



**THUSKA UMA**  
**TRATAMIENTOS DE AGUAS MINA CON PIEDRA CALIZA Y COMPOST**

- 1. ÍNDICE DE TODO EL DOCUMENTO**
- 2. JUSTIFICACIÓN TEMÁTICA**
- 3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**
  - 3.1 General
  - 3.2 Específicos
- 4. BALANCE DEL ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN EN TORNO AL TEMA PLANTEADO**
  - 4.1 Tratamiento de aguas ácidas, características generales
    - 4.1.1 Precipitación de hidróxidos
    - 4.1.2 Reducción bacteriana de sulfatos y precipitación de sólidos sulfuros
    - 4.1.3 Otros enfoques
  - 4.2 Corrientes de pensamiento y teorías vinculadas directamente al tema propuesto
    - 4.2.1 Método activo
    - 4.2.2 Método pasivo
- 5. ESTRATEGIA METODOLÓGICA PARA DISEÑAR LA PROPUESTA**
  - 5.1 Formulación de las problemáticas a investigar
  - 5.2 Fuentes para la investigación
  - 5.3 Técnicas para la recolección de información
- 6. ESTRATEGIA DE COMUNICACIÓN Y DIFUSIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**
- 7. BIBLIOGRAFÍA MÍNIMA QUE SERVIRÁ DE REFERENCIA EN LA INVESTIGACIÓN**
- 8. RESULTADOS ESPERADOS: IMPACTOS DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN EN LOS TEMAS RELACIONADOS A LA CONTAMINACIÓN MINERA.**
- 9. ENFOQUE DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN MEDIANTE UNA PROPUESTA**
  - 9.1 Descripción de soluciones
    - 9.1.1 Laboratorio
    - 9.1.2 Implementación en el terreno
  - 9.2 Viabilidad de las propuestas
  - 9.3 Aplicación de la propuesta
  - 9.4 Relevancia social
  - 9.5 Sustentabilidad de las propuestas
- 10. ÍNDICE TENTATIVO DE LOS CAPÍTULOS Y SUBCAPÍTULOS QUE CONTENDRÍA EL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN**
- 11. PRESUPUESTO**
- 12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES POR ETAPAS**



## 2. JUSTIFICACIÓN TEMÁTICA.

### ¿Cuál es el punto de partida de la temática abordada?

La formación de aguas ácidas en las minas -describen el proceso de oxidación de la pirita; debido a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros, a través de las labores mineras, por los poros existentes en las zonas de desmonte y el contacto de los depósitos de relave con la atmósfera. La oxidación de la pirita va dar lugar a la formación de  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}^+$  y metales disueltos (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.). Esta reacción provoca un incremento en el total de sólidos disueltos y aumento de la acidez, que irá asociado a una disminución de pH.

Estas aguas ácidas vienen desertificando enormes superficies, en las zonas de desmontes y de relaves, confluyendo en la mayoría de los casos a cursos de ríos y lagos, teniendo efectos negativos en los ecosistemas acuáticos y terrestres. <sup>1</sup>En nuestro caso la descarga impacta directamente sobre el río Payrumani (Huanuni) sin ningún tratamiento.

### ¿Cuál es la relevancia del tema que se pretende trabajar?

El presente proyecto pretende realizar estudios para “aminorar el grado de contaminación de aguas ácidas en el Ingenio de Machacamarca, aplicando métodos activos<sup>2</sup> y pasivos<sup>3</sup>”, es una aplicación práctica para el tratamiento de efluentes de minas. Los métodos de tratamiento activos de aguas ácidas tienen un costo muy elevado por si solo, por lo que no se puede mantener esta tecnología por un período prolongado una vez finalizada la vida de la mina. -Máximo teniendo en cuenta que el problema de las aguas ácidas puede perdurar, por cientos de años-<sup>4</sup>. Se han investigado diversos métodos de tratamiento pasivo los que dan buen rendimiento en la neutralización del pH y la eliminación de metales pesados. Además, requieren poco mantenimiento y por su bajo costo pueden ser asumidas por las empresas durante períodos de tiempo más largos<sup>5</sup>.

De acuerdo a la Ley 1333 de Medio Ambiente en su artículo N° 5 inciso 4) señala la optimización y racionalización el uso de aguas, aire, suelos y otros recursos naturales renovables garantizando su disponibilidad a largo plazo. Asimismo el artículo N° 37, 38 y 39 hacen referencia sobre el uso y aprovechamiento integral de las aguas. Por otro lado el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica en su artículo N° 10, inciso a), c), e) y f) indican de las competencias prefecturales sobre el reuso del agua contaminada, de la misma manera el artículo N° 47 señala que todas las descargas de aguas residuales crudas o tratadas a ríos y arroyos procedentes de sus usos domésticos, industriales, agrícolas, ganaderos o de cualquier otra actividad que contamine el agua, deberán ser tratadas

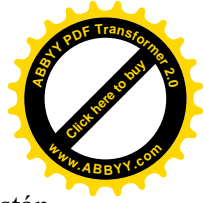
<sup>1</sup> Gestión Ambiental del Departamento de Oruro, 2005

<sup>2</sup> Por "**tratamiento activo**" se entiende la aplicación de los métodos ortodoxos de depuración de aguas residuales, que generalmente incluyen: **1]** el uso de reactivos sintéticos (en este caso, álcalis y floculantes), **2]** el uso de energía eléctrica (para bombeo, para la mezcla de reactivos con agua etc), y **3]** sedimentación intensificada (en un estanque o en una clarificadora).

<sup>3</sup> Por "**tratamiento pasivo**" (termino que no existía antes del año 1990; Cohen and Staub, 1992), implica tratamiento en sistemas estáticos (sin bombeo) que contienen materias naturales (abono, piedra caliza, etc). Los sistemas pasivos provocan la mejora de la calidad del agua por reacciones biogeoquímicas, sin el uso de reactivos sintéticos y sin la aplicación de energía externa. El tratamiento pasivo fue desarrollado en los EE-UU (p.ej. Cohen and Staub, 1992; Hedin et al., 1994) con motivo de tener estrategias sostenibles para el tratamiento de aguas de mina a largo plazo, reconociendo que el drenaje contaminado de minas es un fenómeno que suele durar siglos y hasta milenios (p.ej. Younger, 1997). Aparte de realizar un tratamiento de aguas contaminadas, un sistema pasivo generalmente tiene valores añadidos en términos de ecología.

<sup>4</sup> según las estimaciones de Younger 1997

<sup>5</sup> Watzlaf, 1997



previamente a su descarga. Finalmente los valores permisibles de los diferentes parámetros están normados en el RMCH, lo que es un indicador para el tratamiento de aguas.

Los antecedentes citados explican que a nivel de operaciones mineras y metalúrgicas que pertenecen al Estado y las cooperativas no estén cumpliendo en lo absoluto sus disposiciones reglamentarias. Por ello el trabajo de investigación es muy importante para hacer cumplir las políticas públicas ambientales, principalmente en el departamento de Oruro, para que de esta manera se pueda recomendar al final del trabajo como uso de indicadores de eficiencia ambiental.

### **¿Qué aportes nuevos proporcionará la investigación al conocimiento de la temática central a estudiarse?**

Los métodos de tratamiento pasivo se basan en los mismos principios físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los fangos naturales (wetlands), en donde se mitigan las aguas contaminadas, consiguiendo la eliminación de metales y la neutralización del pH. Hay una variedad de técnicas: los aerobios, los anaerobios, los drenajes anóxicos calizos (ALD, Anoxic Limestone Drains), los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems) y las barreras reactivas permeables cuando son aguas subterráneas (PRB, Permeable Reactive Barriers). En la práctica estos métodos se emplean solos o combinados, dependiendo de la caracterización que se tiene de las aguas ácidas.<sup>6</sup>

El aporte en el presente proyecto de investigación es proporcionar una técnica de recuperación de aguas ácidas de minas, realizando una combinación de métodos (activo y pasivo), utilizando materiales locales. En el caso del método pasivo se obtendrá el substrato (compost) más adecuado para el tratado de aguas ácidas de minas sobrepuesto a una capa de material alcalino (calcita), los cuales tendrán la capacidad de rebajar la ecotoxicidad de metales pesados, aumentar el pH del efluente y rebajar la concentración de iones sulfatos. Lo importante de este aporte es que la técnica de recuperación como lo mencionamos anteriormente, es con material local y relativamente más económico que los tratamientos activos.

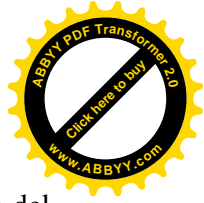
Por otra, si bien el tratamiento pasivo (compost) rebaja la concentración de iones sulfatos, queda evidente que la salinidad aún es un obstáculo para el uso del agua tratada. Para esto, se utilizará tratamiento activo (osmosis inversa), el aporte en este caso, es la utilización de membranas de tipo artesanal (orgánicas), producidos de material animal (ganado ovino), sus características semipermeables le dan la capacidad de retener sólidos disueltos, lo cual es la finalidad de la técnica de osmosis inversa, es más económico en comparación con equipos de osmosis inversa (utilización de membranas sintéticas). La combinación de estos tratamientos (pasivo y activo) utilizando material local, le da al presente proyecto una viabilidad económica para poder ser implementado en las actividades mineras de la mediana y pequeña empresa, mucho más si las técnicas a utilizarse son accesibles para el manejo de los mismos trabajadores mineros.

### **¿Por que se eligió la zona de estudio y cuál su importancia respecto a la temática?**

La zona de estudio definido es el Ingenio de Machacamarca (Municipio de Machacamarca) ubicada en la provincia Dalence, Subcuenca Uru - Uru, coordenadas Este 0728462, Norte 7977519. Se escogió la zona porque es una operación metalúrgica del Estado y es una operación pequeña (10 a 20 litros/segundo).

---

<sup>6</sup> Aduvire O., 2000



Por otro lado, la importancia respecto a la temática son los efluentes contaminados que provienen del ingenio de Machacamarca. Las descargas de aguas ácidas, provoca efectos negativos en los ecosistemas de la zona, el tratamiento y clarificación de estas aguas es una demanda de las comunidades de la zona (Kochi Piacala, Karavi, Alantañita y Kochi Ishuaya y Pampa de las Provincias de Dalence y Cercado Sur). La importancia respecto a la temática, es el tratamiento de aguas, aplicando métodos activos y pasivos, este último con el uso de compost es una técnica nueva que complementado con el uso de la técnica de osmosis inversa (método activo), de tipo artesanal, se quiere implementar en el Ingenio, para aminorar el grado de contaminación del río Huanuni y de los ecosistemas en la zona. Esto tiene una gran importancia desde el punto de vista:

**1] Tecnológico:** en la zona de estudio, es una tecnología nueva de tratamiento, el uso de compost (método pasivo) para aguas ácidas que se origina en la explotación de minerales, este tipo de tratamiento se puede aplicar en la pequeña minería. Respecto de la técnica de osmosis inversa se complementa al método pasivo (compost), rebajando la salinidad de aguas ácidas tratadas con la utilización de membranas semipermeables producidos a partir de ganado ovino.

**2] Económico:** el tratamiento mixto (activo y pasivo) resulta más económico (con relación al tratamiento netamente activo), se hace discurrir el agua ácida para cada mezcla de sustratos. Los compost (mezcla de sustratos) mitigan la acidez y metales pesados, teniendo una disminución de sulfatos, como consecuencia de los fenómenos físico, químico y bacteriano hasta alcanzar los límites máximos permisibles. El uso de membranas orgánicas artesanales (osmosis inversa) complementa el tratado de aguas ácidas reduciendo la salinidad hasta límites permisibles de uso de agua Clase B<sup>7</sup>.

**3] Social:** desde el punto de vista social, la mitigación de aguas ácidas, cuida el entorno en el que viven las comunidades, no degradando los suelos, no generando enfermedades y por consiguiente favoreciendo el desarrollo sostenible (considerando sostenible, como el uso de recursos abióticos y bióticos limitados) de la zona.

**4] Ambiental:** la mitigación de aguas ácidas por las técnicas de compost y membranas semipermeables (tipo artesanal) es un procedimiento que en forma pasiva y activa respectivamente, nivela el pH del agua y reduce los metales disueltos, hasta alcanzar los límites máximos permisibles que fija el sector correspondiente, cuyo producto del tratamiento no contaminan los afluentes que confluyen al río Huanuni, y ecosistemas de la región.

### 3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

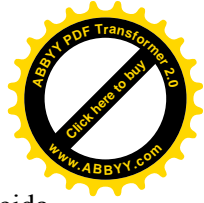
#### 3.1 General

Desarrollar un tratamiento de aguas residuales (aguas ácidas, gran cantidad de sólidos disueltos, y un alto contenido de sulfatos y metales disueltos) provenientes del Ingenio Machacamarca con métodos pasivos (compost y piedra caliza y activos (osmosis inversa con membranas orgánicas) recuperando las aguas para reutilizar como aguas de riego para cultivos y forestación en las comunidades adyacentes al ingenio generando un desarrollo sostenible para mejorar la calidad de vida de los pobladores.

#### 3.2 Específicos

- ❖ Efectuar una línea base socioeconómico, ambiental del río Payrumani (Huanuni)
- ❖ Caracterización ambiental de agua y suelo de los efluentes del Ingenio Machacamarca a través de imágenes satelitales y análisis físico químico

<sup>7</sup> Ver Ley 1333 (1992), D.S. N° 24176 (Reglamento en materia Contaminación Hídrica, 1995)



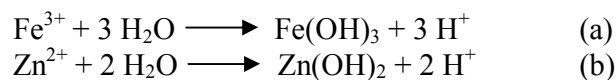
- ❖ Buscar el sustrato apropiado (compost) para el tratamiento eficiente de los efluentes de agua ácida en la zona en estudio.
- ❖ Configuración y construcción de equipo desalinizador (ósmosis inversa) por medio de membranas orgánicas (tipo artesanal).
- ❖ Desarrollar un Plan de desarrollo económico local de las comunidades afectadas

#### 4. BALANCE DEL ESTADO DE INVESTIGACIÓN EN TORNO AL TEMA PLANTEADO

La formación de aguas ácidas en las minas -describen el proceso de oxidación de la pirita; debido a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros, a través de las labores mineras (galerías y cruceros), por los poros existentes en las zonas de desmonte y el contacto de los depósitos de relave con la atmósfera-<sup>8</sup>. Dichos autores consideran que los factores que afectan la generación ácida son: volumen, concentración, tamaño de grano y distribución espacial de pirita. La oxidación de la pirita va dar lugar a la formación de  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{H}^+$ . Esta reacción provoca un incremento en el total de sólidos disueltos y aumento de la acidez, que irá asociado a una disminución de pH, a menos que sea neutralizada la acidez generada. Si el ambiente circundante es lo suficientemente oxidante, entonces muchos iones ferrosos se oxidarán a iones férricos. Por lo general, por encima de un pH 3, el ion férrico formado precipita mediante hidrólisis como hidróxido, disminuyendo por tanto el  $\text{Fe}^{3+}$  en solución, mientras que el pH baja simultáneamente. Por último, algunos cationes férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) que se mantienen en solución, pueden seguir oxidando adicionalmente a la pirita y formar  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{H}^+$ . Este proceso es el principalmente causante de originar aguas ácidas. Aunque los reactivos utilizados en sistemas pasivos son distintos de los que se usan en sistemas activos, los principios de tratamiento en ambos tipos de sistema son bastante parecidos. Existen varios enfoques distintos para convertir metales en formas menos móviles:

##### 4.1 Tratamiento de aguas ácidas, características generales

**4.1.1 Precipitación de hidróxidos;** casi todos los metales ecotóxicos son susceptibles de formar sólidos hidróxidos (p.ej.  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ , etc.). Reacciones típicas de precipitación de hidróxidos son las siguientes:

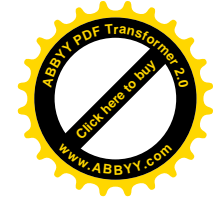
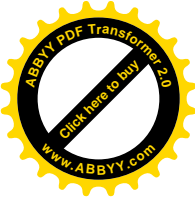


Se nota que ambas reacciones producen acidez, por la liberación de tres protones ( $\text{H}^+$ ) por cada mol de metal hidrolizado ( $\text{Fe}^{3+}$ ) y dos protones ( $\text{H}^+$ ) por cada mol de metal hidrolizado ( $\text{Zn}^{2+}$ ).<sup>9</sup> Esta acidez precisa neutralización en el proceso de tratamiento completo, y generalmente esta demanda para agentes neutralizantes es mucho más grande que la demanda ejercida por el pH ambiente del agua en su punta de salida. Aunque la precipitación de hidróxidos se practica para remover los metales ecotóxicos en solución, los hidróxidos mismos tienen propiedades muy favorables a la sorción de otros contaminantes. Por ejemplo, el arsénico por co-precipitación con (y sorción en)  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Entonces el tratamiento total que se realiza por precipitación de hidróxidos tiene ventajas añadidas, además de los de la precipitación misma.

**4.1.2 Reducción bacteriana de sulfatos y precipitación de sólidos sulfuros;** aguas ácidas de mina contienen concentraciones muy altas de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Existen varios géneros de bacterias que catalizan la reducción de sulfatos a sulfuros. Si bien la reacción de este tipo son complejas se pueden ejemplificar de la siguiente manera:

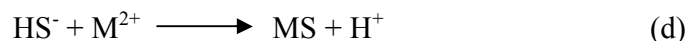
<sup>8</sup> Nordstrom y Alfors 1999

<sup>9, 10</sup> Younger *et al.*, 2002



Donde:  $\text{CH}_2\text{O}$ ; representa una fuente de carbono.

Una vez que existen iones de  $\text{HS}^-$  en solución, los metales divalentes podrían reaccionar y precipitarse como minerales sulfurosos, según:



Donde:  $\text{M}^{2+}$ ; representa  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ , etc.

Por el consumo de un protón en la reacción (c), y su liberación en la reacción (d) se puede conjeturar que el proceso de reducción bacteriana de sulfatos no alterará el pH del agua.<sup>10</sup> Sin embargo, siempre se ve un aumento considerable de pH por medio de estas reacciones, la cantidad de  $\text{SO}_4^{2-}$  que se reduce, es siempre mucho más que la cantidad de MS que se precipita. Además, el  $\text{CO}_2$  liberado en (c) se convierte en  $\text{HCO}_3^-$  (fuente importante de alcalinidad) una vez que el pH sobrepasa 4.5. Es importante tener en cuenta que los minerales sulfurosos formados por estas reacciones son estables sola mente en condiciones reducidas, y por eso es más aconsejable usar reducción bacteriana cuando se sabe que se mantendrán estas condiciones indefinidamente.

**4.1.3 Otros enfoques;** la literatura contiene muchas sugerencias sobre la posible aplicación en tratamiento de procesos de sorción, procesos electroquímicos, etc.<sup>11</sup> Aunque factibles técnicamente, y a pesar de sus ventajas en la recuperación de metales específicos que podrían ser rentables, hasta la fecha no existen aplicaciones de estos métodos a escala real. Eso es primariamente porque los costos de construcción y operación de estos métodos son todavía demasiado altos en el contexto de los precios de los metales en el mercado internacional.

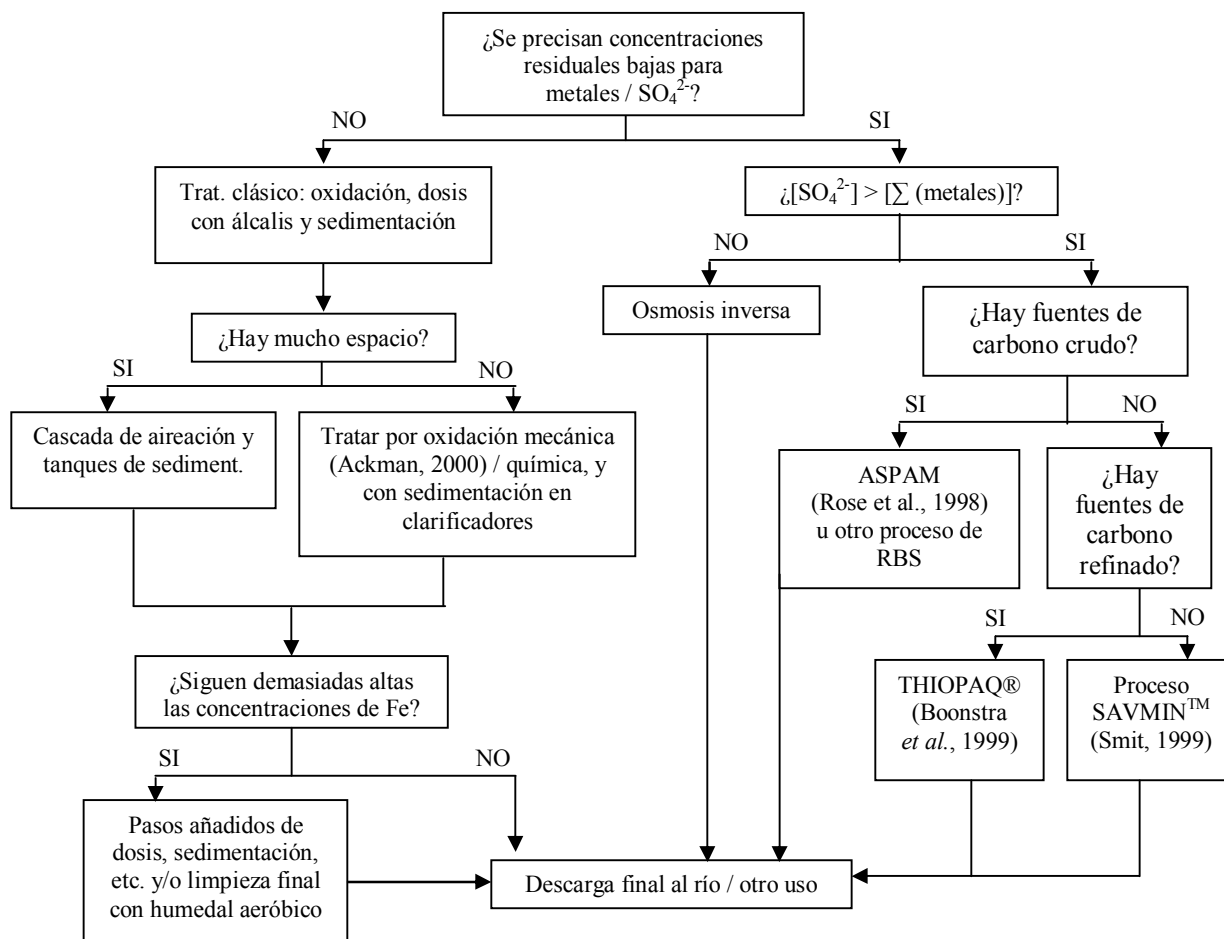
## 4.2 Corrientes de pensamiento y teorías vinculadas directamente al tema propuesto

Mencionar las corrientes de pensamiento y teorías vinculadas al presente proyecto de investigación, sería enumerar toda una lista, el cuál no es el objetivo del presente acápite. Sin embargo mencionaremos los más importantes y aplicables en la actualidad para el tratado de aguas ácidas de minas.

**4.2.1 Método activo;** se enfoca las principales técnicas, para el tratamiento de aguas ácidas, destacamos la técnica de osmosis inversa, el requisito principal para el uso de esta técnica, es la menor concentración de sulfatos en relación a los metales pesados en aguas de minas (criterio que se esta considerando para el presente proyecto de investigación). La Figura 1 presenta la lógica selección de los procesos activos más utilizados para el tratamiento de aguas ácidas.

---

<sup>11</sup> para un resumen, véase Younger *et al.*, 2002



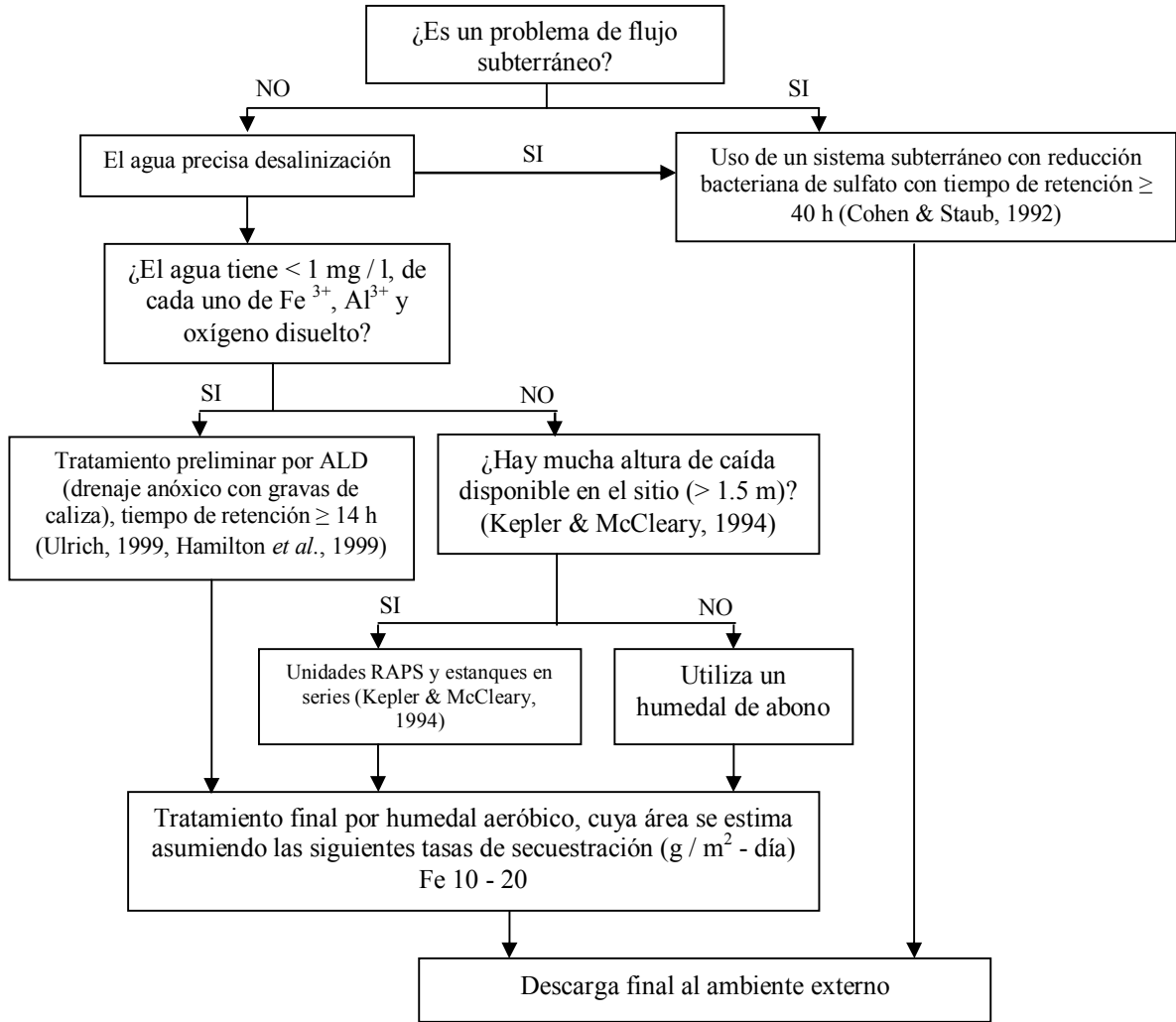
**Figura 1.** Selección de procesos de tratamiento activo para aguas ácidas de minas

**4.2.2 Método pasivo;** para aguas de mina ha evolucionado desde hace 16 años, inicialmente en los Estados Unidos<sup>12</sup>. Existen muchos ejemplos de la mala aplicación de humedales aeróbicos para aguas ácidas de minas (p.ej. Bannister, 1997). Humedales aeróbicos son inapropiados para el tratamiento de aguas aún ácidas, porque los procesos estimulados en humedales aeróbicos resultan en la hidrólisis del hierro, un proceso que libera ácido protónico (ecuación (a)). Sin embargo, una vez que se ha corregido la acidez de una agua de mina por otro tipo de sistema pasivo, se puede usar un humedal aeróbico como paso final, para remover los últimos mg/l de hierro. También, tecnologías pasivas para otras variedades de aguas de mina están ya experimentando avances rápidos en el contexto del proyecto de investigación "PIRAMID" (Comisión Europea, 50 Programa Marco<sup>13</sup>).

El tratamiento para aguas de minas para el proyecto de investigación, nos enfocamos en las técnicas de unidades RAPS y humedal de abono, como base para la propuesta de una nueva técnica pasiva (compost elaborado con material local, junto a áridos alcalinos, en este caso calcita) de tratado de aguas de minas. La Figura 2 presenta la lógica selección entre las variables opciones.

<sup>12</sup> Trabajos realizados por Cohen & Staub, 1992; Hedin *et al.*, 1994

<sup>13</sup> Ver [www.piramid.org](http://www.piramid.org)



**Figura 2.** Selección de procesos de tratamiento pasivo para aguas ácidas de minas

En cuanto a la zona de estudio Montoya J. C. et al (2005) menciona que existe una alteración en las propiedades fisicoquímicas de las aguas del río por las descargas constantes procedentes de las actividades mineras (Ingenio Machacamarca). Estas aguas no tienen ningún tratamiento para su mitigación. Se advierte una colmatación de sedimentos al borde del río.

La descarga y salida libre de las aguas del Ingenio se ha estimado en 10 litros/segundo con alto contenido de sedimentos disueltos totales, metales pesados y elevada acidez los que sobrepasan los límites permisibles establecidos en la normativa ambiental boliviana.

## 5. ESTRATEGIA METODOLÓGICA PARA DISEÑAR LA PROPUESTA.

### 5.1 Formulación de las problemáticas a investigar

Producto de las actividades mineras y el proceso metalúrgico del Ingenio Machacamarca (subcuenca Uru - Uru), se tiene un grado de contaminación de aguas, con elevada acidez, junto a ellos la presencia de metales pesados ecotóxicos, sólidos en suspensión provocando salinidad elevada. Este tipo de agua, causa daños ambientales en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Los efluentes mineros





encuentran su punto final de recorrido en los cuerpos de agua en este caso el río Payrumani (Huanuni) que discurre al lago Uru - Uru y en menor proporción en los suelos aledaños al cuerpo de agua, los metales pesados disueltos en el agua son absorbidos por las plantas acuáticas y/o terrestres (bioacumulación), estos a su vez son consumidos por animales superiores (ganado, peces), provocando una biomagnificación de metales ecotóxicos, afectando de manera negativa a la salud de poblaciones vulnerables (mujeres, niños, trabajadores mineros). Esta situación, trae consigo poder discutir las “Tecnologías limpias a la explotación de minerales base: tratamientos de efluentes”.

## 5.2 Fuentes para la investigación

- ▶ Trabajo de gabinete
  - Recopilación y análisis de información a partir de fuentes secundarias referidas de las diferentes instituciones para la línea base socioeconómico y ambiental.
  - Sistematización de los resultados de análisis de muestras de aguas superficiales, aguas subterráneas, suelos, sedimentos, flora y fauna efectivizados por la Secretaria de Recursos Naturales y Medio Ambiente de la Prefectura de Oruro.
  - Recopilación de información secundaria (libros, revistas, internet) sobre las técnicas de tratamiento activo y pasivo
  - Adquisición de Imágenes Satelitales y preparación de mapas temáticos y determinación exacta de la zona de estudio
  - Preparación de materiales y equipos para muestreo y caracterización del agua y suelos
  - Definición de puntos de muestreo a través de imágenes satelitales.
  - Elaboración de encuestas y determinación del universo a estudiar
  - Elaboración de formularios para estudios de caso
  - Firma de convenios con las instituciones mineras y ambientales
- ▶ Trabajo de campo
  - Reuniones con autoridades de la empresa y personas claves de las comunidades.
  - Visitas de campo para realizar reconocimiento del área de estudio y georeferenciar para ubicar los puntos en las imágenes satelitales
  - Seminarios talleres para recopilar información con los comunarios y la presentación de los resultados
  - Ejecución de las encuestas y estudio de casos con la empresa y las comunidades involucradas.
  - Caracterización física y química de las aguas superficiales del Ingenio Machacamarca sin previo tratamiento y medición del caudal.
  - Definición y elaboración de compost para el tratamiento pasivo, como de la dosis.
  - Ubicación del lugar donde se hará el tratamiento activo y pasivo.
  - Diseñar el flujograma de tratamiento pasivo y activo de las aguas residuales del ingenio.
  - Construcción de las piscinas de tratamiento pasivo y equipamiento. Implantación del tratamiento activo.
  - Campaña de muestreo de los diferentes parámetros del agua para análisis físico y químico con los diferentes tratamientos.
  - Monitoreo y seguimiento de los tratamientos pasivo y activo.
  - Taller para presentación y validación del plan de desarrollo económico ambiental
- ▶ Interpretación y sistematización del trabajo desarrollado
- ▶ Elaboración de la propuesta del Plan de reutilización de agua con fines de riego para cultivos y forestación.
- ▶ Presentación del trabajo final
- ▶ Difusión del trabajo de investigación ante las diferentes instancias.



### 5.3 Técnicas para la recolección de información

**Cualitativas:** se realizará observaciones in situ, entrevistas, encuestas, estudios de caso, reuniones con responsables y trabajadores del Ingenio de Machacamarca, pobladores de las comunidades aledañas, autoridades ambientales, municipales y otros.

**Cuantitativas:** se utilizará la teledetección y el uso de imágenes satelitales para cuantificar el área de influencia, se utilizará equipos de medición de caudales (para definir el volumen de aguas de minas a ser tratada), análisis de muestras de agua en laboratorios certificados (proporcionará datos físicos y químicos del agua contaminada), servirá para realizar el respectivo tratado de aguas. Se realizará diferentes combinaciones de compost para ver el más adecuado para el tratado de aguas ácidas de minas. <sup>14</sup>Esta actividad implica además el uso de residuos urbanos y residuos de explotaciones agrícolas y ganaderas. Pruebas de laboratorio y ejecución en el campo del tratamiento pasivo y activo.

## 6. ESTRATEGIA DE COMUNICACIÓN Y DIFUSIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.

Para la comunicación y difusión de los diferentes resultados obtenidos en la presente investigación se realizarán diversas actividades con los beneficiarios, como también con las diferentes instituciones afines o interesadas en la actual investigación, siendo estos dos grupos de difusión e impacto del presente trabajo de investigación.

### 6.1 Actividades con comunarios: Comunicación y Difusión con los beneficiarios involucrados con el alcance del estudio

Se prepararán ayudas audiovisuales demostrativas, ya sean de la demostración de sistemas de tratamiento de aguas. Inicialmente se realizarán: Reuniones con grupos, ya sean las visitas de campo y las visitas a oficinas, en este tipo de visitas se tomará a las comunidades interesadas, de igual forma se tomarán los métodos democráticos o sea pedir la palabra y decisiones por mayoría.

Inicialmente y de acuerdo a los objetivos general y específicos se desarrollará el tema con talleres de difusión de resultados, para contrarrestar la contaminación minera, este primer taller se realizará con los comuneros del sector de estudio. En el que también se incidirán en recomendaciones de la necesidad de contar con indicadores ambientales que permitan caracterizar la situación ambiental de la región. Por ende, las actividades que hacen a los métodos de comunicación y demostración hacia las comunidades beneficiarias son:

- 1) Seminario - Taller para la recolección de información.
- 2) Seminario de difusión Socio Económico y Ambiental de la zona de estudio.
- 3) Seminario de demostración de resultados alcanzados, análisis y evaluación de propuestas de Desarrollo Económico Local y Comunitario

### 6.2 Actividades con otras instituciones afines: Comunicación y Difusión al Público

De acuerdo al cronograma de actividades se realizará de igual forma la difusión de los resultados a las instituciones e instituciones afines a la rama de investigación (Universidad, Municipio y Prefectura del departamento). En los diferentes seminarios se extenderán y obsequiarán materiales de difusión, por ejemplo Trípticos, Dípticos, etc., todo este material utilizado como método de difusión de resultados, se harán conocer en todo el municipio como en el departamento de Oruro.

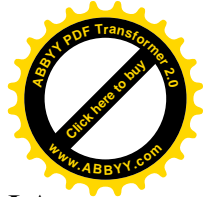
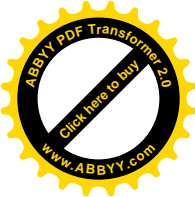
---

<sup>14</sup> Pérez L. M. 2008



## 7. BIBLIOGRAFÍA MÍNIMA QUE SERVIRÁ DE REFERENCIA EN LA INVESTIGACIÓN.

- 1] Aduvire. 2000. Prevención de la formación y tratamiento por métodos pasivos de aguas ácidas.
- 2] Bannister, A.F. 1997. Lagoon and reed-bed treatment of colliery shale tip water at Dodworth, South Yorkshire. In Younger (editor) *Minewater Treatment Using Wetlands*. pp. 105-122.
- 3] Cohen, R.R.H. & Staub, M. W. 1992. Technical manual for the design and operation of a passive mine drainage treatment system. Colorado School of Mines, 1992. 69pp.
- 4] Hamilton, Q.U.I., Lamb, H.M., Hallett, C. & Proctor, JA. 1999. Passive treatment systems for the remediation of acid mine drainage at Wheal Jane, Cornwall. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management*, 13, pp 93-103.
- 5] Hedin, R.S., Nairn, R.W. & Kleinmann, R.L.P. 1994. Passive treatment of polluted coal mine drainage. Bureau of Mines Information Circular 9389, 35pp.
- 6] Kepler, DA. & McCleary, E.C. 1994. Successive Alkalinity Producing Systems (SAPS) for the Treatment of Acidic Mine Drainage. Vol. 1: Mine Drainage. pp 195-204.
- 7] Ley 1333, 1992. Medio Ambiente. D.S. 24176, Reg. Materia de Contaminación Hídrica, 1995.
- 8) Montoya J. C. et al (2005) *Gestión Ambiental del Departamento de Oruro*. Editorial Latinas. Oruro, Bolivia. 264 pp.
- 8] Nordstrom D.K. y Alfors C.M. (1999). *Geochemistry of acid mine water*.
- 9] Pérez L., 2008. Fertilidad de suelos y Fertilizantes. (documento inédito), Cap. 10. pp. 186 - 199.
- 10] Rose, P.D., Boshoff, GA., Van Hille, L.C.M., Dunn, K.M. & Duncan, J.R. 1998. An integrated algal sulphate reducing high rate ponding process for the treatment of acid mine drainage wastewaters. *Biodegradation*, 9, pp 247-257.
- 11] Smit, J.P. 1999. The treatment of polluted mine water. *In Proceedings of the Congress of the International Mine Water Association, Sevilla Spain, 13-17, 1999. Volume II*, pp 467-471.
- 12] Ulrich, M. 1999. Non-metallic carbonous minerals in the passive treatment of mining wastewater in Slovenia. *Chemical Engineering and Processing*, 38, pp. 249-258.
- 13] Younger, P.L., Banwart, SA. & Hedin, R.S. 2002. *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. (ISBN 1-4020-0137-1). 464pp.
- 14] Younger, P.L. 1997. The Longevity of Mine water Pollution: A Basis for Decision-Making. *Science of the Total Environment*, 194/195, pp 457-466.
- 15] Watzlaf. (1997). *Passive treatment System for the treatments of mine drainage: Annexing limestone drainages*.
- 16] [www.piramid.org](http://www.piramid.org)



## 8. RESULTADOS ESPERADOS: IMPACTO DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN EN LOS TEMAS RELACIONADOS A LA CONTAMINACIÓN MINERA.

Los resultados esperados es el tratamiento de aguas ácidas de minas y que los parámetros físicos y químicos sean los exigidos a los límites permisibles para una clase de agua “B” (según Ley 1333, 1992).

Parámetros físicos y químicos	Unidad	Agua Contaminada*	Agua tratada** (resultado esperado)
pH		3.86	6 - 9
STD	mg/lt	1767	≤ 1000
Ce	μS/cm	1756	
Antimonio	mg/lt	0.005	≤ 0.01
Arsénico total	mg/lt	0.023	≤ 0.05
Estaño	mg/lt	-0.30	≤ 2.0
Cadmio	mg/lt	s/d	≤ 0.005
Cobre	mg/lt	4.03	≤ 1.0
Hierro	mg/lt	66.98	≤ 0.3
Oxígeno disuelto	mg/lt	s/d	≥ 70% sat.
Plomo	mg/lt	0.08	≤ 0.05
Sulfatos	mg/lt	s/d	≤ 400
Sulfuros	mg/lt	s/d	≤ 0.1
Zinc	mg/lt	27.34	≤ 0.2

\* Producto de actividades mineras, Huanuni Alantañita Karavi - Oruro Prefectura del departamento de Oruro, 2005

\*\* Clase B, Ley 1333, de Medio Ambiente, 1992

Se ha logrado establecer un diagrama de flujo, cuyos componentes son: poza de sedimentación, poza de RBS (sustrato adecuado con material local, compost) y neutralización de pH (áridos de calcita), y desalinizador (tipo artesanal, membrana orgánica), en las que cada uno de ellos tienen funciones específicas. Los resultados esperados, permiten proponer técnicas de recuperación de aguas ácidas de minas, acordes a la realidad económica de la región priorizando la utilización de material local para el tratado de aguas, resolviendo en parte las demandas por parte de la sociedad civil para el mejoramiento ambiental y de la calidad de vida de la población.

## 9. ENFOQUE DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN MEDIANTE UNA PROPUESTA.

El presente proyecto de investigación “THUSKA UMA: TRATAMIENTOS DE AGUAS MINA CON PIEDRA CALIZA Y COMPOST”, tiene como alternativas:

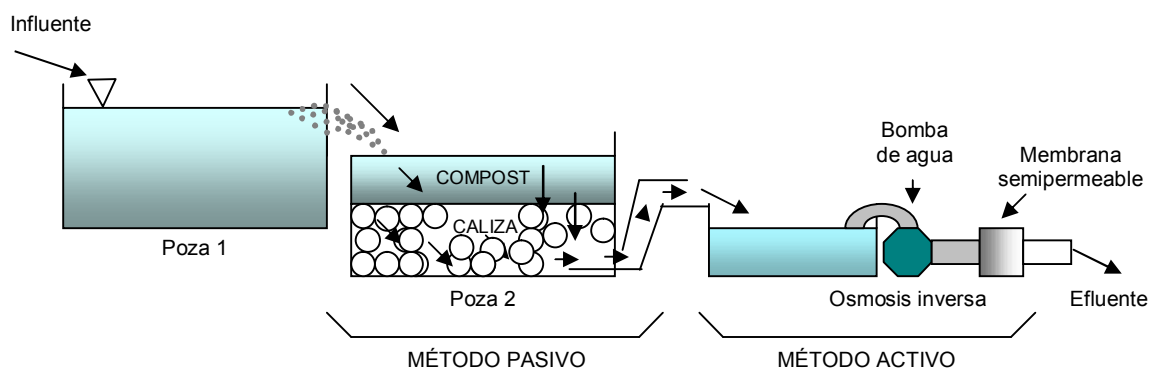
### 9.1 Descripción de soluciones

La solución para la mitigación de las aguas ácidas de minas de Huanuni Alantañita Kariva, para el presente proyecto de investigación comprende dos etapas de estudio: 9.1.1 Investigación en laboratorio (prueba estática) y 9.1.2 Implementación en el terreno

**9.1.1 Laboratorio:** caracterización físico-químico del efluente. Posterior, se procederá a utilizar las combinaciones diferentes elaborados con material local (residuos biodegradables), para producir compost (estas mezclas deben tener una relación C:N de 25:1 a 30:1, para que las bacterias transformen el carbono en azúcares y energía, así como las proteínas fuentes de nitrógeno permita el desarrollo de las bacterias, importante para el proceso de reducción, esto tiene una duración de 3

meses), una vez teniendo el compost con diferentes combinaciones de sustratos, se agregará aguas ácidas a razón de 200 ml en cada recipiente donde se encuentre el compost. Realizado el muestreo de aguas de cada recipiente, se evaluará los datos obtenidos, y donde tenga mejores resultados (reducción de sulfatos y posible rebaja de la acidez), será el sustrato (compost) elegido (tiene una duración de 15 días), posterior a esto, se prepara el recipiente, donde se pondrá áridos alcalinos (calcita), en este recipiente se pondrá el efluente problema (los resultados mostrarán una neutralización de la acidez del efluente). Una vez realizado estas pruebas (de reducción de sulfatos y neutralización de acidez), se realiza la última prueba que consiste en la técnica de ósmosis inversa (se utilizará membrana semipermeable, producto de ganado ovino), mediante una presión externa al sistema de ósmosis inversa (mediante una bomba) se hará fluir el efluente por la membrana semipermeable, resultado de esta operación disminuirá los sólidos totales disueltos y con esto la disminución de la salinidad (reducción de la  $C_e$ ) en el efluente.

**9.1.2 Implementación en el terreno:** una vez diseñado y construido el diagrama de flujo el agua ácida proveniente de la mina Huanuni Alantañita Karavi ingresan:



**Figura 3.** Perfil esquemático de tratado de aguas de minas de Huanuni Alantañita Kariva

Primero a la **poza 1** de sedimentación, si bien esta primera etapa no esta contemplada en el trabajo de laboratorio, es para disminuir los sólidos totales disueltos antes de ingresar a la siguiente poza de tratamiento.

Posteriormente el efluente ingresan a la **poza 2**, que consiste en un sistema reductor y productor de alcalinidad (el sistema reductor consiste en una capa de sustrato espeso, compost, que tiene la finalidad de reducir el sulfato a sulfuros y poder precipitar una vez combinado con los metales pesados que son insolubles, esto sucede principalmente en la capa inferior del compost donde ausencia de oxígeno y cuando existe abundante materia orgánica y sulfato, a su vez el bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) reacciona a su vez con cationes metálicos y forma carbonatos metálicos que también precipitan, también sucede una serie de procesos de oxidación principalmente en la parte superior de la poza, formando óxidos e hidróxidos, el hierro ferroso que está en disolución, forma óxido férrico e hidróxidos, insoluble que precipitan con lo que disminuye cationes del agua; por otra parte, el sistema productor de alcalinidad consiste en neutralizar el pH ácido de la agua de mina, mediante una capa de áridos alcalinos, calcita.).

Finalmente ingresan al sistema de **ósmosis inversa** (membrana semipermeable orgánico, producto de ganado ovino), para disminuir los sólidos totales disueltos con el fin de rebajar la salinidad del efluente. El resultado de la mitigación del drenaje ácido de las minas de Huanuni Alantañita Kariva será un éxito, porque los contaminantes principales están dentro de los niveles máximos permisibles (Clase B), en el tiempo de ejecución del presente proyecto de investigación.



## 9.2 Viabilidad de las propuestas

La elevada acidez de las aguas de minas, concentraciones altas de metales pesados ecotóxicos y sólidos totales disueltos en los cauces de los ríos del sector Huanuni Alantañita Karavi son contaminantes; sin embargo, en el proceso de tratamiento, se separan disminuirá estas concentraciones elevadas y la rebaja de la acidez, y así eliminar una de las fuentes principales de contaminación en el sector de estudio. La parte económica de la propuesta involucra el cálculo de gastos a partir de la implementación del sistema de tratamiento y la determinación de los ingresos económicos por la utilización de las aguas tratadas para sistemas de riego en el sector e incrementar sus rendimientos en los cultivos como la superficie a ser sembrada; análisis de flujo y sensibilidad y otros.

## 9.3 Aplicación de la propuesta

La aplicabilidad de la propuesta del proyecto de investigación, se sustenta en la técnica de recuperación (accesible a diferentes niveles de formación académica) y económicamente factible a la realidad de la región. Se sustenta en un conjunto de teorías y acumulación de conocimientos generados en los últimos 20 años, en el tema de recuperación de aguas ácidas de minas. La investigación es de tipo científico, cuantitativo a nivel experimental.

## 9.4 Relevancia social

El proyecto de investigación tiene un enfoque participativo que se refleja en uno de sus objetivos específicos, el de transmitir conocimientos, dirigida a la reflexión y comprensión de la realidad cuánto a la contaminación de aguas por actividades mineras. La relevancia social tiene la finalidad de contribuir a la generación de propuestas, de políticas frente a las diferentes problemáticas ambientales, promoviendo la disminución de las asimetrías sociales (mediante el incremento de agua para actividades agropecuarias) y la inequidad existentes, logrando una mayor integración social mediante la concientización de problemas de contaminación ambiental.

Asimismo concluido el trabajo permitirá establecer indicadores de eficiencia ambiental para generar políticas públicas de remediación ambiental por la autoridad ambiental competente (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente) cuyo éxito del trabajo permitiría implementar tratamientos de bajo costo y de alta eficiencia, pudiendo replicarse en otras operaciones mineras. De esta manera se estaría evitando la generación de impactos ambientales negativos y procurando una convivencia pacífica entre mineros y agropecuarios.

## 9.5 Sustentabilidad de las propuestas

1] **Tecnológico:** en la zona de estudio, es una tecnología nueva de tratamiento, el uso de compost (método pasivo) para aguas ácidas que se origina en la explotación de minerales, este tipo de tratamiento se puede aplicar en la pequeña minería. Respecto de la técnica de osmosis inversa se complementa al método pasivo (compost), rebajando la salinidad de aguas ácidas tratadas con la utilización de membranas semipermeables producidos a partir de ganado ovino.

2] **Económico:** el tratamiento mixto (activo y pasivo) resulta más económico (con relación al tratamiento netamente activo). El uso de membranas orgánicas artesanales (osmosis inversa) complementa el tratado de aguas ácidas reduciendo la salinidad hasta límites permisibles de uso de agua Clase B. Se sustenta en cuánto se usa material local, accesible a la zona en estudio (relativamente más económico con relación a sistema de tratamiento tradicionales).



3] **Social:** desde el punto de vista social, la mitigación de aguas ácidas, cuida el entorno en el que viven las comunidades, no degradando los suelos, no generando enfermedades y por consiguiente favoreciendo el desarrollo sostenible en la zona.

4] **Ambiental:** la mitigación de aguas ácidas por las técnicas de compost y membranas semipermeables (tipo artesanal) es un procedimiento que en forma pasiva y activa respectivamente, nivela el pH del agua y reduce los metales disueltos, hasta alcanzar los límites máximos permisibles que fija el sector correspondiente, cuyo producto del tratamiento no contaminan los afluentes al río Huanuni, flora y la fauna de los ecosistemas de la región. Fundamentalmente se hará incidencia en las políticas públicas de la autoridad ambiental prefectural y municipal.

## **10. ÍNDICE TENTATIVO DE LOS CAPÍTULOS Y SUBCAPÍTULOS QUE CONTENDRÍA EL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN.**

### **RESUMEN EJECUTIVO**

#### **I. Introducción**

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Justificación
- 1.3 Objetivos
- 1.4 Alcance y área de estudio

#### **II. Marco teórico**

- 2.1 Conceptualización de términos
- 2.2 Estudios previos en el área del proyecto
- 2.3 Sistemas de producción
- 2.3 Relevancia socioeconómica
- 2.4 Relevancia ambiental - ecológica

#### **III. Tratamiento de aguas ácidas y metodología**

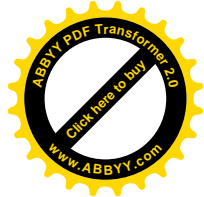
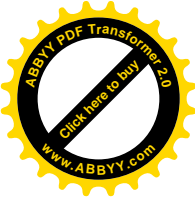
- 3.1 Muestreo de aguas de mina
- 3.2 Caracterización física y química de las aguas
- 3.3 Pruebas en laboratorio del tratado de aguas
- 3.4 Pruebas de membranas semipermeables
- 3.5 Sistema de tratamiento de aguas in situ

#### **IV. Conclusiones y Recomendaciones**

#### **V. Referencias bibliográfico**

#### **VI. Personal participante**

#### **ANEXOS**



## 12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES POR ETAPAS

TIEMPO ACTIVIDADES	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5				MES 6				MES 7				MES 8				MES 9											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
<b>Etapa 1</b>																																												
Elaboracion de diagnostico	5	5	5	5																																								
Elaboración de encuestas Técnico, Sociales y economicas					5	3																																						
Análisis y evaluación de informes existente	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2																																		
Trabajo de campo tecnicos investigadores y tesis				2				3			3																																	
Preparacion de Materiales y equipos para muestreo						1	3	3	3	1																																		
Caracterizacion de los efluentes del Ingenio Machacamarca									3	3	3	1																																
Informes Preliminares				2				2			2				2				2				2				2				2				2									
Relevamiento de información existente	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2																														
Construcción de pozas	5	5	5	5																																								
Construccion de fosas compost y preparacion de compost	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5																													
<b>Etapa 2</b>																																												
Elaboracion de compost					7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7																												
Preparacion de la membrana semipermeable									5	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2												
Determinación de muestreo		2	2			2	2		2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2			2	2																
Preparación de Materiales y equipos de muestreo				2	2	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
Toma de muestras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
Caracterizacion de las muestras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
Análisis físicos y químicos					4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4												
Entrevistas a responsables del ingenio y municipio de machacamarca	2	2	2	1	1	1	1	1			1				1				1				1				2				2													
Difusion a poblaciones aledañas, ingenio y municipio de Machacamarca						1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1												
<b>Etapa 3</b>																																												
Pruebas de laboratorio del tratado de aguas de minas					4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4												
Evaluacion e interpretacion de resultados					2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1								
Elaboracion del diagrama de eflunetes de agua para el ingenio Machacamarca (entrada y salida de aguas)					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1																													
Remediación ambiental									5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5								
<b>Etapa 4</b>																																												
Implementacion del sistema de tratado de aguas									6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6								
Corroboración los resultados obtenidos en laboratorio con el proyecto piloto en el terreno									2		2		2		2		2		2		2		2		2		2		2		2		2		2									
Elaboracion de propuesta técnica, socioeconómica y ambiental		2	2	2	2	2	2		2		2		2		2		2		2		2		2		2		2		5	5	5	5	5	5	5	5								
Tratamiento de aguas de minas y manejo de aguas de forma integral.									6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6								



