio 0 (Tabla 41, Grafico 35, 36, 37 y 38)
  - Otro aspecto que se determinó fue la velocidad de Mezcla rápida de 100 RPM debido que al realizar con una menor velocidad de 60 RPM no se alcanzan mejores eficiencias de remoción.
  - Por otro lado, se vio la necesidad de aumentar el pH debido a que no se alcanzó a disminuir la remoción de metales a los límites permitidos por el Reglamento al realizar el tratamiento con escamas de pescado, por lo que se utilizó el hidróxido de sodio 6N donde no se obtuvieron buenos resultados. Además, que se requiere una cantidad considerada para elevar el pH, ya que se utilizó 53 ml y 17 ml de NaOH para tener un pH de 6.45 y 3.65 respectivamente. (Tabla 44 y Grafico 42)

- Debido a que no se obtuvieron buenos resultados con el Hidróxido de sodio se utilizó cal al 40% y 30 gramos de escamas de pescad, se elevó el pH a 5.65 y 6.89 con la cal, obtenido mejores remociones, pero su desventaja al usar la cal fue que genera más lodo, pero además se realizó el análisis con solo la cal, es decir sin la adición de escamas de pescado. Obteniendo resultados similares al primer análisis y concluyendo que en el primer análisis solo la cal fue la que removió los metales y no el adsorbente de las escamas de pescado.
  - En vista de que no se alcanzó las eficiencias esperadas mediante el primer tratamiento, se realizó tratamientos en serie, donde se concluye que con la 5ta recirculación y con 180 gr/l de escama de pescado se obtuvieron 97%, 38%, 77% y 61% para Cobre, Manganeso, Zinc y Cadmio respectivamente. No se vio necesario la 6ta recirculación puesto que no habrá una variación considerable, ya que la 4ta y 5ta recirculación no tiene diferencias considerables. (Grafico 44, 45, 46 y 47) para Cobre 1.8 mg/l, Manganeso 13 mg/l , Zinc 36 mg/l y Cadmio 1.8 mg/l.
  - Por otro lado, se tiene que el pH se incrementa a medida que se aumenta la dosis de adsorbente, puesto que inicialmente se tiene un **pH = 1.28** y añadiendo 180 gr/l de adsorbente se tiene un **pH = 5.52**. (Grafico 49)
- e) Para llevar a cabo el tratamiento de adsorción en la **muestra del efluente minero** (Mina San José), para el segundo adsorbente de **escama de pescado (pejerrey)** se analizaron diferentes parámetros, entre los cuales se concluye lo siguiente:
- Para realizar la comparación se tomaron los mismos parámetros que para el primer adsorbente en cuanto al tamaño de partícula, dosificación de adsorbente, velocidad y tiempo óptimo de mezcla rápida.
  - Por otro lado, se tiene que el pH se incrementa a medida que se aumenta la dosis de adsorbente, puesto que inicialmente se tiene un **pH = 1.28** y añadiendo 180 gr/l de adsorbente se tiene un **pH = 5.04**. (Grafico 49)
  - Debido a que al aumentar dosis de adsorbente hay la posibilidad de que el total del adsorbente no tenga contacto con el agua minera, es por esta razón que se realizó un tratamiento en serie y además para una mejor remoción, donde se concluye que con la 5ta recirculación y con 180 gr de escama de pescado se obtuvieron 93%, 69%, 79% y 72% para Cobre, Manganeso, Zinc y Cadmio respectivamente. Se llegó a remociones de 4 mg/l para Cobre, 6.5 mg/l Manganeso, 32 mg/l Zinc y 1.3 mg/l Cadmio.
- f) En conclusión, realizando la comparación entre adsorbentes se tiene que el pejerrey es más efectivo que el sábalo, esto se puede deber a la variación de volumen que nos queda para cada recirculación. Exceptuando al cobre, ya que con el sábalo se obtuvo un mejor resultado. (Grafico 48)

g) Debido que al realizar el tratamiento en serie con cinco recirculaciones aún no se llegan a los límites permisibles, se añadió 40 ml de cal al 40%. Para las escamas de Sábalo, se alcanzó eficiencias de 99,7%, 83,3%, 98,2% y 89,1% para Cobre, Manganese, Zinc y Cadmio respectivamente. (Tabla 50 y Gráfico 53). En el grafico 52 se observa que se llegó a concentraciones de 0,21 mg/lt para Cobre; 3,5 mg/lt Manganese; 2,8 mg/lt; Zinc; 0,5 mg/lt para Cadmio.

Por otro lado, como resultado para una sedimentación total, se alcanzó eficiencias de 99,7%, 86,6%, 99,9% y 89,1% para Cobre, Manganese, Zinc y Cadmio respectivamente. (Tabla 50 y Gráfico 53). En el grafico 52 se observa que se llegó a concentraciones de 0,19 mg/lt para Cobre; 2,8 mg/lt Manganese; 0,23 mg/lt; Zinc; 0,5 mg/lt para Cadmio.

En los gráficos 52 y 53 se observa que para el caso de Cobre y Zinc se llegó a los Límites permisibles por el Reglamento de Contaminación Hídrica.

Para el caso de Manganese y Cadmio no se llegó a los límites permisibles, pero se obtuvo altas eficiencia de remoción.

El pH incrementa con la adición de Cal, inicialmente se tiene un pH=1,28; con 180 gr de escamas de pescado se tiene un pH de 5,52 y con la adición de 40 ml de Cal se llega a pH = 8,02 (Grafico 54)

h) Con relación a los costos se concluye que las escamas del Sábalo son más económicas para el tratamiento de efluente minero, tenemos que para 1 m<sup>3</sup> de efluente minero tiene un costo de 720 Bs. (Tabla 51 y 52).

## 11.2 Recomendaciones

- a) Se recomienda que para realizar la recirculación se deberá tener cuidado en la perdida de volumen de líquido, ya que esto genera variaciones en los resultados.
- b) Ahora bien, si el proyecto se lleva a cabo se recomienda, implementar un molino para la molienda de las escamas de pescado, así también un criadero de pescados para reducir el costo de la compra de escamas, puesto que, una vez retiradas las escamas del pescado, los mismos se venderían. En cuanto a la reducción de los costos del secado, se podría reemplazar el horno, dejando secar las escamas al sol directamente. Con las recomendaciones dadas se reducirían los costos del tratamiento.

- c) Se recomienda realizar estudios posteriores colocando menor cantidad de escamas de pescado y cal a una alta concentración, o una mayor cantidad de escamas de pescado y una menor concentración de cal. Puesto que con la cal se llegan a mejores remociones.
- d) Realizar ensayos orientados a la recuperación de los metales retenidos por las escamas de pescado, para su posterior reutilización tanto de los metales como de las escamas.
- e) No se llegó a los límites establecidos por el Reglamento de descarga liquidas, por lo que se recomienda añadir un coagulante químico, con las escamas de pescado.
- f) Se recomienda realizar el tratamiento como el esquema mostrado en Anexo 2.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguas acidas en Oruro, Programa de Gestión Sostenible de los Recursos Naturales de la cuenca del Lago Poopó.
- Aldana Rivera Edgar Alberto, (2012) “Uso del extracto de la semilla de Moringa Oleífera como coagulante natural primario y ayudante de coagulación en el tratamiento de agua para consumo”
- Asrafuzzaman, M., Fakhruddin, A.N.M., Alamgir Hossain, M., (2011). “Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants. ISRN Microbiol”.
- Black, A.P., Birkner, F.B. and Morgan, J.j. (1965) “Destabilization of Dilute Clay Suspensions whit Labeled Polymers”, Journal AWWA, Vol 57, 1547 – 1560
- Brown M., B. Barley, H. Wood (2002). Minewater treatment: Technology, application and policy. IWA Publishing, London, UK.
- Bustillos, L.G.T., Carpinteyro, S., Orozco, C., (2013). “Production and characterization of Opuntia ficus-indica mucilage and its use as coagulant-flocculant aid for industrial wastewaters. Int. J. Biotechnol. Res. 1, 38e45”.
- Bustillos, L.G.T., Carpinteyro, S., Orozco, C., (2013). “Production and characterization of Opuntia ficus-indica mucilage and its use as coagulant-flocculant aid for industrial wastewaters. Int. J. Biotechnol. Res. 1, 38e45”.
- Carlos Banchón, Ricardo Baquerizo, Diego Muñoz, Leila Zambrano. (2016) “Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales”.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1973 “Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1975 “Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua.
- CEPIS (1995) “Análisis de metales en agua potable y residual por espectrofotometría de absorción atómica”
- Chen, Q., Luo, Z., Hills, C., Xue, G., Tyrer, M., (2009). Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. Water Residual. 43, 2605- 2614.
- Chi y Cheng. (2006). “Use of chitosan as coagulant to treat wastewater from milk processing plant. Journal of Polymers and the Environment, 14, pp. 411–417”

- Chong K & Volesky B. (1996) “Metal biosorption equilibria in a ternary system. Biotechnology and Bioengineering, Volumen: 49:629-638”.
- Derly Willer Apaza Asqui (2015) “Remoción de metales Plomo (Pb) y Zinc (Zn) de las aguas del río T’oro Q’ocha por precipitación alcalina en la ciudad de Juliaca”
- F. Renault, B. Sancey, P.M. Badot, G. Crini. (2009). “Chitosan for coagulation/flocculation processes – an eco-friendly approach, Eur. Polym. J. 45 1337–1348”.
- Flaten, T.P., (2001). “Aluminium as a risk factor in Alzheimer's disease, with emphasis on drinking water. Brain Res. Bull. 55 (2), 187–196”.
- Garcia Fayos , Arnal, Verdu., (2010). “Study of Moringa oleifera oil extraction and its influence in primary coagulant activity for drinking water treatment. Int Conf Food Innov”.
- Gerardo Zamora Echenique, Elvis Trujillo Lunario (2016) “Planta de tratamiento en Interior Mina de las Aguas Ácidas de la Mina San José – Oruro -Bolivia”
- Guibal, Roussy., (2007). “Coagulation and flocculation of dye-containing a biopolymer (Chitosan), React. Funct. Polym. 67 (2007) 33–42”.
- Guillermo Shinno, (2019). “Perspectiva de la Minería al 2019”
- Hildebrando Ramirez Arcilla, Jhoan Jaramillo Peralta, (2015). “Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua”
- Ho Yuh-Shan & Wang Chung-Chi (2007). “Sorption equilibrium of mercury onto ground-up tree fern. Journal of hazardous materials Volumen 156, 398-404”.
- Ismail, I; Fawzy, A; Abdel-Monem, N; Mahmoud, M; El-Halwany, M; (2012). Combined coagulation flocculation pre treatment unit for municipal wastewater, Journal of Advanced Research, 3, 331 - 336.
- Jadhav MV, Mahajan YS (2014). “Assessment of feasibility of natural coagulants in turbidity removal and modeling of coagulation process. Desalin Water Treat 52:5812–5821”.
- Javier Lillo, (2010). “Impactos de la minera en el medio natural”
- John Emsley. (2001). “Nature’s Building Blocks”
- Kazi, T., Virupakshi, A., (2013). ”Treatment of tannery wastewater using natural coagulants. Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol. 2,4061e4068”.

- Khayet, Zahrim, Hilal, (2011). “Modelling and optimization of coagulation of highly concentrated industrial grade leather dye by response surface methodology, Chem. Eng. J. 167 77–83”.
- La Mer, V.K. and Healy, T.W. (1958) “Adsorption – Flocculation Reactions of Macromolecules at the Solid – Liquid Interface”. Reviews of Pure and Applied Chemistry, Vol 13, 112 – 132.
- Mallevialle J OP, Wierner M. (1998). “Tratamiento del agua por procesos de membrana. primera ed. España: Mc Graw Hill”.
- Mathews Christopher & Ahern Kevin; Bioquímica (Tercera Edición 2002). “Person Educacion S.A.141-177”.
- Miller, S.M., Fugate, E.J., Craver, V.O., Smith, J.A., Zimmerman, J.B., (2008). “Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. Environ. Sci. Technol. 42, 4274e4279”.
- Miriam Telma Jemio, (2017). “Ríos cargados de metales pesados recorren las comunidades de Oruro en Bolivia”.
- MMatijevic, E., Janauer, G.E. and Kerker, M. (1964) “ Reversal of Charge of Lyophobic Colloids by Hydrolyzed Metal Ions I. Aluminum Nitrate” Journal of Colloid Science, Vol. 19, 333-346
- Moghaddam, M.R.A. Arami, M., (2010). “Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from water treatment plant: optimization through response surface methodology, J. Hazard. Mater. 175 (2010) 651–657”.
- Mónica Alejandra Bravo Gallardo. (2017) “Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales”
- Muyibi SA, Birima AHM, Mohammed TA et al (2004). “Conventional treatment of surface water using *Moringa oleifera* seeds extract as a primary coagulant. IIUM Eng J 5:25–35”.
- Ndibewu PP, Mnisi RL, Mokgalaka SN. (2011). “Heavy metal removal in aqueous system using *Moringa oleifera*: a review. J Mater Sci Eng B1:843–853”.
- Nemerow, N; Dasgupta, A; (1998). Tratamiento de Vertidos Industriales Peligrosos. Ed. Días de Santos. Madrid, 822 pp.

- Nharingo, T., Zivurawa, M.T., Guyo, U., (2015). “Exploring the use of Cactus Opuntia ficus-indica in the biocoagulationeflocculation of Pb(II) ions from wastewaters. Int. J. Environ. Sci. Technol”.
- Nharingo, T., Zivurawa, M.T., Guyo, U., 2015. “Exploring the use of Cactus Opuntia ficus-indica in the biocoagulationeflocculation of Pb(II) ions from wastewaters. Int. J. Environ. Sci. Technol”.
- Norma A. Cuizano y Abel E. Navarro, 2008
- Organización internacional del trabajo Organización Mundial de la Salud. (2005) “Fichas Internacionales de Seguridad Química (ICSCs)”
- Organización Mundial de la Salud, 2006. “Guía para la calidad del agua Potable”
- Plan de Desarrollo Municipal del Municipio de Oruro (PDM 2013 – 2018)
- Quim. Ada Barrenechea Martel. (2004) “Tratamiento de agua para Consumo Humano Plantas de Filtración Rápida, Manual \ Teoría, Tomo I\ Cap. 4 Coagulación. Pag 213)”
- Ramiro Escalera, (2007). “Contaminación miera en Bolivia: Alternativas de remediación de aguas acidas”
- Revista Ingeniería y Región (2015). “Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales
- Sajidu SM, Henry EMT, Kwamdera G et al (2005). “Removal of lead, iron and cadmium ions by means of polyelectrolytes of the Moringa oleifera whole seed kernel. WIT Trans Ecol Environ 80:1–8”.
- Sánchez-Martín, M. González-Velasco, J. Beltrán-Heredia, (2009). “Acacia mearnsii de wild tannin-based flocculant in surface water treatment, Journal of Wood Chemistry and Technology 29 (2) 119–135”.
- Saravanakumar, A., Ganesh, M., Peng, M.M., Aziz, A.S., Jang, H.T., (2015). ·Comparative antioxidant and antimycobacterial activities of Opuntia ficus-indica fruit extracts from summer and rainy seasons. Front. Life Sci. 8, 182 e 191”.
- Sengupta M., Environmental impacts of mining. Monitoring, restoration and control. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA, 1993.
- Serapio Delgado Huallpa. (2013) “Evaluación de escamas de pescado como adsorbente de metales pesados de aguas residual”
- Spena Group. (1995) “Tratamiento de aguas residuales en minería”

- Tamamushi, B., and Tamaki, K. (1959) “The Action of Long – Chain cations on Negative Silver Iodide Sol”. *Kolloid – Zeitschrift*, Vol. 163, 122-126
- Taylor, J; Wiesner, M; (2002). Membranas. Capítulo 11. En: AWWA. Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de suministros de Agua Comunitaria. McGraw Hill. Madrid, 707 - 779 pp.
- Torres, L.G., Carpintero-Urban1, S.L., Vaca, M., (2012). “Use of Prosopis laevigata seed gum and Opuntia ficus-indica mucilage for the treatment of municipal wastewaters by coagulation-flocculation. *Nat. Resour.* 03, 35e41”.
- Velásquez CL. Quitina y quitosano (2006). “materiales del pasado para el presente y el futuro. *Avances en Química.*; 1(2):15-21”.
- Verwey, E.J.W. and Overbeek, J. Th. G, (1948) “Theory of the Stability of Lyophobic Colloids”. Elservier Publishing Co., Amsterdam.
- Vijayaraghavan, G., Sivakumar, T., Kumar, A.V., (2011). “Application of plant based coagulants for waste water treatment. *Int. J. Adv. Eng. Res. Stud.* 1, 88e92”.
- Walter Villalobos Morún, 2011. “Eliminacion de Metales pesados de Aguas Residuales con membranas de quitosano”
- Wang Chung-Chi (2007). “Sorption equilibrium of mercury onto groun-up tree fern. *Journal of hazardous materials* Volumen156,398-404”.
- Yang, Shang, Lu, Chen, Huang, Chen, Jiang, Gu,. Qian, Yang, Cheng, (2011). “Flocculation properties of biodegradable amphoteric chitosan-based flocculants, *Chem. Eng. J.* 172 287–295”.
- Yolanda Andia Cárdenas. (2000) “Tratamiento de agua, Coagulación y Floculación”
- Z. Yang, B. Yuan, X. Huang, J. Zhou, J. Cai, H. Yang, A. Li, R. Cheng. (2012). “Evaluation of the flocculation performance of carboxymethyl chitosan-graft-polyacrylamide, a novel amphoteric chemically bonded composite flocculant. *Water Res.*, 46, pp. 107–114”.

### Páginas web

- <https://www.educa.com.bo/animales-tipicos-de-bolivia/los-peces-sabalo-clupea-aloa>
- [www.fao.org/3/v7283s/V7283S06.htm](http://www.fao.org/3/v7283s/V7283S06.htm)
- [https://www.lenntech.es/referencias\\_tabla\\_periodica.htm](https://www.lenntech.es/referencias_tabla_periodica.htm)

## ANEXOS

ANEXO 1:LIMITES PERMISIBLES POR EL REGLAMENTO DE CONTAMINACIÓN HÍDRICA .....	131
ANEXO 2: ESQUEMA DE PLANTA DE TRATAMIENTO .....	136
ANEXO 3: RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO .....	138

# **ANEXO 1:LIMITES PERMISIBLES POR EL REGLAMENTO DE CONTAMINACIÓN HÍDRICA**

### LÍMITES PERMISIBLES PARA DESCARGAS LÍQUIDAS EN mg/l

NORMA - PARÁMETROS	Diaría	Mensual
Cobre	1.0	0.5
Zinc	3.0	1.5
Plomo	0.6	0.3
Cadmio	0.3	0.15
Arsénico	1.0	0.5
Cromo +3	1.0	0.5
Cromo + 6	0.1	0.05
Mercurio	0.002	0.001
Hierro	1.0	0.5
Antimonio	1.0	
Estarlo	2.0	1.0
Cianuro Libre	0.2	0.1
pH	6 a 9	6 a 9
Temperatura (*)	+/- 5°C	+/- 5 °C
Compuestos Fenólicos	1.0	0.5
Sólidos disueltos totales		500.0
Sólidos suspendidos totales	60.0	
Colifecales (NMP/100ml)	1000.0	
Aceites y grasas	10.0	
DB05	80.0	
DQO	250.0	
Amonio como Nitrógeno	4.0	2.0
Sulfuros	2.0	1.0
Nitratos como Nitrógeno		10
Endrin		0.0002
Lindano		0.004
Metoxicloro		0.1
Toxafeno		0.005
Trihalometanos totales		0.1
Plata		0.1
Selenio		0.01

(\*) Rango de variabilidad con relación a la temperatura media del cuerpo receptor

**Diaría:** Hace referencia a la toma de muestra por un periodo de 24 horas en un día para realizar la medición del parámetro en la descarga líquida.

**Mensual:** Es el promedio mensual para 30 días de la medición diaria.

Fuente: Reglamento de contaminación Hídrica

## VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE PARÁMETROS EN CUERPOS DE AGUA

Nº	Parámetros	Unidad	Clase Cenitarios	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
1	pH	NO	6.0 a 9.5	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0
2	Temperatura	°C	{+/-} 3 °C de c. receptor	{+/-} 3 °C de c. receptor	{+/-} 3 °C de c. receptor	{+/-} 3 °C de c. receptor	{+/-} 3 °C de c. receptor
3	Sólidos disueltos totales	mg/l	1000	1000	1000	1000	1000
4	Acetato y grasas	mg/l	NO	Ausente	Ausente	0.3	1.00
5	DBO5	mg/l	NO	< 2	< 5	< 20	< 30
6	DOO	mg/l	NO	< 5	< 10	< 40	< 80
7	NMP Coliformes NMF	Nombre	NO	< 30 y < 5 en 50% muestras	< 1000 y <500 en 50% muestras	< 50000 y <5000 en 50% muestras	< 500000 y <5000 en 50% muestras
8	Fatuos	NI	NO	< 1	< 1	< 1	< 1
9	Color mg PnI	mg/l	NO	< 10	< 50	< 100	< 200
10	Oxígeno disuelto	mg/l	NO	>50% sat.	>70% sat.	> 50 % sat.	>50% sat.
11	Turbidez	NTU	NO	< 10	< 30	< 100 <2000...	< 200 – 10.000...
12	Sólidos sedimentables	mg/lumin	NO	< 10 mg/l	30 mg/l – 0.1 ml/l	< 30 mg/l – <1 ml/l	< 100 mg/l – <1 ml/l
13	Aluminio	mg/l	NO	0.2 c. Al	0.3 c. Al	1.0 c. Al	1.0 c. Al
14	Antimonio	mg/l	NO	0.05c. NH <sub>3</sub>	1.0 c. NH <sub>3</sub>	2.0 c. NH <sub>3</sub>	4.0 c. NH <sub>3</sub>
15	Antimoniato	mg/l	NO	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb
16	Arsenico total	mg/l	SI	0.05 c. As	0.05 c. As	0.05 c. As	0.1 c. As
17	Benceno	ug/l	SI	2 c. Benceno	60 c. Benceno	10.0 c. Benceno	10.0 c. Benceno
18	Bario	mg/l	NO	1 - 0.05 c. Ba	1.0 c. Ba	2.0 c. Ba	3.0 c. Ba
19	Bentito	mg/l	SI	0.0001 c. Be	0.0001 c. Be	0.0001 c. Be	0.0001 c. Be
20	Boro	mg/l	NO	1.0 c. B	1.0 c. B	1.0 c. B	1.0 c. B
21	Calcio	mg/l	NO	200	300	300	400
22	Cadmio	mg/l	NO	0.005	0.003	0.005	0.003
23	Cianuros	mg/l	NO	0.02	0.1	0.2	0.2
24	Cianuros	mg/l	NO	250 c. Cl	300 c. Cl	400 c. Cl	300 c. Cl
25	Cobre	mg/l	NO	0.05 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu
26	Cobalto	mg/l	NO	0.1 c. Co	0.2 c. Co	0.2 c. Co	0.2 c. Co
27	Cromo Hexavalente	mg/l	SI	0.05 c. Cr +6	0.05 c. Cr +6	0.05 c. Cr +6	0.05 c. Cr +6

Fuente: Reglamento de contaminación Hídrica

**"REMOCIÓN DE METALES EN AGUA RESIDUAL MINERA POR MEDIO DE COAGULANTE NATURAL DE ESCAMA DE PESCADO"**

Nº	Parámetros	Unidad	Concentración	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
28	Cromo Trivalente	mg/l	NO	0.6 c. Cr+3	0.3 c. Cr+3	1.1 c. Cr+3	
29	1,2-Dicloroetano	mg/l	SI	10	10	10	
30	1,1-Dicloroetano	mg/l	SI	0.3	0.3	0.3	
31	Etileno	mg/l	NO	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn	
32	Fenoles	mg/l	NO	1.0 c. C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	1.0 c. C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	1.0 c. C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	
33	Ferro Sulfato	mg/l	NO	0.3 c. Fe	0.3 c. Fe	1.0 c. Fe	
34	Fluoruros	mg/l	NO	0.6-1.7 c. F	0.6-1.7 c. F	0.6-1.7 c. F	
35	Fosfato total	mg/l	NO	0.4 c. Orthofosfato	0.3 c. Orthofosfato	1.0 c. Orthofosfato	
36	Magnesio	mg/l	NO	100 c. Mg	100 c. Mg	150 c. Mg	
37	Manganoso	mg/l	NO	0.5 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0 c. Mn	
38	Mercúrio	mg/l	NO	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg	
39	Líquido	mg/l		2.5 c. Li	2.5 c. Li	5.0 c. Li	
40	Níquel	mg/l	SI	0.03 c. Ni	0.03 c. Ni	0.3 c. Ni	
41	Nitrato	mg/l	NO	20 c. NO <sub>3</sub>	30 c. NO <sub>3</sub>	30 c. NO <sub>3</sub>	
42	Nítrito	mg/l	NO	<1.0 c. N	1.0 c. N	1.0 c. N	
43	Nitrogeno Total	mg/l	NO	3 c. N	12 c. N	12 c. N	
44	Pbomo	mg/l	NO	0.03 c. Pb	0.03 c. Pb	0.1 c. Pb	
45	Plata	mg/l	NO	0.03 c. Ag	0.03 c. Ag	0.03 c. Ag	
46	Pentacloroetano	mg/l	SI	5	10	10	
47	Selenio	mg/l	NO	0.01 c. Se	0.01 c. Se	0.03 c. Se	
48	Sodio	mg/l	NO	200	200	200	
49	Solventes Flotantes			Ausentes	Ausentes	Ausentes	
50	Sulfatos	mg/l	NO	300 c. SO <sub>4</sub>	400 c. SO <sub>4</sub>	400 c. SO <sub>4</sub>	
51	Sulfuros	mg/l	NO	0.1	0.1	0.3	
52	S.A.A.M (Detergentes)	mg/l		0.3	0.3	0.5	
53	Tetradecano	ug/l	NO	10	10	10	
54	Tridecano	ug/l	SI	30	30	30	
55	Tetradecano de Carbono	ug/l	SI	3	3	3	
56	2,4,6-Tribrometanol	ug/l	SI	10	10	10	
57	Uranio Total	mg/l		0.02 c. U	0.02 c. U	0.02 c. U	
58	Vanadio	mg/l	NO	0.1 c. V	0.1 c. V	0.1 c. V	
59	Zinc	mg/l	NO	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn	

1

Fuente: Reglamento de contaminación Hídrica

Nº	Parámetros	Unidad	Concentración	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
PLAGUICIDAS:							
60	Aldrin-Dieldrin ☺	ug/l	SI	0.03	0.03	0.03	0.03
61	Chlordane ☺	ug/l	SI	0.3	0.3	0.3	0.3
62	D.D.T. ☺	ug/l	SI	1.0	1.0	1.0	1.0
63	Endom ☺	ug/l	NO	☺	☺	☺	☺
64	Endosulfan ☺	ug/l	NO	70	70	70	70
65	Hepatálico y Hepatoprotector ☺	ug/l	SI	0.1	0.1	0.1	0.1
66	Lindano (Gamma-BHC) ☺	ug/l	SI	3	3	3	3
67	Metoxotiofen	ug/l	NO	30	30	30	30
68	Alquenos Petrolerados	ug/l	2				
69	(PCB's):	ug/l	SI		0.001	0.001	0.001
70	Toxafeno ☺	ug/l	SI	0.01	0.01	0.01	0.03
71	Demeton	ug/l	NO	0.1	0.1	0.1	0.1
72	Gulton	ug/l	NO	0.01	0.01	0.01	0.01
73	Malation	ug/l	NO	0.04	0.04	0.04	0.04
74	Fenatox ☺	ug/l	NO	☺	☺	☺	☺
75	Carbam	ug/l			0.02	0.02	0.02
Comp. Organometalicos y carbamatos totales							
2.4 D. Herbicidas							
76	Chlorophenoxy	ug/l	SI	100	100	100	100
2.4.5 T.F. Herbicidas							
77	Chlorophenoxy	ug/l	SI	10	10	10	10
78	2.4.5 - T ☺	ug/l	SI	2.0	2.0	2.0	2.0
RADIACIÓN							
79	Radiación alta global	kg/l	SI	0.1	0.1	0.1	0.1
80	Radiación baja global	kg/l	SI	1.0	1.0	1.0	1.0

NE: No Establece ☺: Insecticidas de importación prohibida, no obstante siguen en uso

\*\*\* Cuerpo de agua en crecida

La mezcla de agua producto de una descarga y del cuerpo de agua debe regirse por la ecuación:

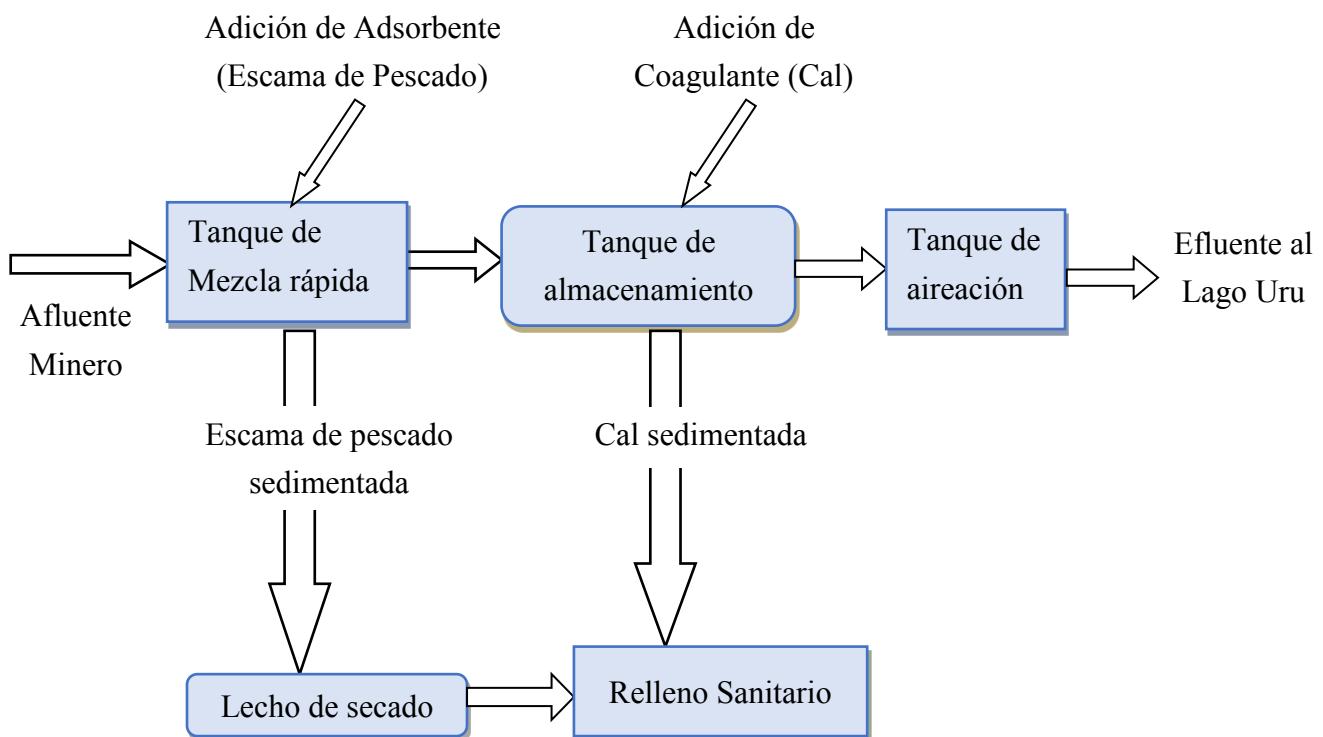
$$P_d = \frac{P_n Q_d + P_{n_e} Q_e}{Q_d + Q_e}$$

Para cualquier parámetro de calidad, el valor total de la mezcla debe ser siempre menor que el establecido para la clase de cuerpo que corresponda.

Donde:  $P_d$ : Parámetro de mezcla  
 $P_n$ : Parámetro de la descarga  
 $P_{n_e}$ : Parámetro del cuerpo de agua, en un punto sin impacto

Fuente: Reglamento de contaminación Hídrica

## **ANEXO 2: ESQUEMA DE PLANTA DE TRATAMIENTO**



# **ANEXO 3: RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO**

LABORATORIO

IIS-FORM-001

Código IIS N.º: 0191/2019

RESULTADO DE ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE AGUA RESIDUAL

Institución solicitante: Proyecto de Grado Univ. Karem Ivonne Huayta Orihuela

Dirección: Av. B, Nro. 120 - A, Zona Villa Pacajes, Ciudad de El Alto

N.º de muestra: 1

DATOS DE MUESTREO

Responsable: Univ. Karem Ivonne Huayta Orihuela  
Fecha: 2019/03/27 Hora: 16:30  
Punto: Tanque de preparación de la muestra sintética  
Lugar: Laboratorio IIS  
Fuente: Muestra sintética de laboratorio  
Localidad: Ciudad de La Paz  
Provincia: Murillo Departamento: La Paz  
Temperatura: ---  
Observaciones: ---

DATOS DE RECEPCIÓN

Fecha: 2019/03/27 Hora: 17:40  
Volumen de muestra: 1 litro  
Tipo de recipiente(s): Bidón de plástico  
Estado de la muestra: Refrigerada (Si/No): No  
Preservada (Si/No): No  
Temperatura: 18.40 °C  
Fecha de análisis: Del 2019/03/27 al 2019/03/30  
Recibido por: Ing. Bernardo Nina Rosso

ANÁLISIS QUÍMICO

N.º	PARÁMETRO ANALIZADO	MÉTODO	UNIDADES	RESULTADO
1	pH (T=25,0 °C)	SM 4500-H <sup>+</sup> B	---	5,05
2	COBRE	SM 3500 - Cu B	mg Cu/l	1,00
3	ZINC	SM 3500 - Zn B	mg Zn/l	3,00
4	CADMIO	SM 3500 - Cd B	mg Cd/l	0,30
5	MANGANEZO	SM 3500 - Mn B	mg Mn/l	0,50

OBSERVACIONES: ---

La Paz, 03 de abril de 2019

ANALIZADO POR

Univ. Karem Ivonne Huayta Orihuela

VºBº DIRECTOR

➤ MUESTRA SINTÉTICA – ESCAMAS DE SÁBALO

**1. Determinación del tamaño de malla**

$C_o$ = Concentración inicial Cobre $C_o$ (mg/l)	5
$T_{MR}$ = Tiempo de mezcla rápida (min)	10
Dosis de escama (gr)	5
$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100

$C_o$ (mg/l)	Tam. de abert. 4.75 mm			Tam. de abert. 2.36 - 1.70 mm			Tam. de abert. 1.18 - 0,85 mm		
	Cu	Zn	Cd	Cu	Zn	Cd	Cu	Zn	Cd
5	3.8	4.2	3.7	2.7	3.8	3	2.4	3.7	1.7
5	4.5	4.9	3.6	2.8	4	2.8	2.5	2.4	2.6

**2. Dosis optima del adsorbente de escamas de pescado**

$C_o$ = Concentración inicial Cu, Zn, Cd $C_o$ (mg/l)	5
$T_{MR}$ = Tiempo de mezcla rápida (min)	10
$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100
Tamaño óptimo de escamas (mm - mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2.27

Dosis de escama de pescado (gr/lt)	pH	Cobre (Cu) mg/l	Zinc (Zn) mg/l	Cadmio (Cd) mg/l
6	3.87	3.30	5.00	3.20
8	4.41	2.00	4.10	2.50
10	4.63	1.60	3.40	2.10
12	4.97	1.11	3.90	1.50
14	5.09	0.87	3.40	1.00
16	5.23	0.81	2.60	1.00
18	5.56	0.66	0.90	0.61
20	5.58	0.65	0.82	0.57
22	5.65	0.60	0.67	0.46
24	5.73	0.64	0.62	0.44
26	5.77	0.52	0.53	0.39
28	5.83	0.39	0.37	0.27
30	5.85	0.45	0.40	0.31

### 3. Tiempo de sedimentación óptimo

$C_0$ = Concentración inicial Cu, Zn, Cd $C_0$ (mg/l)	5
$T_{MR}$ = Tiempo de mezcla rápida (min)	10
$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100
Tamaño óptimo de escamas (mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2.27
Dosis de escama de pescado (gr/lt)	28

Tiempo de contacto (min)	Concentración final		
	Cu	Zn	Cd
0	0.39	0.37	0.27
10	0.44	0.42	0.31

### 4. Velocidad de mezcla rápida

$C_0$ = Concentración inicial Cu, Zn, Cd $C_0$ (mg/l)	5
$T_{MR}$ = Tiempo de mezcla rápida (min)	10
Tamaño óptimo de escamas (mm - mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2.27
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0

Velocidad (RPM)	Concentración final		
	Cu (mg/l); Dosis optima de escama de pescado = 13 (gr/lt)	Zn (mg/l); Dosis optima de escama de pescado = 15 (gr/lt)	Cd (mg/l); Dosis optima de escama de pescado = 28 (gr/lt)
60	1.04	1.67	0.39
100	0.99	3	0.3

### 5. Tiempo de mezcla rápida

$C_0$ = Concentración inicial Cu, Zn, Cd $C_0$ (mg/l)	5
$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	60
Tamaño óptimo de escamas (mm - mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2.27
Tiempo de sedimentación optimo (min)	0

Tiempo de mezcla rápida (min)	Concentración final		
	Cu (mg/l); Dosis optima de escama de pescado = 13 (gr/lt)	Zn (mg/l); Dosis optima de escama de pescado = 15 (gr/lt)	Cd (mg/l); Dosis optima de escama de pescado = 28 (gr/lt)
10	1.04	1.67	0.39
20	0.42	0.93	0.36

### 6. Efecto de concentración

$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida óptimo (RPM)	60
Tamaño óptimo de escamas (mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2.27
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0
$T_{MR}$ = Tiempo de mezcla rápida (min)	20

Dosis de escama (gr/lt)	pH	C. inicial mg/lt	C. final de Mn mg/lt	C. final de Cu mg/lt	C. final de Zn mg/lt	C. final de Cd mg/lt
30	5.8	10	0.54	1.4	5.6	0.76
40	5.4	20	2.1	2.6	3.5	2.1
50	5.2	30	3.3	2.7	3.2	2.5

➤ MUESTRA SINTÉTICA – ESCAMAS DE PEJERREY

1. Determinación del tamaño de malla

$C_o$ = Concentración inicial Cobre $C_o$ (mg/l)	5
$T_{MR}$ = Tiempo de mezcla rápida (min)	20
Dosis de escama (gr)	5
$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	60

$C_o$ (mg/l)	Tam. de abert. 1.18 - 0,85 mm				Tam. de abert. 0.6 - 0.425 mm			
	Cu	Zn	Cd	Mn	Cu	Zn	Cd	Mn
5	3.2	4	2.2	3.2	3.2	4.2	2.3	3.3
5	2.9	3.9	2.3	2.9	3.1	3.9	2.4	3

2. Efecto de concentración

$V_{MR}$ = Velocidad de mezcla rápida óptimo (RPM)	60
Tamaño óptimo de escamas (mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	2.27
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0
$T_{MR}$ = Tiempo de mezcla rápida (min)	20

Dosis de escama (gr/lt)	pH	C. Inicial mg/lt	C. final de Mn mg/lt	C. final de Cu mg/lt	C. final de Zn mg/lt	C. final de Cd mg/lt
30	5.8	10	3.3	6	1.4	1
40	5.4	20	8.52	9.6	3.6	2.8
50	5.2	30	11.8	12.8	3.9	3.4

LABORATORIO

IIS-FORM-001

Código IIS N.º: 0407/2019

RESULTADO DE ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE AGUA RESIDUAL

Institución solicitante: Proyecto de Grado Univ. Karem Ivonne Huayta Orihuela

Dirección: Av. B, Nro. 120 - A, Zona Villa Pacajes, Ciudad de El Alto

N.º de muestra: 1

DATOS DE MUESTREO

Responsable: Univ. Karem Ivonne Huayta Orihuela  
Fecha: 2019/06/01 Hora: 16:30  
Punto: Bocamina Mina - San José  
Lugar: Mina San José  
Fuente: Agua de proceso minero  
Localidad: Ciudad de Oruro  
Provincia: Cercado Departamento: Oruro  
Temperatura: ---  
Observaciones: ---

DATOS DE RECEPCIÓN

Fecha: 2019/06/04 Hora: 11:02  
Volumen de muestra: 1 litro  
Tipo de recipiente(s): Bidón de plástico  
Estado de la muestra: Refrigerada (Si/No): No  
Preservada (Si/No): No  
Temperatura: 27.00 °C  
Fecha de análisis: Del 2019/06/12 al 2019/06/18  
Recibido por: Ing. Bernardo Nina Rosso

ANÁLISIS QUÍMICO

N.º	PARÁMETRO ANALIZADO	MÉTODO	UNIDADES	RESULTADO
1	pH (T=25,0 °C)	SM 4500-H <sup>+</sup> B	---	8,02
2	COBRE	SM 3500 - Cu B	mg Cu/l	0,21
3	ZINC	SM 3500 - Zn B	mg Zn/l	2,80
4	CADMIO	SM 3500 - Cd B	mg Cd/l	0,50
5	MANGANESO	SM 3500 - Mn B	mg Mn/l	3,50

OBSERVACIONES: ---

La Paz, 18 de junio de 2019



ANALIZADO POR

Univ. Karem Ivonne Huayta Orihuela



VºBº DIRECTOR

➤ MUESTRA REAL – ESCAMAS DE SÁBALO

**1. Dosis optima**

T <sub>MR</sub> = Tiempo de mezcla rápida (min)	20
V <sub>MR</sub> = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100
Tamaño óptimo de escamas (mm - mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	1.28
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0

	Concentración inicial (mg/l)
Manganese (Mn)	20.9
Cobre (Cu)	61
Zinc (Zn)	156
Cadmio (Cd)	4.6

Dosis de escama de pescado (gr/lt)	pH	Manganese (Mn) mg/l	Cobre (Cu) mg/l	Zinc (Zn) mg/l	Cadmio (Cd) mg/l
20	2.07	20.00	49.00	149.00	4.60
30	2.22	15.00	21.00	106.00	4.60
45	2.53	20.00	28.00	122.00	4.60
55	2.76	20.00	29.00	129.00	4.60

**2. Efecto del pH**

T <sub>MR</sub> = Tiempo de mezcla rápida (min)	20
V <sub>MR</sub> = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100
Tamaño óptimo de escamas (mm - mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	1.28
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0
Dosis de escama de pescado (gr/lt)	30

	Concentración inicial (mg/l)
Manganese (Mn)	20.9
Cobre (Cu)	61
Zinc (Zn)	156
Cadmio (Cd)	4.6

**a) Hidróxido de Sodio**

Dosis de escama de pescado (gr/lit)	NaOH (ml) 6N	pH final	Manganeso (Mn) mg/l	Cobre (Cu) mg/l	Zinc (Zn) mg/l	Cadmio (Cd) mg/l
30	17.00	3.65	20.00	43.00	139.00	4.10
	53.00	6.45	16.00	48.00	126.00	3.40

**b) Cal**

Dosis de escama de pescado (gr/lit)	Cal (ml)	pH final	Manganeso (Mn) mg/l	Cobre (Cu) mg/l	Zinc (Zn) mg/l	Cadmio (Cd) mg/l
30	400.00	5.65	8.00	2.60	31.00	2.30
	235.00	6.89	1.80	1.80	0.60	0.05

**3. Tratamiento en serie**

T <sub>MR</sub> = Tiempo de mezcla rápida (min)	20
V <sub>MR</sub> = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100
Tamaño óptimo de escamas (mm - mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	1.28
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0
Dosis de escama de pescado (gr/lit)	30

Nro. De proceso	S/p	0	1	2	3	4	5
Cobre (Cu)	61	21	17	4.9	3.7	2	1.8
Manganeso (Mn)	21	15	21	19	16	14	13
Zinc (Zn)	156	106	122	58	48	36	36
Cadmio (Cd)	4.6	4.6	4.2	3.2	2.5	2.2	1.8

➤ **MUESTRA REAL – ESCAMAS DE PEJERREY**

**1. Tratamiento en serie**

T <sub>MR</sub> = Tiempo de mezcla rápida (min)	20
V <sub>MR</sub> = Velocidad de mezcla rápida (RPM)	100
Tamaño óptimo de escamas (mm - mm)	1,18 - 0,85
pH inicial	1.28
Tiempo de sedimentación óptimo (min)	0
Dosis de escama de pescado (gr/lt)	30

Nro. De proceso	S/p	0	1	2	3	4	5
Cobre (Cu)	61	44	27	9.6	4.7	4.9	4
Manganoso (Mn)	21	19	18	16	12	11	6.5
Zinc (Zn)	156	117	78	39	12	24	32
Cadmio (Cd)	4.6	4	3.5	3	2.3	1.9	1.3