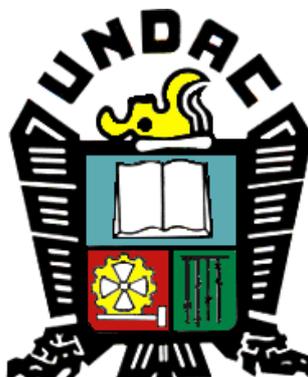


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



TESIS

**Flotación de zinc sin el uso de cal para la recuperación de
concentrado de zinc, en la Unidad de Producción
Andaychagua - Compañía Minera Volcan S.A.A.- 2019**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autor: Bach. Crysthian CORTEZ MARCELO

Asesor: Dr. Eduardo Jesús MAYORCA BALDOCEDA

Cerro de Pasco – Perú – 2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**Flotación de zinc sin el uso de cal para la recuperación de
concentrado de zinc, en la Unidad de Producción
Andaychagua - Compañía Minera Volcan S.A.A.- 2019**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

**Mg. José Elí CASTILLO MONTALVÁN
PRESIDENTE**

**M Sc. Ramiro SIUCE BONIFACIO
MIEMBRO**

**Mg. Manuel Antonio HUAMÁN DE LA CRUZ
MIEMBRO**

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por guiarme en el camino del bien en cada momento de mi vida, por haberme dado una maravillosa familia que han sido mi mejor inspiración para sobresalir adelante y lograr mis objetivos.

A mis padres, por darme la vida y por hacer de mí, una persona con principios y valores, por brindarme su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida ya sea en los malos y buenos momentos.

RECONOCIMIENTO

Le doy gracias a Dios por todas las bendiciones recibidas, y por haberme acompañado en los momentos más difíciles que se presentaron y permitirme culminar mi carrera.

A mis padres, que siempre me han guiado por el sendero del bien.

A la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión mi alma mater por recibirme como alumno para poder estudiar mi carrera.

A todos mis docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Metalúrgica por sus sabias enseñanzas.

RESUMEN

El tema del pH y las aguas acidas en los relaves de las plantas concentradoras de tratamientos de minerales, es un tema poco tratado en la curricula de nuestra Facultad, pero que resulta de suma importancia en el desarrollo de la minería en nuestro país. El implementar un proceso de Flotación de Zinc sin el uso Cal (CaO), es para evitar, enviar aguas residuales con demasiada alcalinidad al relave con una alta concentración de pH que oscilan entre 10,80 – 11,50, y estar dentro de los parámetros Ambientales en los efluentes mineros que son igual o menores a pH 9,00 y también evitando la contaminación de los ríos o lagos cercanos y los conflictos sociales con las poblaciones aledañas. También se lograría reducir costos en el proceso, exposición de personal a la manipulación de cal viva, tener un insumo menos fiscalizable y mantener o mejorar la calidad del concentrado de Zinc.

Esta investigación se centrar en plantear una solución al principal problema mencionado, y pretende aportar una solución a un problema que cada vez se hace más crítico en las diferentes empresas mineras, y también aportar a la preservación del medio ambiente con una minería menos contaminable y más responsable en sus procesos.

Palabras clave: flotación, recuperación

ABSTRACT

The issue of pH and acidic waters in the tailings of the mineral treatment concentrator plants is a topic that is not very much discussed in the curriculum of our Faculty, but which is of utmost importance in the development of mining in our country. The implementation of a Zinc Flotation process without the use of Cal (CaO), is to avoid, send wastewater with too much alkalinity to the tailings with a high pH concentration ranging Between 10,80 – 11,50, and be within Environmental parameters in mining effluents that are equal to or less than pH 9,00 and also avoiding pollution of nearby rivers or lakes and social conflicts with surrounding populations. It would also be possible to reduce costs in the process, exposure of personnel to the manipulation of quicklime, have a less controllable input and maintain or improve the quality of the zinc concentrate.

This research will focus on proposing a solution to the main problem mentioned, and aims to provide a solution to a problem that is becoming increasingly critical in different mining companies, and also contribute to the preservation of the environment with less contaminable mining and more responsible in their processes.

Keywords: flotation, recovery

INTRODUCCIÓN

La Legislación Peruana contempla que la alcalinidad de un efluente minero debe ser pH 9 y normalmente la etapa de flotación del circuito de zinc en un mineral polimetálico- que es equivalente a flotar sulfuros de cobre, aplica cal (CaO), en el proceso hasta un llegar a un pH superior a 10,50, esta alcalinidad normalmente se usa por tres razones: (A) Deprimir sulfuros de hierro. (B) Ayudar la actuación del colector xantato - Z11 y finalmente (C) Para equilibrar el uso del Sulfato de cobre, activador de esfalerita.

Esta situación que es persistentemente controlada por OEFA y que ha sido un gran tema para “VOLCAN COMPAÑÍA MINERA S.A.A.”.

El presente trabajo de investigación se refiere al estudio y etapas en la implementación de un proceso de flotación de zinc Sin Cal. (CaO) La cual se basa en la filosofía de seleccionar y optimizar el reactivo colector adecuado que permita una flotación suficientemente selectiva para No utilizar un depresor y así también mejorar la alcalinidad del pH en el relave.

Para ello se consideró a la planta Concentradora de minerales de Andaychagua de 3000 TMH/d, una planta de mediana minería para así poder aplicar según los resultados dados en plantas de gran minería o altos tonelajes de producción.

En el estudio a nivel laboratorio se aplicó diseño experimental en pruebas batch a dos reactivos de flotación: colectores tionocarbamatos F-1661, F-4277, todos de la marca

Flottec-Diamond; teniendo etapas de selección y optimización de variable; la cual sirvió como base para la etapa industrial (pruebas piloto).

En las pruebas piloto se realizó el seguimiento del proceso con el reactivo colector seleccionado, el cual químicamente es un tionocarbamato. Los resultados reportaron como Reactivo selectivo más conveniente al colector F-1661, manteniendo así la calidad y recuperación en la Flotación de Zinc y enviando un relave con aguas residuales de pH 7,50 – 8,30., que están dentro de los parámetros ambientales.

El trabajo presenta los siguientes capítulos:

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN: donde se presenta la identificación y determinación de problema y formulación del problema, los objetivos generales, específicos, la justificación de la investigación y limitaciones de la investigación.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO: se presenta los antecedentes del estudio, bases teóricas científicas, definición de términos básicos, la formulación de hipótesis, la identificación de las variables, la definición operacional de las variables e indicadores.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN: tipo de investigación, método de investigación y diseño de investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos, técnicas de procesamiento y análisis de datos.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN: descripción del trabajo de campo, que contiene el tratamiento de datos e interpretación de cuadros, presentación análisis e

interpretación de resultados, en el tratamiento de datos se consideró los resultados obtenidos, así como los análisis de los mismos, y prueba de hipótesis en la discusión de resultados se hizo una apreciación y discusión sobre los resultados finales obtenidos.

Al final presentamos las conclusiones y recomendaciones.

ÍNDICE

DEDICATORIA

RECONOCIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 1

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA 1

1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 2

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 2

1.3.1. Problema general 3

1.3.2. Problemas específicos 3

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS 4

1.4.1. Objetivo general 4

1.4.2. Objetivos específicos 4

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 5

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN 5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO 6

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO 7

2.2. BASES TEÓRICAS CIENTÍFICAS	8
2.2.1. Introducción a la flotación de minerales	9
2.2.2. Circuitos de flotación	13
2.2.3. Tipos de celda de flotación	15
2.2.4. Reactivos de flotación	16
2.2.5. Cinética de flotación	19
2.2.6. Controles de los parámetros de flotación	21
2.2.7. Mineralogía y flotación de Zinc	24
2.2.8. La pulpa de relave de flotación y la necesidad del De recuperar el agua	27
2.2.9. Impacto de la calidad del agua en la molienda para flotación	29
2.2.10. Colector xantato y alcalinidad en el proceso de flotación	30
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	32
2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	33
2.4.1. Hipótesis General	33
2.4.2. Hipótesis específicas	34
2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	34
2.5.1. Variable Dependiente	34
2.5.2. Variable Independiente	34
2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES	34

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN.

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	35
3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	36
3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	36
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	36
3.4.1. Población	36
3.4.2. Muestra	37
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	38
3.5.1. Los insumos a emplear	38
3.5.2. Los materiales a utilizar	38
3.5.3. Equipos	39
3.5.4. Métodos	39
3.5.5. Etapas y procedimiento	40
3.5.6. Etapas	40
3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	41
3.6.1. Procedimiento	41
3.7. ORIENTACIÓN ÉTICA	42
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO	43
4.1.1. Acerca de la Unidad Andaychagua	43
4.1.2. Accesibilidad	44
4.1.3. Geografía	44
4.1.4. Clima	45
4.1.5. Vegetación	45

4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	46
4.2.1. Pruebas metalúrgicas	46
4.2.2. Proceso industrial	48
4.2.3. Filosofía	49
4.2.4. Resultados balances metalúrgicos	50
4.2.5. Control del consumo de cal	51
4.2.6. Control del pH en el efluente final	49
4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS	53
4.3.1. Antes de la implementación del reactivo selectivo – flotación con cal	53
4.3.2. Después de la implementación del reactivo selectivo - flotación sin cal	54
4.3.3. Dosificación de reactivos en la flotación de Zinc sin adición de cal	56
4.3.4. Medición de pH en las etapas de flotación de Zinc Sin la adición de cal	56

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

El zinc ha experimentado una caída en los últimos años por diversos factores como el deterioro en las expectativas de crecimiento mundial como en China y otros países asiáticos consumidores de zinc; Por esto, grandes proyectos de inicio de operaciones de una mina polimetálica en Perú cuya producción fue mucho menor a la esperada de la subida del precio de este metal.

Posteriormente debido a que las leyes de los minerales valiosos disminuyan en la mina se vio en la obligación de extraer minerales de zonas con mayor contenido en leyes, sin embargo, al ser mezclado en proporción (50 – 50) % se obtiene un valor alto de minerales valiosos.

Por los aspectos antes mencionados y considerando la disminución de la dosificación de cal, el cual es usado en plantas de flotación para la depresión de minerales sulfurados de hierro (pirita), cobre y zinc; sin embargo, en otros casos afectan a los minerales valiosos, se conoce la deficiencia en la recuperación y calidad de su concentrado. A esto se suma las fluctuaciones en la economía de la minería de los polimetálicos. Por tal motivo, se busca mejorar el valor de la recuperación y calidad de sus concentrados.

1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La investigación se va desarrollar en la planta concentradora de la Unidad de Producción Andaychagua ubicada en el Centro Poblado Menor San José de Andaychagua, del Distrito de Huayhuay, Provincia de Yauli – La Oroya del Departamento de Junín, en el transcurso de sus operaciones, los ingenieros a cargo elaboraron el proyecto de flotar los minerales de zinc sin usar cal en el proceso de flotación de plomo, plata y zinc, en la que un pilotaje del proyecto tuvo como principal objetivo el incremento del tiempo de flotación, obteniendo de esta manera el incremento de recuperación de Pb-Ag, mínimo en un 2,5% para la Ag y 3,5% para el Pb así como una mejora de calidad de sus concentrados.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La Unidad de Producción Andaychagua, perteneciente a la Compañía Minera Volcan S.A.A., es una Empresa Polimetálica. En donde en la flotación de Zinc se utiliza Cal para la elevación de pH de (8,50 – 9,50) a (11,30 – 11,80), para obtener

buenos resultados en la recuperación y calidad de concentrado de Zinc, y evitar la activación de la pirita. Enviando aguas residuales al relave con un pH de (10,50 – 11,30) aumentando la contaminación del medio ambiente e incrementando el costo de la purificación del agua de relave para su eliminación al medio ambiente con un pH de ($\leq 9,00$). El consumo de Cal en la Planta Concentradora Andaychagua está en un rango de (0,55 – 0,78 kg/tn), en el cual se quiere reducir o eliminar debido a lo siguiente:

- Elevado pH en las aguas residuales del proceso.
- Costo operativo por tratamiento previo de la cal.
- Alto costo de consumo de cal.
- Exposición de personal a la preparación de Cal viva.
- La Cal es un reactivo fiscalizable.

1.3.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cómo realizar la flotación de zinc sin el uso de cal para la recuperación de concentrado de zinc, en la unidad de producción andaychagua?

1.3.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

1. ¿En cuánto mejorara la calidad y la recuperación del Concentrado de Zinc, sin la utilización de Cal como modificador de pH en la Unidad de Producción Andaychagua?
2. ¿Cuál es el pH óptimo para la flotación de Zn con el empleo de reactivos selectivos del proceso en la Unidad de Producción Andaychagua?

3. ¿En cuánto reducirá la utilización de xantatos (Z6 - Z11) en la flotación de Zinc en la Unidad de Producción Andaychagua, en la Planta Concentradora de la Compañía Minera Volcán?

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar la flotación de zinc sin el uso de cal para recuperar el concentrado de zinc, en la Unidad de Producción Andaychagua

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Mejorar la calidad y la recuperación del Concentrado de Zinc, sin la utilización de Cal como modificador de pH en la Unidad de Producción Andaychagua.
2. Determinar el pH óptimo para la flotación de Zn con el empleo de reactivos selectivos del proceso en la Unidad de Producción Andaychagua.
3. Reducir la utilización de xantatos (Z6 - Z11) en la flotación de Zinc en la Unidad de Producción Andaychagua

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Las razones por la cual se dio origen a la realización del presente Estudio de Investigación, es que en la Compañía Volcan en su Unidad de Producción Andaychagua (Planta Concentradora), donde se realiza el procesamiento de minerales Polimetálicos de Plomo (Pb), Cobre (Cu), Zinc (Zn) y Plata (Ag) por flotación, se observa que el pH en las aguas residuales del proceso son muy elevados llegando a pH de (11,30 – 11,80), siendo estos muy alto para los parámetros ambientales que es $\text{pH} (\leq 9,00)$, y contaminación al medio ambiente.

Razón por la cual se considera estudiar e investigar el proceso de la flotación de Zinc sin el uso de Cal con la ayuda de reactivos selectivos para poder obtener un pH bajo en las aguas residuales y así poder reducir costos para el proceso con la no utilización de la Cal. Por lo tanto, en el proceso de flotación de Zinc es importante ver alternativas para reemplazar el colector “Xantato” por un colector más selectivo que nos permita mantener la performance metalúrgica de Zinc, pero sin el uso de cal y así aportaríamos en la reducción de costos por el tratamiento de la Cal y horas hombre en la preparación del mismo.

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación está relacionado a bajar los costos en el uso de los reactivos motivo por el cual se está procesando los minerales sin uso de la cal, ya que a pH del mineral será suficiente para obtener el zinc.

En el desarrollo de la investigación hemos tenido como limitaciones la falta de algunos equipos de laboratorio como es Microscopio, falta de reactivos en el laboratorio químico – metalúrgico, pero gracias al pedido enérgico de jefe de laboratorio nos proporcionaron haciendo con ello factible la presente investigación, y otros equipos faltantes no fueron impedimento para el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El segundo capítulo es referido al marco teórico, el cual está dedicado a los antecedentes, el marco contextual y las bases teóricas, el mismo que consiste en la realización del estudio teórico previo en el que desarrollamos los aspectos más fundamentales de los avances tecnológicos y científicos, materia de estudio vinculado a la propuesta de esta tesis.

2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO

La Legislación Peruana contempla que la alcalinidad de un efluente minero debe ser pH 9 y normalmente la etapa de flotación del circuito de zinc en un mineral

polimetálico que es equivalente a flotar sulfuros de cobre aplican cal en el proceso hasta un pH superior a 10, esta alcalinidad normalmente se usa por tres razones:

- (1) deprimir sulfuros de hierro
- (2) ayudar la actuación del colector xantato Z11 y finalmente
- (3) Para equilibrar el uso del Sulfato de cobre, activador de esfalerita.

Esta situación que es persistentemente controlada por OEFA y que ha sido un gran tema para VCMSAA ya fue recientemente superada en dos de tres plantas de Volcan Unidad – Yauli (Mahr Tunel y Andaychagua). Las pruebas de investigación batch y prueba industrial corta y definitiva fue desarrollada en un trabajo conjunto entre personal técnico de las empresas Flotecc- Diamond y Metalurgistas de Investigaciones de Laboratorio Metalúrgico Mahr Tunel de V.C.M.S.A.A. Unidad Yauli, el resultado final es que ya desde octubre 19 de 2016 se opera con circuito de flotación de zinc con las siguientes características:

- (a) Cero consumos de cal,
- (b) Uso de colector líquido reemplazando al xantato,
- (c) Incorporando un solo punto de dosificación de reactivo; alcanzando excelentes resultados de flotación de zinc en un esquema simplificado con menos exposición del personal al peligro de manipuleo de cal viva y adicionalmente significando un ahorro en reactivos de flotación típicos de un circuito de zinc de aproximadamente 0,5 US\$/TM.

2.2. BASES TEÓRICAS CIENTÍFICAS

La filosofía de la flotación de Zinc sin la utilización de cal, consiste en la flotación del Zinc a pH bajos de (8,50 – 9,50), sin la adición de Cal y usando reactivos bien

selectivos para evitar la flotación de la pirita (Fe). Los reactivos que dan credibilidad para poder flotar el Zinc a pH bajos para mantener o mejorar la calidad y recuperación en el proceso de flotación de Zinc son de la marca FLOTTEC, la cual está representada en el Perú por la empresa “DIAMON”.

La flotación del Zinc sin Cal nos ayuda considerablemente en el tema ambiental de los parámetros de las aguas residuales del proceso. Ya que el asunto ambiental es uno de los puntos más importantes en la minería actual, lo cual exige cada vez menos contaminación al medio ambiente ya sea por el medio líquido o en el aire.

La no utilización de la Cal en esta flotación de Zinc, nos ayuda a conseguir pH bajos en las aguas residuales del proceso, también reducir considerablemente los gastos que se dan en la Planta Concentradora con la obtención de la cal, transporte de la misma, tratamiento previo a su utilización y gastos por ser un reactivo fiscalizable. También reduciremos los costos de tratamiento de las aguas residuales del relave para su liberación al medio ambiente. La utilización de reactivos selectivos nos ayudara a mantener la calidad y la recuperación en la flotación de Zinc y Concentrado de Zinc, para dejar de depender de la Cal como un modificador de pH para poder alcanzar las recuperaciones y calidades de concentrado deseados para el proceso. El bajo pH en las aguas residuales podrá ser aprovechado también para ser recirculado nuevamente al proceso, evitando problemas en Planta Concentradora por desabastecimiento de agua de interior mina.

2.2.1. INTRODUCCIÓN A LA FLOTACIÓN DE MINERALES

La flotación es uno de los procesos más selectivos para la separación de especies sulfurosas, y de Plomo- zinc y cobre – zinc.

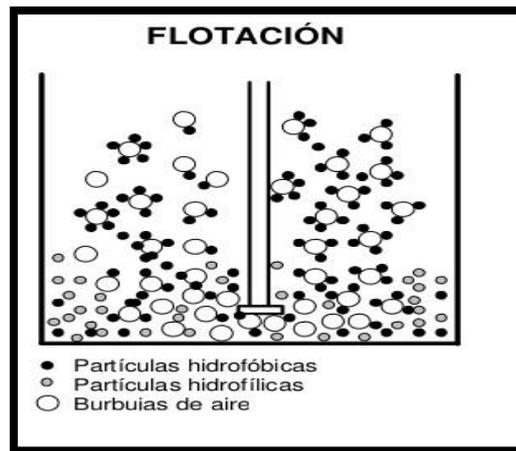
La separación de las especies a través del proceso de flotación, se produce gracias a la diferencia en las propiedades fisicoquímicas de la superficie de cada una de ellas. La flotación surgió a partir del proceso de separación en medios densos, ya que la dificultad para la obtención de fluido con algunas densidades particulares obligó a la utilización de modificadores de superficie, con el fin de mejorar la selectividad del proceso.

Estos modificadores permiten convertir selectivamente en hidrofóbica la especie a separar, de tal forma que ante la presencia de un medio constituido por agua y aire (burbujas), la especie hidrofóbica rechaza el agua y se adhiere a las burbujas de aire que ascienden hacia la superficie del líquido (Wills, 1997).

Las fases que intervienen en este proceso son: sólido (partículas finamente molidas), líquido (agua y reactivos) en la que están inmersas las partículas, y gas (aire) que se introduce dentro de la pulpa formando pequeñas burbujas. Para que ocurra la flotación, las partículas deben ser capaces de adherirse a las burbujas, sólo si logran desplazar el agua de la superficie del mineral, por lo que es necesario que la especie de interés sea, en alguna medida, repelente al agua o hidrófoba. Siempre y cuando el agregado de partículas - burbujas tenga una densidad global inferior a la del medio de separación, éstas podrán viajar hacia la superficie. No obstante, se requiere que la burbuja tenga la resistencia suficiente para llegar a la superficie sin romperse. Una vez que las

burbujas alcanzan la superficie, es necesaria la formación de una espuma que mantenga retenida a las partículas, porque de lo contrario las burbujas se reventarán y las partículas flotadas viajarán de nuevo hacia el fondo de la celda de flotación.

Figura N° 2.3: diagrama de flotación



Fuente: Elaboración propia

La agitación favorece la separación y suspensión de las partículas, mientras que la inclusión de aire promueve la formación de burbujas. La recuperación de la especie valiosa depende de la cantidad de partículas transportadas a la superficie (flotadas), por lo tanto, la estabilidad y el tamaño de las burbujas de aire que las transporta influyen directamente en la recuperación.

En un proceso en el que se produzcan muchas burbujas pequeñas se obtendrá una mayor recuperación que, si se producen burbujas más grandes y en menor cantidad, ya que la recuperación depende del área superficial de las burbujas disponibles para que las partículas se adhieran a ellas.

La actividad de la superficie de una partícula respecto a los reactivos de flotación en el agua, depende de las fuerzas que actúan en su superficie. Las

fuerzas de tensión generan un ángulo entre la superficie de la partícula y la superficie de la burbuja, de tal forma que:

$$f_{s/a} = f_{s/w} + f_{w/a} \cdot \cos \theta$$

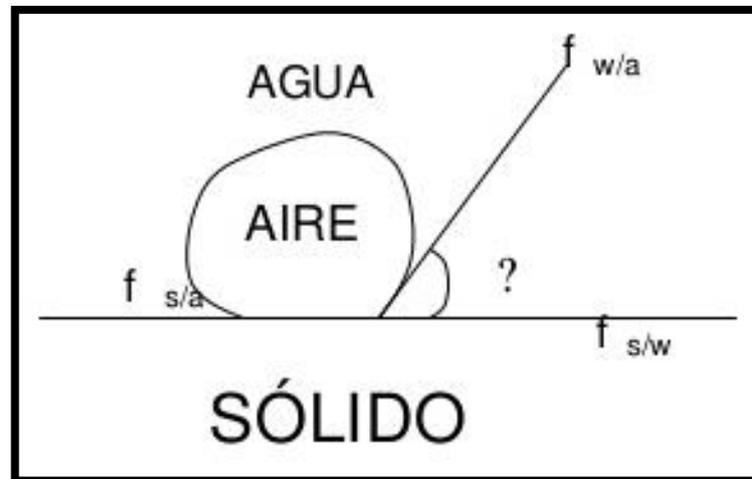
De donde:

$f_{s/a}$, es la energía superficial entre las fases sólido – aire.

$f_{s/w}$, es la energía superficial entre las fases sólido – agua.

$f_{w/a}$, es la energía superficial entre las fases agua – aire.

Figura N° 2.4: Ángulo de contacto



Fuente: Elaboración propia

Para romper la interfaz partícula - burbuja es necesario aplicar una fuerza, conocida como trabajo de adhesión ($W_{s/a}$), el cual es igual al trabajo necesario para separar la interfaz sólido aire y producir las interfaces separadas aire – agua y sólido agua, es decir:

$$W_{s/a} = f_{w/a} + f_{s/w} - f_{s/a}$$

Por lo tanto,

$$W_s/a = f w/a (1 - \cos\theta)$$

El tamaño de las partículas es otro de los parámetros fundamentales en el control de la recuperación: Entre más pequeñas sean las partículas, mayor cantidad de partículas. Mientras mayor sea el ángulo de contacto mayor será el trabajo de adhesión entre la partícula y la burbuja y mayor será la elasticidad del sistema ante las fuerzas de rompimiento, por lo tanto, la flotabilidad del sistema aumenta con el ángulo de contacto. Un mineral con un ángulo de contacto grande tiene un comportamiento aerofílico (mayor afinidad con el aire que con el agua), a pesar de que la mayor parte de los minerales son aerofílicos, es necesario agregar un colector para mejorar su hidrofobicidad (haciéndolos aún más aerofílicos), para que el proceso de separación sea más efectivo.

IMPORTANTE: La flotación difícilmente será reemplazada en los próximos años, su relevancia en el procesamiento de los minerales aún no ha sido medida en su verdadera magnitud. Este proceso tiene gran influencia en la metalurgia extractiva ya que sin él difícilmente hubiera podido desarrollarse sistemas posteriores, como los de tostación, conversión, fusión y refinación para obtener metales de consumo; y, en general, la minería no mostraría los niveles actuales de desarrollo, que permiten elevar el volumen de reservas minerales abriendo la posibilidad de flotar minerales de contenido químico valioso más bajo.

2.2.2. CIRCUITOS DE FLOTACIÓN

Los parámetros principales para evaluar los procesos de concentración son los siguientes:

- El concepto de “ley” de un material se refiere al porcentaje en peso del componente valioso referido al total de la muestra.
- El concepto de “recuperación” de un cierto componente valioso (Cu, Mo, etc.) en un proceso de concentración determinado, se refiere al porcentaje de “contenido de fino” (peso de Cu, Mo, etc. en la muestra) recuperado en dicho proceso (o etapa) en cuestión.

En general, las leyes de los productos y la recuperación metalúrgica son los parámetros más utilizados. En ambos casos se trata de maximizar estos valores, pero en la práctica se debe optar por valores que maximicen el “óptimo económico” del proceso. Lo anterior se debe a que estos parámetros se relacionan de manera inversa.

Este aspecto conduce a especializar diferentes etapas del proceso, destinadas a maximizar uno de los dos factores, con el fin de alcanzar un objetivo global técnico-económico de recuperación y ley de concentrado. Es así como se definen etapas de flotación según su objetivo, de la siguiente manera:

- Flotación primaria o rougher: destinada a maximizar la recuperación o más estrictamente a producir un relave lo más desprovisto posible de las especies de interés.
- Flotación de limpieza o cleaner: destinada a maximizar las leyes de concentrado con el fin último de alcanzar la pureza requerida en el

producto final de la planta. Puede tenerse más de una de estas etapas, nominadas como 1ª limpieza, 2ª limpieza, etc.

- Flotación de barrido o de agotamiento o de repaso o scavenger: destinada también a maximizar la recuperación. Suele ir a continuación de alguna de las etapas anteriores retratando sus relaves. Se habla entonces de: scavenger-cleaner o scavenger-rougher, según sea el caso. Su objetivo es extremar al máximo la recuperación de cualquier partícula residual que quede en los relaves que trata.

Dependiendo de la especie de la que se trate y del tipo de máquinas de flotación involucradas, se tendrán diversas configuraciones de circuitos posibles, los que involucrarán bancos de celdas mecánicas en serie, varios de ellos en paralelos (para dar la capacidad de tratamiento requerida), columnas de flotación e incluso etapas intermedias de remolienda de concentrado.

2.2.3. TIPO DE CELDA DE FLOTACIÓN

La celda de flotación es un reactor donde se produce el contacto burbuja-partícula, la adhesión entre ellas y la separación selectiva de especies. El buen funcionamiento de este equipo se basa en una adecuada dispersión y distribución del aire y de las partículas en su interior, formación y remoción de la espuma, de tal manera que los productos generados (concentrado y relave) cumplan con las necesidades requeridas de leyes y recuperaciones. Se pueden clasificar en celdas mecánicas y neumáticas.

En una misma categoría de celda de flotación, existen diferencias, principalmente en la geometría del equipo, la forma y diseño mecánico del impeler, la forma de los dispersores para romper el aire en burbujas, rangos de variación de la velocidad de agitación y flujo de aire. En consecuencia, un cambio en alguno de estos factores provoca diferencias en las condiciones hidrodinámicas al interior de la celda.

- a) Celdas mecánicas. Se caracterizan por tener un impeler movido en forma mecánica, el cual agita la pulpa y dispersa y distribuye el aire en la pulpa. Son generalmente utilizados para etapas de flotación primaria y de repaso, puesto que entregan una mayor recuperación de concentrado, con la consecuente disminución en ley. Estos equipos pueden ser autoaereados, donde el aire es inducido a través de la depresión creada por el impeler, o con aire a presión, donde el aire es introducido por un soplador externo.
- b) Celdas neumáticas. Este tipo de equipos no tiene impeler y utiliza aire comprimido para agitar y airear la pulpa. Las más usadas son las celdas de columna, en las cuales existe un flujo contracorriente de burbujas y pulpa. Son generalmente usados en etapas de limpieza, porque entregan mejores leyes de concentrado.

2.2.4. REACTIVOS DE FLOTACIÓN

Los reactivos usados en la flotación de minerales pueden ser clasificados principalmente en tres tipos: colectores, espumantes y modificadores.

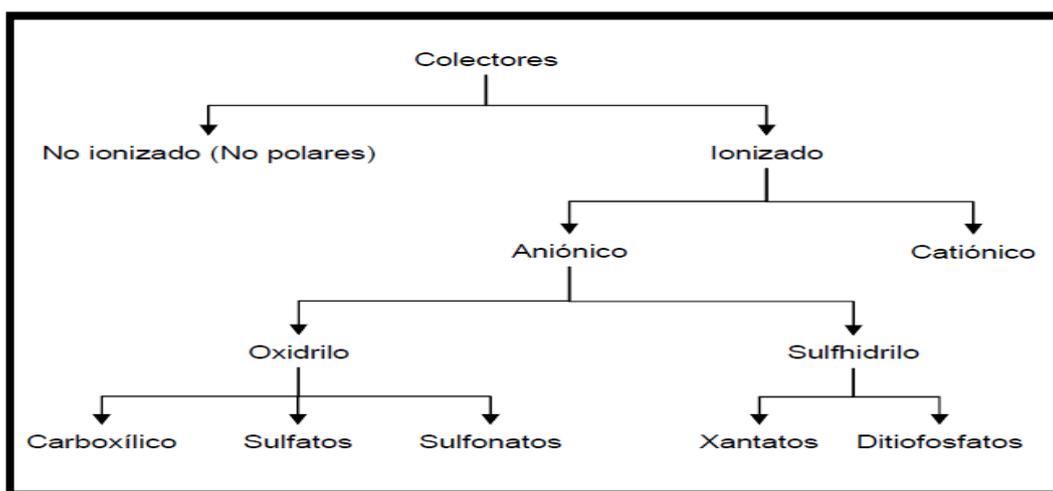
- a) Colectores

Los colectores son compuestos orgánicos usualmente heteropolares solubles en agua. En general, el grupo polar es la parte del colector que se adsorbe en la superficie del mineral mientras que la cadena de hidrocarburos, siendo no-iónica por naturaleza, provee hidrofobicidad a la superficie del mineral después de la adsorción del colector. Los colectores se clasifican según el grupo funcional o en el tipo de mineral colectados. En la Figura se presenta un esquema con los subgrupos de colectores.

Los colectores no polares o no ionizados son reactivos que no poseen grupos polares.

Son fuertemente hidrófobos y se utilizan en la flotación de minerales con características pronunciadas de hidrofobicidad, como carbón, grafito, azufre y molibdenita.

Figura N° 2.5: Clasificación de colectores



Fuente: Elaboración propia

En tanto, los colectores iónicos contienen un grupo funcional polar hidrófilo (ión colector que se orienta y adsorbe en la superficie del mineral) unido a una cadena de hidrocarburos (parte no polar hidrófoba que se orienta hacia la fase gaseosa). Al disociarse en agua, el ión puede ser un anión o catión, distinguiéndose entonces dos tipos de colectores iónicos: catiónicos y aniónicos.

Los colectores catiónicos más usados en la industria son las aminas. En solución, estos reactivos se disocian de modo que sus radicales con nitrógeno forman el catión, mientras el anión es un hidroxilo.

Los colectores aniónicos se disocian de modo que sus radicales junto con el grupo polar constituyen un anión, dejando en solución un catión. Estos se dividen en oxidrilos, tales como carboxilos (ácidos grasos), sulfatos y sulfonatos, y en sulfhídricos, como xantatos, tiofosfatos y tiocarbamatos.

b) Espumantes

Son compuestos orgánicos heteropolares, con gran afinidad con el agua. Son tensoactivos, es decir, son reactivos que se adsorben selectivamente en la interfase gas-líquido, reduciendo la tensión superficial. Permiten la formación de una espuma estable y la generación de burbujas pequeñas. Los más usados son los alcoholes, ácidos, poliglicoles y aminas.

c) Modificadores

Son reactivos que generan condiciones que mejoran la colección o selectividad del proceso. Se pueden dividir en tres tipos: activadores, depresantes y modificadores de pH.

Los activadores son reactivos que permiten aumentar la adsorción de los colectores sobre la superficie de los minerales o fortalecer el enlace entre

la superficie y el colector. Ejemplos de ellos son el sulfato de cobre y el sulfuro o sulfhidrato de sodio.

Los depresantes son reactivos que sirven para disminuir la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrófila o impidiendo la adsorción de colectores. Entre estos están el cianuro de sodio o calcio, cromatos y bicromatos y sulfuro de sodio.

Dentro de los modificadores de pH utilizados en flotación industrial se encuentran la cal viva (CaO) o cal apagada (Ca(OH)₂), la soda ash (Na₂CO₃), la soda caustica (NaOH) y el ácido sulfúrico (H₂SO₄).

2.2.5. CINÉTICA DE FLOTACIÓN

La ecuación cinética de flotación batch, desarrollada originalmente por García – Zúñiga (1935) se presenta a continuación.

Donde:

- ✓ R: recuperación acumulada para el tiempo t de flotación [%].
- ✓ k: constante cinética [1/min].
- ✓ R_∞: Recuperación a tiempo infinito [%]. Corresponde a la máxima recuperación obtenible de la especie o elemento de interés, para las condiciones dadas.
- ✓ t: tiempo de flotación [min].

Figura N° 2.6: Algoritmo matemático

Algoritmo matemático	Nombre del modelo
$R_t = R_\infty (1 - e^{-k \cdot t})$ $\ln \left(\frac{R_\infty - R_t}{R_\infty} \right) = -k \cdot t$	García – Zúñiga

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros R y k son característicos de cada componente flotable (por ejemplo, Cu, Mo, Fe), dependiendo también de cada etapa de flotación (rougher, cleaner, recleaner, scavenger, etc.) y de las características propias del mineral (granulometría, grado de liberación), condiciones de operación (pH, tipo y dosis de reactivos de flotación, velocidad de agitación, flujo de aire, diseño de la celda, etc.) debiendo por tanto determinarse para cada situación en particular, y para cada componente de la mena. Otra fórmula de mayor utilización por su mejor ajuste es la propuesta por Klimpel - (Sepúlveda y Gutiérrez, 1986):

Figura N° 2.7: Formula de Klimpel

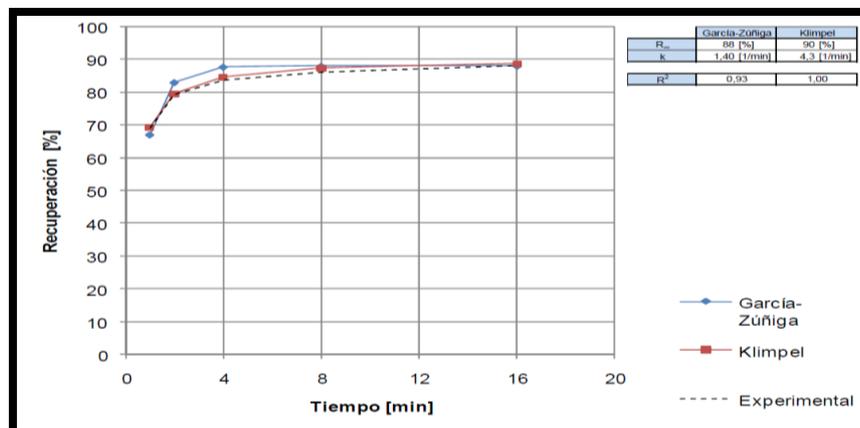
$$R_t = R_\infty \cdot \left[1 - \frac{1}{k} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \right]$$

Klimpel

Fuente: elaboración propia

Notar que la constante cinética de la ecuación desarrollada por García y Zúñiga es distinta a la encontrada por Klimpel, pero ambas son de primer orden. En la Figura se grafican ambas ecuaciones.

Figura N° 2.8: Gráfica de las ecuaciones de Klimpel



Fuente: Elaboración propia

2.2.6. CONTROLES DE LOS PARÁMETROS DE FLOTACIÓN

Para operar eficientemente un proceso de flotación se requiere considerar los siguientes aspectos básicos:

- a. Los reactivos (colectores, espumantes, modificadores) deben ser de calidad y pureza reconocida controlados en cantidad con un adecuado sistema dosificador. Asimismo, las concentraciones de preparación deben ser verificadas con densímetros de vidrio.
- b. En lo posible, no se deberá agregar depresores y colectores en un mismo punto; menos, si son depresores incompatibles como el Cianuro de sodio y Bisulfito de sodio.
- c. Los relaves de la etapa de limpieza requieren generalmente, remolienda; y, para estabilizar circuitos este remolido deberá ser recirculado a la cabeza CERRANDO CIRCUITO. No hay peor evento que el recircular productos intermedios sin generar otro tipo de superficies, como ocurre en remolienda; y, será mejor acondicionar previamente.
- d. Si existe circuito ABIERTO se deberá cuidar ese remolido ya que generalmente es de alta ley que puede desestabilizar el relave final; salvo, se instale un nuevo circuito de agotamiento previo. En términos simples, no se debe abrir un circuito si no hay disponibilidad de un banco de flotación que agote este nuevo flujo remolido antes de hacer un descarte a relaves finales.
- e. De ser posible, se deberá elegir un solo colector principal. Hay que considerar que el 80% de la flotación mundial usa xantato isopropilico de sodio o Z-11, típico para su operación: A-31 para Uchucchaccua; Z-11

para Brocal; A-125 para Milpo; A-238 para Condestable; Z-11 para Raura, Atacocha y las unidades de Volcan (Andaychagua, Mahr túnel, Carahuacra). Se recomienda no usar productos que tengan como base el ácido cresílico por ser un producto dañino para la salud y, porque, además, tiene comportamiento inestable en flotación. Se conoce que el ácido cresílico no siempre tiene el mismo contenido de cresoles, fenoles y xilenoles. Es amorfo y su composición es indefinida.

- f. Investigar y probar a nivel industrial mezclas de reactivos auxiliares. Ejemplos: en Huarón es 208/A31, en Huanzalá es MIBC/A208; en SIMSA es A1404/Z11, en Atacocha es MIBC/tionocarbamato. En Condestable A238 con Aerophine 3418.
- g. Considerar que el mineral abastecido es fundamental. Si hay óxidos, los relaves serán altos. Si en flotación polimetálica hay sales solubles de cobre, los desplazamientos de zinc al concentrado de plomo serán mayores a lo normal. Será importante conocer la mineralización de valiosos y ganga que se procesarán por flotación, en el día a día, mes a mes y la proyección por lo menos del año.
- h. El reactivo apropiado para neutralizar las sales solubles de cobre es la Cal; pero, el más energético y, posiblemente el más efectivo es la soda cáustica. Pero, sí, como es común, no se puede controlar la acción de las sales solubles de cobre, será necesario preparar una mezcla adecuada o blending de tipos de minerales a fin de atenuar el problema.
- i. Definir adecuadamente granulometría de molienda a la cual ya estén liberados los valores de las gangas. Este último, por Microscopía de Opacos en la descarga de molienda primaria. Estas cargas circulantes y

corte de clasificación deberán proveer a la flotación partículas minerales valiosas suficientemente liberadas.

- j. Definir también necesidades de remolienda; y si es de espuma scavenger, remoler relaves de limpieza o una mezcla de ambos, las cuales se denominan mixtos de flotación. También puede ser importante remoler espumas de la primera etapa de flotación. En general, el remolido de espumas de flotación rougher se aplica en la gran minería del cobre.
- k. Definir el pH en las etapas de flotación. En lo posible regular con lechada de cal en circuito cerrado y control automático. Por razones de seguridad y cuidado de la salud la cal sólida deberá ser hidratada y no debe manipularse cal viva. Cuando la cal no es de calidad reconocida presenta residuos de carbón que consumirán Xantato desestabilizando frecuentemente los consumos de este colector. El pH de la cal tiene un límite máximo. Considerar que la adición de soda caustica en una relación en peso de 20:1 cuando se prepara lechada de cal permite obtener un producto que maneja mejor el control y el resultado de los concentrados a un menor consumo relativo de cal.
- l. Recuperar el agua de concentrados y relaves buscando el punto más adecuado para recircularlas por su contenido de iones y su pH. La relación de uso de agua en los procesos de flotación es muy alta (4TM de agua por 1TM de mineral). No siempre hay disponibilidad de agua fresca por lo que la re-utilización de aguas industriales se torna en una necesidad cada vez más importante en minería. La separación del agua y el mineral depende de un floculante adecuado que sedimente sólidos hasta que las aguas recuperadas tengan no más de 20 ppm de sólidos. Este concepto constituye

- una forma práctica de evitar excesos en el uso de reactivos de flotación y recuperar la mayor cantidad de agua para volverla a usar en el proceso.
- m. Si el circuito de flotación de desbaste (rougher) recibe más carga de lo establecido según determinado tiempo de flotación, las etapas de limpieza también deben crecer en volumen para incrementar el tiempo de retención efectiva por celda y evitar que las cargas circulantes se hagan incontrolables.
- n. Para disminuir el contenido de insoluble en concentrados es necesario instalar celdas columna como limpiadoras. Los chisguetes de agua bien suministrados sobre una etapa de limpieza de celdas comunes también pueden resultar efectivos como parte inicial de una prueba industrial o aplicar reactivos orgánicos (CMC, Dextrina) solas o en mezcla con silicato de sodio.

Las celdas columna se usan en limpieza de flotación de minerales de cobre para disminuir el contenido de insolubles. Para limpiar sulfuros de hierro (pirita-pirrotita) en concentrados polimetálicos normalmente se prefiere utilizar celdas tradicionales con rotor-impulsor y aire externo.

2.2.7. MINEROLOGIA Y FLOTACION DE ZINC

La flotación de esfalerita es un proceso antiguo típico conocido, diferencial y selectivo; generalmente es la etapa final de un proceso anterior de flotación bulk plomo-cobre o de solo cobre; sobre el proceso de flotación de zinc se tienen pautas importantes y son las que a continuación se indica.

Figura N° 2.9: Mineralogía sistemática de sulfuros

MINERALOGÍA SISTEMÁTICA ► NO SILICATOS				
SULFUROS				
Sulfuros	Galena	PbS	Cúb	mena de Pb
	Esfalerita	ZnS	Cúb	mena de Zn
	Cinabrio	HgS	Trig	mena de Hg
	Pentlandita	(Ni,Fe) ₉ S ₈	Cúb	mena de Ni
	Pirita	FeS ₂	Cúb	prod. sulfúrico
	Molibdenita	MoS ₂	Hex	mena de Mo
	Calcopirita	CuFeS ₂	Tet	mena de Cu

Fuente: Elaboración propia

La mineralogía de los valores de zinc es importante para la selección de reactivos necesarios, existen distintos tipos de esfalerita y que responden de diferente modo en un circuito de flotación:

- (a) Esfalerita tipo 2 que son finas inclusiones de calcopirita en esfalerita y que una presencia excesiva significara activación de zinc en la flotación bulk anterior.
- (b) Esfalerita del tipo 3 que presentan finas inclusiones de pirrotita o sulfuro de hierro en la matriz de esfalerita que provocaran alto contenido de hierro y bajos grados de zinc.
- (c) Esfalerita del tipo 4, covelita o sulfuro secundario invadiendo la matriz de esfalerita significara prácticamente sulfato de cobre en la pulpa por tanto una gran activación de zinc en una etapa bulk.

- (d) Esfalerita del tipo 5 con sulfosales de plata en la misma matriz de la esfalerita significa un alto desplazamiento de plata al concentrado de zinc que en el bulk anterior.

El depresor de esfalerita en una flotación anterior bulk plomo-cobre es el reactivo sulfato de zinc y el activador de esfalerita en un circuito de zinc es el sulfato de cobre, la calidad de ambos productos sulfatos es importante para marcar una selectividad adecuada en el proceso de flotación.

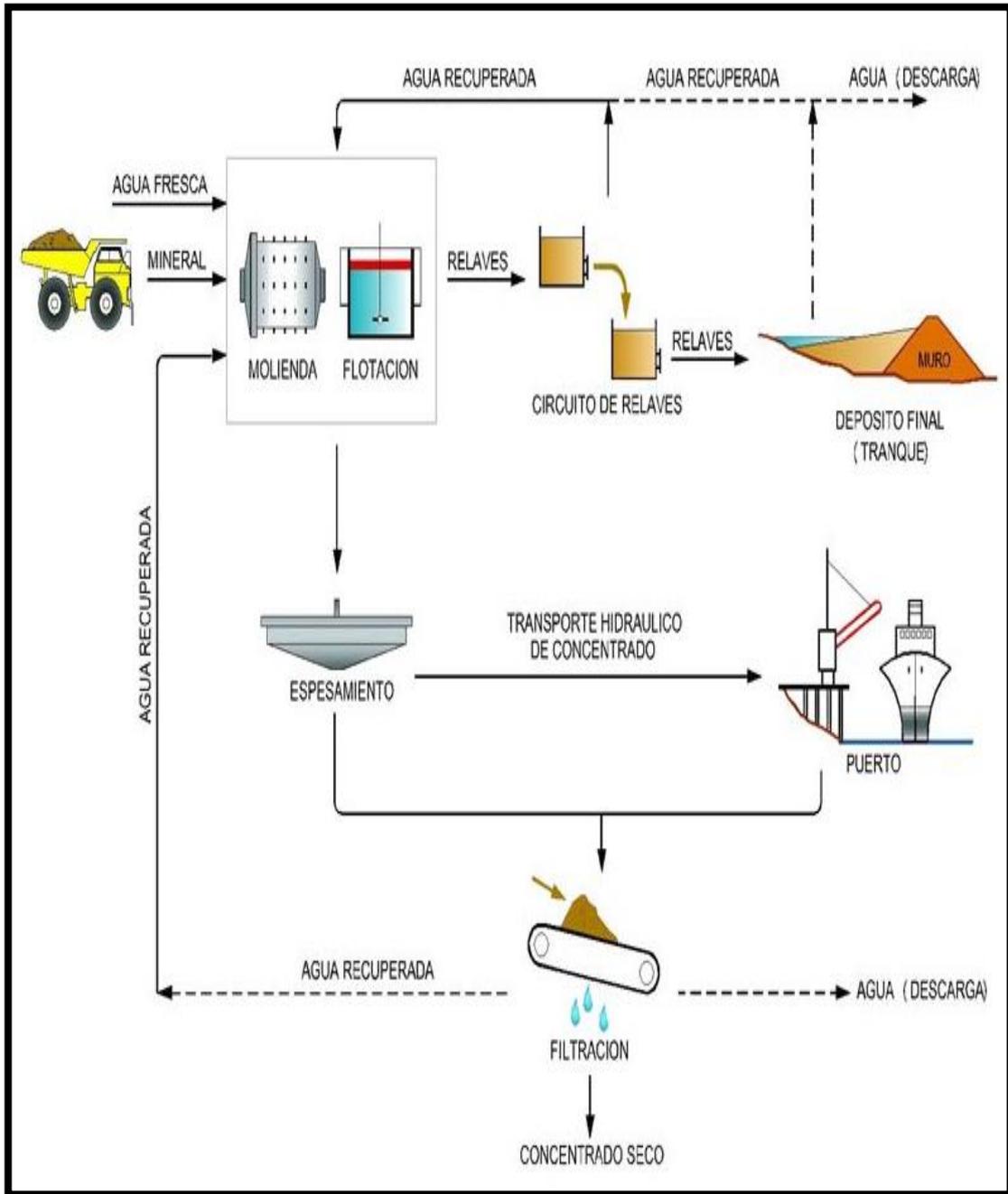
La calidad del reactivo sulfato de cobre pentahidratado, activador de esfalerita en flotación del circuito de zinc debe ser pureza mayor a 98% como sulfato y una muestra diluida en agua al 10% en peso debe tener un pH igual o mayor a 4.

El consumo de cal en la flotación de zinc está muy ligado a la calidad del activador sulfato de cobre y en general es directamente proporcional a su consumo. Un exceso de consumo de cal es causa de un mayor consumo de sulfato de cobre y viceversa.

El consumo de cal en un circuito de flotación de zinc es necesario para:

- (a) Ajustar alcalinidad de la pulpa y deprimir sulfuros de hierro,
- (b) Permitir la adecuada acción del colector xantato Z11, en la pulpa y en presencia de CaOH el xantato se transforma en dixantogeno que es el verdadero ente colector de flotación de sulfuros y,
- (c) para equilibrar la acción del activador de esfalerita, sulfato de cobre.

Figura N° 3.3: diagrama de flujo de la planta concentradora de Andaychagua



Fuente: Elaboración propia

2.2.8. LA PULPA DE RELAVE DE FLOTACIÓN Y LA NECESIDAD DE RECUPERAR EL AGUA

La pulpa de relave de flotación contiene 25% de sólidos es decir el resto 75% en peso es agua o líquido; en general el consumo de agua de una planta de flotación de sulfuros es entre 2 a 3 partes de agua por 1 de mineral tratado.

Por eso es importante considerar que:

Las aguas de los relaves se recuperan muy rápidamente de un sistema de sedimentación que puede ser espesador o un Cono Profundo, por lo tanto, estas aguas contienen necesariamente floculante que ayuda a sedimentar los sólidos y recuperar la parte líquida con mayor velocidad.

Es importante saber que los excesos de floculante en aguas recirculantes recuperadas de espesadores afectan el sistema de flotación, estos floculantes deben ser optimizados siempre para usar una cantidad mínima.

Importante considerar que las aguas recuperadas de espesadores, balancean la necesidad de líquido en planta industrial en no menos de 50% del tonelaje de mineral tratado, el impacto es muy fuerte por lo tanto el tratamiento de aguas de relave es un tema relevante e importante.

Si se tiene poco control en la dosificación de sulfato de cobre durante la flotación de zinc, las aguas recuperadas de espesadores de relaves podrían contener iones cobre y hierro, el cobre iónico afectaría la selectividad en una flotación bulk plomo-cobre activando excesivamente esfalerita y obligando a un mayor consumo de cianuro en la etapa de flotación bulk plomo-cobre.

El exceso de cal en flotación de zinc finalmente retornaría con las aguas recirculantes afectando las tuberías por encostramiento o “encalichamiento” perdiendo control en la importante relación agua/mineral en molienda-

clasificación. Por lo anterior para un circuito de flotación de zinc es prioritario mantener un sistema de dosificación de lechada de cal muy preciso y calibrado constantemente.

2.2.9. IMPACTO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA MOLIENDA PARA FLOTACIÓN.

Los circuitos de molienda-clasificación son muy importantes para lograr una liberación efectiva de valores sulfuros metálicos, una correcta operación de este circuito pasa por mantener en equilibrio el porcentaje de sólidos en pulpa de mineral.

Por eso en molienda-clasificación es importante considerar lo siguiente:

El chancado de mineral que es la etapa anterior a la molienda es prácticamente en seco o con baja humedad; la siguiente etapa de reducción de tamaño es molienda y clasificación, el 70% del consumo de agua se usa en esta etapa para obtener una pulpa que contenga sólidos minerales molidos y liberados que finalmente serán el alimento a flotación.

En un circuito de molienda-clasificación el control más importante es el tonelaje de mineral fresco alimentado a molienda, si este tonelaje es controlado, estará enlazado a una válvula de agua que alimentará agua a la entrada del molino para mantener una densidad de pulpa estable, esto se llamará la relación agua/mineral en molino y debe ser lo más constante posible.

La clasificación se realiza en nido de hidrociclones, es importante que la densidad de pulpa que ingresa a la clasificación sea constante, dosificaciones de agua en el cajón que alimenta pulpa a la bomba de alimentación a los hidrociclones mantienen estable la densidad normalmente detectada por un aparato nuclear de medición de densidad de pulpa. Si los circuitos de molienda son automatizados y la relación agua mineral correcta, la pérdida de diámetro interior por “encalichamiento” pondrá fuera de servicio el control de la relación agua/mineral generando así pérdidas efectivas en la recuperación metalúrgica por falta de liberación.

2.2.10. COLECTOR XANTATO Y ALCALINIDAD EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN.

El xantato es un colector tradicional de flotación, son varios tipos de xantatos los que se usan en minería, pero es importante saber lo siguiente:

- (a) Son varios tipos de xantato disponible en el mercado de colectores de flotación, dependen de la cadena del alcohol utilizado, pero el 80% de plantas que procesan minerales sulfuros por flotación lo hacen con Xantato isopropílico de sodio o XIS o Z11.
- (b) El único xantato que no requiere que la pulpa tenga pH alcalino y puede operar efectivamente en cualquier rango de pH es el XAP o Z6 Xantato amfílico de potasio.

Para que un xantato Z11 actúe eficientemente en una pulpa debe haber involucrada alcalinidad, esta alcalinidad favorece a la selectividad frente a

otros sulfuros de hierro presentes, la aplicación de xantato amílico en flotación generalmente es muy agresiva y poco selectiva.

Un esquema de flotación con aplicación de xantato requiere generalmente uso de etapas adicionales de limpieza para deprimir sulfuros de hierro y alcanzar grados comerciales de concentrados de zinc.

Esta cal aplicada en las limpiezas debe ser muy controlada, necesariamente con un loop de lechada de cal y dosificación con válvulas pinch eléctricas como respuesta a un sensor de pH instalado en la misma celda de flotación, se trata de mantener un pH adecuado para la depresión de pirita y que las dosificaciones de cal sean exactas para llegar a un pH pre-establecido. Si este sistema no funciona de manera controlada el exceso de cal perjudicará las operaciones y también se presentará en elevado pH en las aguas efluentes de las canchas de relave.

Si el colector de flotación xantato requiere cal, generalmente se usa cal viva en promedio 1 a 2 kilos por cada tonelada de mineral tratado industrialmente por flotación, entonces para una planta de flotación el manejo de cal viva siempre será un peligro por lo que se debe priorizar que el transporte de cal sea en tanques cerrados o bombonas, este producto será descargado por bombeo hacia silos y de allí se apaga la cal con adiciones de agua en un sistema controlado por la temperatura de reacción; luego la lechada preparada se deposita en tanques de almacenamiento desde donde por bombeo se genera un loop cerrado que tenga puntos de dosificación de

lechada de cal en el circuito de flotación según consideraciones previamente establecidas.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.

Mineral.- Es aquella sustancia sólida, natural, homogénea, de origen inorgánico, de composición química definida.

Metalurgia.- Es la técnica de la obtención y tratamiento de los metales desde minerales metálicos hasta los no metálicos.

Proceso Metalúrgico.- Obtención del metal a partir del mineral que lo contiene en estado natural, separándolo de la ganga.

Flotación.- Es un proceso fisicoquímico que consta de tres fases sólido-líquido-gaseoso que tiene por objetivo la separación de especies minerales mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a burbujas de aire.

Flotación bulk.- Es un proceso fisicoquímico de obtener dos o más productos en una flotación rougher.

Recuperación.- (del latín recuperatio) es la acción y efecto de recuperar o recuperarse (volver en sí o a un estado de normalidad, volver a tomar lo que antes se tenía, compensar)

Operación Planta Concentradora.- Las operaciones de las Plantas Concentradora de minerales requieren en la mayoría de los casos de una preparación previa de los minerales que conllevan a la liberación de las partículas valiosas de su ganga acompañante. Con las diversas etapas de trituración, molienda, flotación, espesamiento y filtrado se conseguirá completar el grado de liberación necesario para el concentrado de Minerales.

Mena.- Minerales de valor económico, los cuales constituyen entre un 5 y 10 % del volumen total de la roca. Corresponden a minerales sulfurados y oxidados, que contienen el elemento de interés, por ejemplo, cobre, molibdeno, zinc, etc.

Transporte de fluidos: bombas y compresores.- dentro de los diferentes procesos químicos e industriales existe la necesidad de transportar fluidos (líquidos y gases) de un lugar a otro utilizando para ello ductos o canales. Este movimiento se logra por medio de una transferencia de energía. Para ellos se utilizan equipos denominados bombas y compresores. Por conveniencia se habla de bombeo cuando se trata de líquidos y de compresión cuando se trata de gases, sin embargo, los principios de funcionamiento de los equipos básicamente los mismos.

Reactivos de flotación. son los colectores, depresores, activadores y modificadores, cuyas acciones principales son inducir e inhibir hidrofobicidad de las partículas y darle estabilidad a la espuma formada.

Depresores – sustancias que disminuyen la capacidad de **flotación** de minerales, cuya extracción al estrato de espuma no está deseable en este momento.

2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS:

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

Si realizamos la flotación de zinc sin el uso de cal entonces podemos hacer la recuperación del concentrado de zinc, en la Unidad de Producción Andaychagua.

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS

- a. Si la Unidad de Producción Andaychagua, hace uso de reactivos selectivos mejorara la calidad y recuperación del concentrado de Zinc en la flotación de Zinc sin Cal.
- b. Si la Unidad de Producción Andaychagua, hace uso de reactivos selectivos, reducirá la contaminación bajando el pH de las aguas residuales del proceso en la unidad de producción Andaychagua.
- c. Si la Unidad de Producción Andaychagua, hace uso de la flotación de Zinc sin Cal bajara drásticamente el consumo de Xantatos (Z-11; Z-6).

2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

2.5.1. VARIABLE DEPENDIENTE

Recuperación del concentrado de zinc

2.5.2. VARIABLE INDEPENDIENTE

Flotación de zinc sin el uso de cal

2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable	Dimensión conceptual	Dimensión operacional	Unidad	indicadores
Flotación de zinc sin el uso de cal	Flotación de minerales	Flotar minerales de zinc sin uso de cal	Masa de pulpa	20 TMPD
Recuperación del concentrado de zinc	Calidad del concentrado zinc	Concentrar el mineral con valor económico	Peso en TMPD	20 TMPD

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

El tercer capítulo se muestran todos los métodos de investigación experimental que son la parte más importante del estudio de esta tesis, su planteamiento se basa en el análisis teórico del problema reales, que fundamenta teóricamente la investigación lo que permite plantear estrategias de experimentación a nivel laboratorio.

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta los objetivos de la investigación y la naturaleza del problema planteado, para el desarrollo del presente estudio se empleó el tipo de Investigación “**cuasi experimental**”, porque permite responder a los problemas planteados, de acuerdo a la caracterización sobre el circuito de flotación con el efecto de incrementar la recuperación de Zinc.

3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación se inicia luego de haber realizado la formulación del estudio de investigación que comienza primordialmente con el planteamiento del problema, el cual es analizado más adelante desde un punto de vista teórico, se procede con el **método aplicada** con la finalidad de demostrar la hipótesis lo que permite plantear las estrategias de experimentación a nivel laboratorio, donde se define los materiales y equipos necesarios.

3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El Diseño empleado en la presenta Investigación es el de carácter **experimental**; metodología que permite establecer la relación existente entre la aplicación de la variable independiente en el proceso y el resultado obtenido, considerado como variable dependiente, teniendo en cuenta para ello el problema principal planteado, y que será desarrollado dentro del contexto de la investigación como **experimental – condicionada**.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. POBLACIÓN

La implementación de programas de aseguramiento y control de la calidad, el empleo de herramientas geoestadísticas para la generación de los modelos de bloques de recursos, y una adecuada interpretación geológica, permiten

realizar una estimación precisa de las estructuras, así como de su categoría. El proceso actual permite generar modelos de reservas más robustos, otorgando mayor soporte a los planes de minado. Las reservas de la compañía al 31 de diciembre de 2018 disminuyeron su tonelaje en 22,9% con respecto al año anterior, mientras que las leyes de Zn y Ag aumentaron en 4,3% y 7,9% respecto al año anterior respectivamente. La disminución del tonelaje se debió básicamente a los cambios ocurridos en la unidad de Yauli y Cerro de Pasco.

Tabla N° 3.6: Reservas de minerales probadas y probables por unidad minera

Yauli	Miles TM	Leyes				Finos			
		Zn %	Pb %	Cu %	Ag oz/TM	Zn Miles TM	Pb Miles TM	Cu Miles TM	Ag Miles TM
Yauli	23322	5,45	0,92	0,25	3,12	1272	215	58	73
Probadas	9918	5,60	0,96	0,19	3,33	556	95	19	33
Probables	13403	5,34	0,89	0,29	2,97	716	120	39	40

Fuente: Departamento de Geología

Tabla N° 3.7: Reservas minerales por tipo de explotación

Yauli	Miles TM	Leyes			
		Zn %	Pb %	Cu %	Ag oz/TM
Mina Subterranea	31032	5,86	1,24	0,17	3,17
San Cristobal	11624	6,45	1,05	0,23	4,23
Carahuacra	2989	5,37	0,46	0,09	2,31
Andaychagua	3061	4,46	0,93	0,06	3,17
Ticlio	2769	7,44	1,62	0,26	1,70

Fuente: Departamento de Geología

3.4.2. MUESTRA

En la unidad de Yauli, las reservas disminuyeron en 14,7% con respecto al año anterior, manteniéndose las leyes a niveles similares. Los ajustes en el tonelaje se debieron a la incorporación de nueva información de zonas

antiguas, la definición de algunas zonas intangibles y el empleo de una mayor ley de corte. El plan de exploración que viene desarrollándose en esta unidad busca definir estructuras de mayor volumen en la zona de calizas, y comprobar la extensión de la mineralización de las estructuras de manera lateral para un minado más eficiente y a menores costos.

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Las muestras de pulpa utilizadas en el desarrollo de la investigación experimental, es la descarga de la última celda scavenger de flotación de plomo de la Planta Concentradora Andaychagua, esta muestra de pulpa es nuestra Cabeza de Zinc.

3.5.1. LOS INSUMOS A EMPLEAR

- ❖ Cal.
- ❖ Colector Selectivo de Zinc F-1661.
- ❖ Colector selectivo de Zinc F-4277.
- ❖ Colector Xantato Z11/Z6
- ❖ Espumante Flotanol H-53.
- ❖ Activador Sulfato de Cobre (CuSO_4).
- ❖ Agua industrial.
- ❖ Agua filtrada de la pulpa.

3.5.2. LOS MATERIALES A UTILIZAR.

- ❖ Muestreador de pulpas.
- ❖ Vasos de precipitación

- ❖ Pizeta.
- ❖ Jeringas.
- ❖ Probeta milimetrada.
- ❖ Luna de reloj.
- ❖ 10 Baldes de plásticos o recipientes de 2 litros.
- ❖ 2 bandejas metálicas de 50 cm x 20 cm.
- ❖ 10 bandejas metálicas de 25 cm x 15 cm.
- ❖ Malla #10.

3.5.3. EQUIPOS

Para las pruebas batch de flotación experimental para el circuito de flotación de Zinc de planta Andaychagua se utilizó los siguientes materiales:

- Filtros de prensa.
- Celdas de flotación del laboratorio experimental VYMSA.
- Agitador electrónico imantado.
- Cronometro.
- Medidor de pH electrónico (Peachimetro Digital).
- Balanza calibrada.
- Pulverizadora.

3.5.4. METODOS

- ❖ Pruebas de flotación selectiva batch.
- ❖ Pruebas de flotación estándar de la planta Andaychagua.

3.5.5. ETAPAS Y PROCEDIMIENTO

El procedimiento experimental para el desarrollo del presente estudio, se basa en las investigaciones de los problemas ambientales que se da en la minería del Perú con referente a las aguas residuales que contaminan el medio ambiente por su elevado pH y buscando una nueva forma de flotación que va de una flotación tradicional con cal a una flotación selectiva sin el uso de cal, demostrando que se mantiene los buenos resultados metalúrgicos y especialmente que se obtiene mejoras en el tema de seguridad y medio ambiente.

3.5.6. ETAPAS

El resumen descriptivo de las etapas en la implementación del proceso de flotación de zinc sin cal, fueron las siguientes:

- Estudio de laboratorio experimental: El cual se realizó mediante pruebas batch ordenadas y analizadas mediante plantillas de diseño factorial, teniendo como estadístico de discriminación la T-Student; luego se optimizó mediante plantillas de diseño hexagonal, teniendo con estadístico de discriminación el F.
- Dentro de esta etapa se analizaron varios cambios de reactivos colectores con el objetivo de escoger el más óptimo, tanto en performance metalúrgica, como en costos.

- Proceso industrial: El cual se realizó en el circuito de zinc de la Planta Concentradora Andaychagua, aplicando el reactivo colector seleccionado después de eliminar el colector xantato remanente.
- Se tuvo un seguimiento de la metalurgia del proceso en tiempo real mediante el uso del Courier, pudiendo realizar cambios en la dosificación del activador y el espumante.

3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.6.1. PROCEDIMIENTO

Las pruebas batch de flotación experimental para el circuito de flotación de zinc PAND 01, se procesó del siguiente modo:

- La cantidad de muestra en pulpa necesaria para la flotación batch fue obtenida en el punto de la cabeza de flotación de zinc (alimento al acondicionador) de la Planta Concentradora Andaychagua 01, donde todavía no hay adición de algún reactivo, excepto por la presencia de reactivos remanentes de la etapa anterior. La muestra en pulpa se preparó primero filtrando todo y recuperando el agua de filtrado, luego la muestra en húmedo después de un oreo se homogenizó y se cuarteó hasta obtener muestras con el mismo peso húmedo de 1000 gramos, donde cada una de ellas serán flotadas en el laboratorio con el agua de filtrado que será adicionado en 1.44 litros por prueba y completado con el agua fresca de proceso hasta el nivel de pulpa deseado.
- El orden y las condiciones de flotación batch en cada una de las pruebas.

- Una vez realizadas las pruebas de flotación batch se secaron las muestras de los productos y se prepararon cada una de ellas para los ensayos en el laboratorio químico.
- Recibidos los ensayos de las pruebas se procedió a realizar los balances metalúrgicos y a calcular los factores metalúrgicos (F.M) de cada elemento (Zn, Ag, Fe)), los cuales servirán a su vez para calcular el factor metalúrgico favorable ($F.M. \text{ fav} = F.M. \text{ Zn} + F.M. \text{ Ag} - F.M. \text{ Fe}$), que nos servirán como base para el análisis estadístico de selección de variable.

De lo anterior es importante anotar que el factor metalúrgico, es aquel número adimensional que mide la eficiencia metalúrgica con el grado y la recuperación respecto a la ley de cabeza del elemento a analizar (Factor Metalúrgico = $\text{Grado} \times \text{Recuperación} / \text{Cabeza}$), siendo importante su aplicación en el análisis de los balances metalúrgicos, especialmente cuando se tiene muestras con leyes de cabeza similares.

3.7. ORIENTACIÓN ÉTICA

El trabajo de investigación que se está informando en la calidad de tesis, tiene una recolección de datos de la misma empresa, es decir se ha realizado el trabajo en el laboratorio químico-metalúrgico con el apoyo incansable del personal profesional y obrero. El marco teórico fue elaborado con la bibliografía identificada como suyo en pie de página.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO

4.1.1. ACERCA DE LA UNIDAD ANDAYCHAGUA

El Centro Minero de Andaychagua, está situada en la zona central del Perú, a 181 Kilómetros hacia el Sur Este de Lima, sobre el flanco Este de la Cordillera Occidental de los Andes Centrales, a una altitud de 4550 msnm.

Coordenadas geográficas.

Latitud Sur	11° 43'
Longitud Oeste	76° 05'

Localizada Políticamente en el Centro Poblado Menor San José de Andaychagua, del Distrito de Huayhuay, Provincia de Yauli – La Oroya del Departamento de Junín.

Figura N° 4.1: Ingreso a Volcan Cía. Minera U. P. Andaychagua



Fuente: Elaboración propia

4.1.2. ACCESIBILIDAD

La Unidad de Producción de Andaychagua es de fácil acceso utilizando dos vías:

- I. Por la Carretera Central que viene de la Oroya y sigue su recorrido hasta el cruce CUT OFF que parte un ramal de 45,160 Kms. Y sigue por la carretera afirmada que pasa por Pachachaca. Que luego pasa por las localidades de Mahr Túnel, Yauli, Carahuacra, Huaripampa, San Cristóbal llegando hasta Andaychagua.
- II. Por la Carretera Central, entre Huancayo – La Oroya en el cruce Huari que parte un ramal a 33 Kms.; que sigue por la carretera afirmada que pasa por Huari, Colpa, Huayhuay y llegando a Andaychagua.

4.1.3. GEOGRAFÍA.

Las altitudes y climas varían de 4500 m.s.n.m. Mina San Cristóbal – Carahuacra - Andaychagua hasta 5200 m.s.n.m. (Nevado Chumpe) según la

división altimétrica de J. P. Vidal 1948 estos lugares corresponden a la Región Puna (4100 a 4800 m.s.n.m.) y Janca (4800 m.s.n.m.).

Se caracteriza por su gran altitud y relieve irregular en contraste con los valles en 'U' a los que les asigna un origen glacial. Entre ellos se tiene el valle glacial de Carahuacra, Andaychagua, Chumpe y el valle de Yauli.

4.1.4. CLIMA.

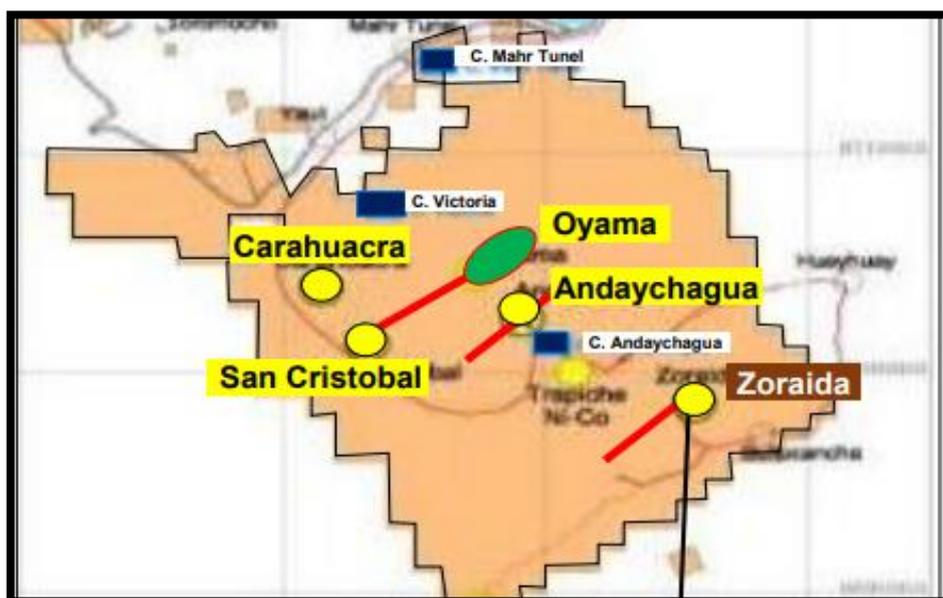
En esta zona el clima es frío y seco ya que se encuentra dentro de la región Geográfica denominada Puna.

La estación lluviosa es entre los meses de octubre - abril con precipitaciones sólidas como nevados y granizadas, las temperaturas varían entre 15 °C Y 0 °C, entre el día y la noche. La estación seca se da entre mayo y setiembre, es la etapa del año que soporta las menores temperaturas (heladas), llegando hasta bajo 0 °C durante las primeras horas del día y durante las noches.

4.1.5. VEGETACIÓN.

Por estar ubicado por encima de los 4 000 m.s.n.m., de altitud y por las inclemencias del clima, la vegetación que se desarrolla en abundancia es el ichu que alcanza hasta un metro de altura, de igual manera la Wila, Escorsonera, Huamanpinta, chupa sangre, etc.

Figura N° 2.2: Plano de Ubicación de la Unidad Minera Yauli



Fuente: Elaboración propia

4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.2.1. PRUEBAS METALÚRGICAS

Los resultados de la primera parte se muestran según la Tabla N°4.1:

Tabla N° 4.1: Balance metalúrgico de las pruebas

NOMBRE	TIPO	Leyes (%Zn)		Distribución (%Zn)		Distrib. (%Fe)	F.M Ro I Zn	OBSERVACIÓN
		Cabeza	Grado Ro I	Rec Ro I	Rec total	Rec total		
PRUEBA N° 1	ESTANDAR	4.31	51.62	56.34	92.92	36.26	674.45	Dosificación de reactivos cantidad estándar. No cal
PRUEBA N° 2	FLOTTEC 1661	4.47	52.74	57.66	92.93	14.49	680.03	Dosificación de reactivos cantidad estándar. No cal
PRUEBA N° 3	FLOTTEC 4277	4.91	52.37	53.61	92.75	15.25	572.36	Dosificación de reactivos cantidad estándar. No cal
PRUEBA N° 4	FLOTTEC 1661	4.20	51.66	44.38	91.63	11.50	546.00	Dosificación de reactivos cantidad menor. No cal
PRUEBA N° 5	FLOTTEC 4277	4.14	46.28	44.01	91.39	11.07	491.76	Dosificación de reactivos cantidad menor. No cal

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: Para tomar en cuenta todos los indicadores de la tabla, usaremos el Factor Metalúrgico (F.M) como principal indicador, el cual muestra para la prueba con **F-1661**, una ligera ventaja respecto a la prueba con el Estándar y con el F-4277, teniendo además una recuperación de Fe mucho menor.

En la segunda parte, como se explicó, se flota primero de forma similar a lo realizado en la primera parte, pero con la cantidad de dosificación de reactivos que obtuvo resultados más favorables. Los resultados de estas pruebas se muestran según la Tabla N° 4.2:

TABLA N° 4.2: Balance metalúrgico de tres pruebas metalúrgicas

NOMBRE	TIPO	Leyes (%Zn)		Distribución (%Zn)		Distrib. (%Fe)	F.M Total Zn	OBSERVACIÓN
		Cabeza	Grado Ro I+Ro II		Rec total	Rec total		
PRUEBA N° 1	ESTANDAR	3.39	21,12		93,37	51,79	582,35	Pruebas sin Limpieza, No cal
PRUEBA N° 2	FLOTTEC 1661	3.30	23,72		93,14	22,47	669,58	Pruebas sin Limpieza, No cal
PRUEBA N° 3	FLOTTEC 4277	3.80	26,88		93,15	20,66	658,87	Pruebas sin Limpieza, No cal

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: De igual forma que el análisis anterior tenemos un mayor Factor Metalúrgico para la prueba con el colector **F-1661**, y también una menor recuperación de Fe.

Continuando en esta segunda parte, luego de estas pruebas, como se explicó, se realizaron otra vez las pruebas a las mismas condiciones de flotación, pero ésta vez aumentando la etapa de limpieza de concentrados (“Clean”), y además el uso de

cal en la etapa de limpieza de la prueba Estándar. Los resultados de estas pruebas se muestran según la Tabla N° 4.3:

TABLA N° 4.3: Balance metalúrgico de las pruebas metalúrgicas

NOMBRE	TIPO	Leyes (%Zn)		Distribución (%Zn)		Distrib. (%Fe)	F.M Ro I Zn	F.M Total, Zn	OBSERVACIÓN
		Cabeza	Grado Conc Final	Rec Clean	Rec total	Rec total			
PRUEBA N° 4	ESTANDAR	3,42	57.55	42,19	93,04	51,16	710,43	1566,76	Pruebas con Limpieza. Uso de cal en la limpieza.
PRUEBA N° 5	FLOTTEC 1661	3.40	53.74	89,88	97,08	23,98	1421,69	1535,68	Pruebas Con Limpieza. No cal.
PRUEBA N° 6	FLOTTEC 4277	3.39	52.15	88,64	96.72	20,74	1363,53	1487,90	Pruebas Con Limpieza. No cal.

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: De manera similar al análisis anterior observamos un “Factor Metalúrgico Total” en la prueba de flotación de zinc con el colector **F-1661**, muy parecido (aunque algo menor) al “Factor Metalúrgico Total”, en la prueba de flotación con el Estándar. Pero al tratarse de pruebas con limpieza es muy importante también ver que tan buen performance se tiene esta etapa con respecto al zinc; por lo tanto, observando nos damos cuenta que el “Factor Metalúrgico Clean” con el colector **F-1661** le lleva gran ventaja a los factores de las demás pruebas; lo cual nos quiere decir que, usando este colector, tendremos mayor contenido de finos de concentrado en ésta etapa, respecto a los demás.

4.2.2. PROCESO INDUSTRIAL

El proceso industrial fue realizado a mediados del mes de octubre del 2016, mediante pruebas en el circuito de flotación de zinc de la Planta

Concentradora Andaychagua, donde se aplicó el reactivo seleccionado a la cabeza de flotación de zinc y se fue dosificando en principio según lo obtenido en las pruebas experimentales y luego regulándolo según la ley de cabeza.

Durante la prueba industrial se realizó seguimiento del proceso, mantenido la performance metalúrgica sustentados por los balances metalúrgicos diarios; y obteniendo en meses posteriores una eliminación gradual del consumo de cal, con una disminución del pH en el efluente final.

4.2.3. FILOSOFÍA

El reemplazo del colector xantato por un colector más selectivo en la flotación convencional de sulfuros de zinc, minimizará la flotabilidad del hierro a pH's ligeramente alcalinos (pH naturales entre 8,0 y 9,0), y por consiguiente evitará el uso de cal.

La obtención de una flotación selectiva a pH's naturales en el circuito de flotación de zinc, producirá un pH en las aguas menor a 9,0, el cual estará dentro de los límites máximos permisibles.

La estimación adecuada de la dosificación del colector selectivo, así como también del modificador activador y el espumante, mantendrá la actual performance metalúrgica en el circuito de flotación de zinc después de los cambios.

4.2.4. BALANCES METALÚRGICOS

A continuación, se mostrará dos balances metalúrgicos acumulados, de antes y después de la implementación del proceso de flotación de zinc sin cal.

Antes de la Implementación del reactivo selectivo – flotación con cal:

Se ha alimentado a la celda acondicionador cal para obtener resultados metalúrgicos y hacer la comparación de los resultados con la flotación sin uso de cal. Entonces vamos a presentar los resultados del balance metalúrgico en la tabla N° 4.4.

Tabla N° 4.4: Balance metalúrgico del compósito de enero 2018 – junio 2018

Producto	TMS	% Peso	ENSAYOS					RECUPERACIONES			
			%Cu	%Pb	%Zn	Ag g/t	Ag oz/t	Cu	Pb	Zn	Ag
Cabeza	746 337.66	100,00	0,10	0,94	3,87	198,22	6,37	100,0	100,0	100,0	100,0
Conc. Cu	51,97	0,01	25,45	7,41	3,11	17002,69	546,65	1,77	0,06	0,01	0,60
Cpmc. Pb	14 346.73	1,92	1,91	43,08	7,30	7293,68	234,50	36,68	88,34	3,62	70,73
Conc. Zn	50 655.73	6,79	0,80	0,60	51,71	602,09	19,36	54,18	4,34	90,61	20,62
Relave	681 283.24	91,28	0,02	0,07	0,24	17,49	0,56	14,10	7,27	5,76	8,06
	746 337.66	100,00	0,11	0,94	3,87	198,22	6,37	100,0	100,0	100,0	100,0
							4373,2				91,94

Fuente: Elaboración propia

Después de la Implementación del reactivo selectivo – flotación sin cal:

Tabla N° 4.5: Balance metalúrgico del compósito de febrero 2018 – abril 2018

Producto	TMS	% Peso	ENSAYOS					RECUPERACIONES			
			%Cu	%Pb	%Zn	Ag g/t	Ag oz/t	Cu	Pb	Zn	Ag
Cabeza	539 177,03	100,00	0,08	0,70	3,36	109,91	3,53	100,0	100,0	100,0	100,0
Conc. Cu											
Cpmc. Pb	8 155,40	1,51	1,44	40,24	7,33	4 552,74	146,37	26,75	86,97	3,30	63,82
Conc. Zn	31 957,76	5,93	0,81	0,50	51,00	452,20	14,54	58,70	4,21	90,04	24,84
Relave	499 063,88	92,56	0,01	0,07	0,24	13,22	0,42	15,16	8,82	6,66	11,34
	539 177,03	100,00	0,08	0,70	3,36	107,90	3,47	100,0	100,0	100,0	100,0
							1 658,4				88,66

Fuente: Elaboración propia

En los balances se observa que la performance metalúrgica de zinc se mantiene antes y después de la implementación del cambio, por lo cual podemos afirmar que el nuevo proceso de flotación de zinc sin cal a la fecha está dando buenos resultados.

4.2.5. CONTROL DEL CONSUMO DE CAL

A continuación, se mostrará los consumos de cal, antes y después de la implementación del proceso de flotación de zinc sin cal.

Antes de la Implementación del reactivo selectivo – flotación con cal:

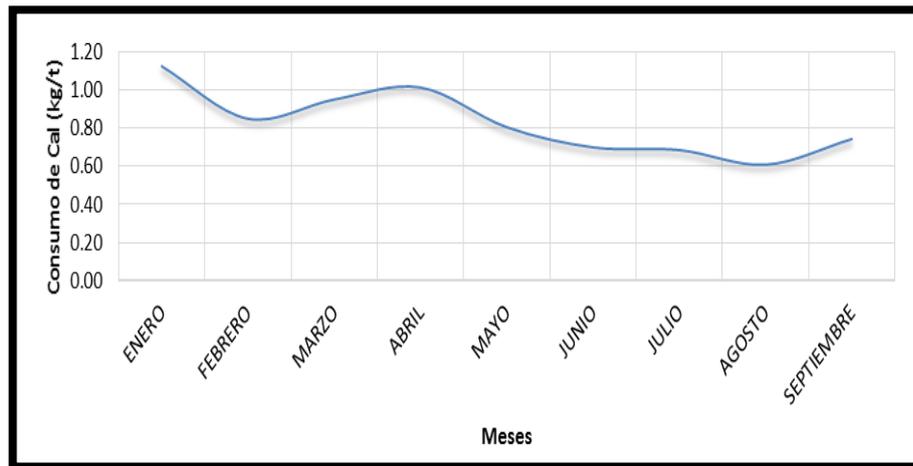
Tabla N° 4.6: Balance metalúrgico del compósito enero 2018 – junio 2018

INSUMOS	Enero 2019		Febrero 2019		Marzo 2019		Abril 2019	
	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t
Modificador-depresores								
cal	96197,00	1,126	71290	0,851	83174,00	0,952	83942,00	1,015

INSUMOS	Mayo 2019		Junio 2019		Julio 002019		Agosto 2019	
	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t
Modificador-depresores								
cal	70400,00	0,807	50030,00	0,702				

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4.1: Consumo de cal, enero a setiembre 2018



Fuente: Elaboración propia

Después de la Implementación del reactivo selectivo – flotación sin cal: de enero a abril 2019.

Tabla N° 4.6: Balance metalúrgico del compósito julio 2018 – abril 2019

INSUMOS	Julio 2018		Agosto 2018		Setiembre 2018		Octubre 2018	
	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t
Modificador-depresores								
cal	50610,00	0,652						

INSUMOS	Noviembre 2018		Diciembre 2018		Enero 2019		Febrero 2019	
	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t
Modificador-depresores								
cal	50610,00	0,652						

INSUMOS	Marzo 2019		Abril 2019	
	Consumo Kg	Consumo unitario Kg/t	Consumo Kg	Consumo unitario kg/t
Modificador-depresores				
cal	71283,41		77841,49	

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4.2: Consumo de cal, octubre 2018 a abril 2019



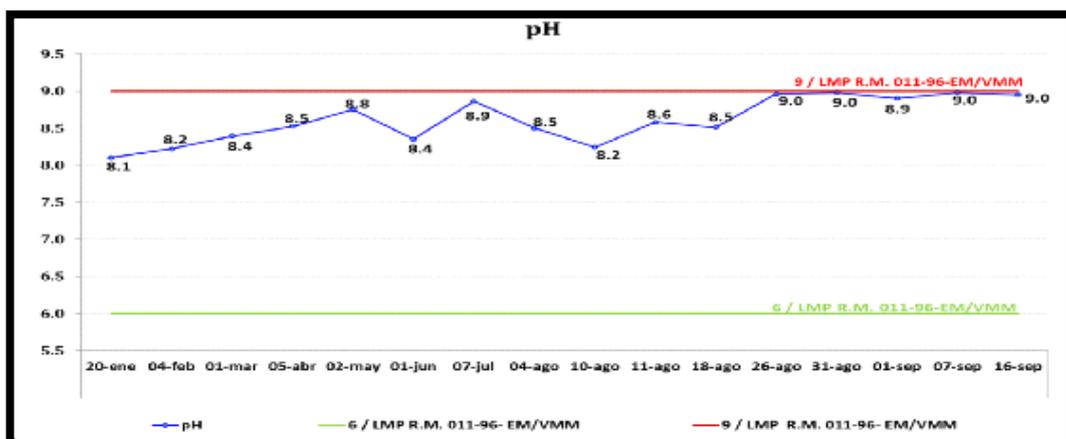
Fuente: Elaboración propia

4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS

A continuación, se mostrará los controles de pH en el punto EM-607, antes y después de la implementación del proceso de flotación de zinc sin cal.

4.3.1. ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL REACTIVO SELECTIVO – FLOTACIÓN CON CAL

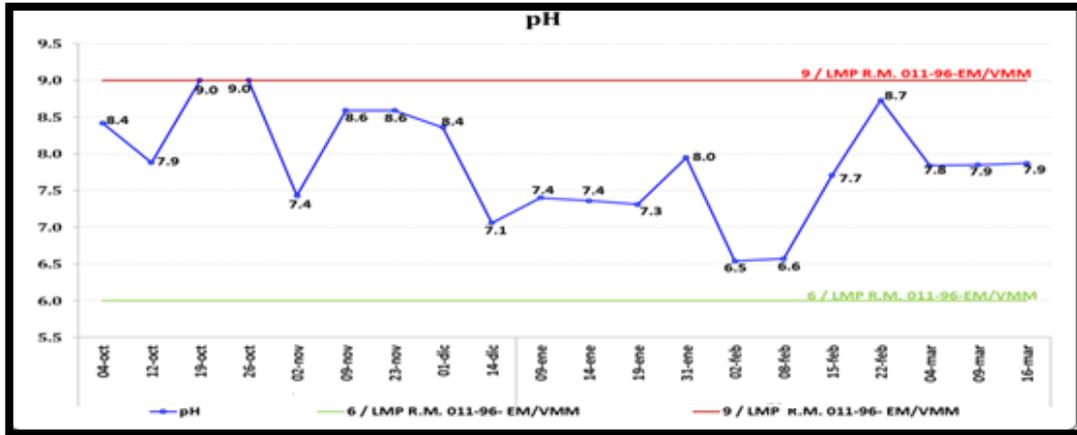
Figura N° 4.3: enero 2016 – setiembre 2016



Fuente: Elaboración propia

4.3.2. DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL REACTIVO SELECTIVO – FLOTACIÓN SIN CAL:

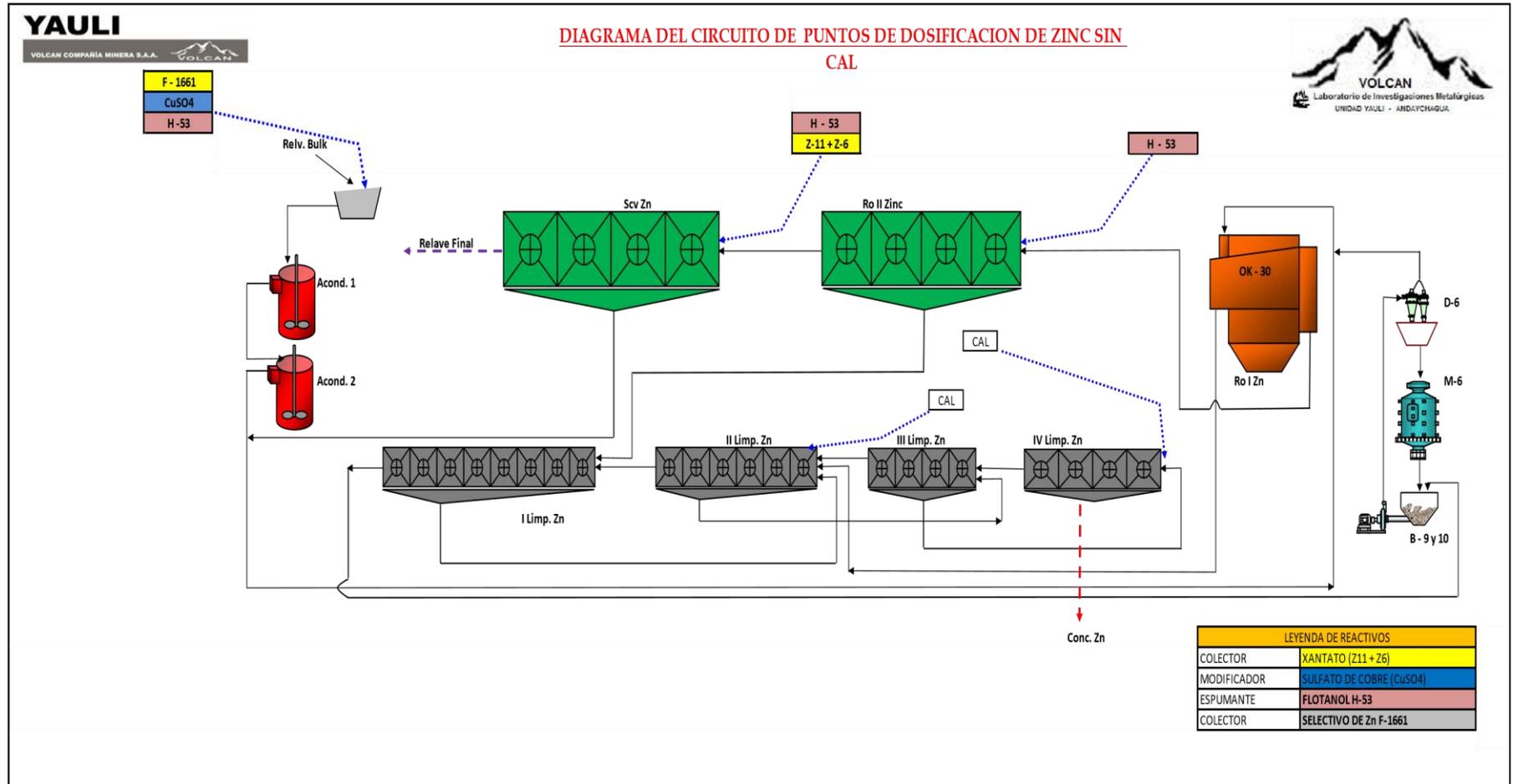
Figura N° 4.4: octubre 2018 – marzo 2019



Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia al ya no usar la cal como reactivo, el nivel de pH se ha mantenido dentro de los rangos establecidos por el Límites máximos permisibles de la RM N°011-96-EM/VMM, y con ello se garantiza un control de la calidad.

Figura N° 4.5: Diagrama de dosificación de reactivos en la flotación de zinc sin la adición de cal



Fuente: elaboración propia

4.3.3. DOSIFICACIÓN DE REACTIVOS EN LA FLOTACIÓN DE ZINC SIN LA ADICIÓN DE CAL

Tabla N° 4.7: Dosificación de reactivos en la flotación de zinc sin adición de cal

ETAPAS	REACTIVOS			
	CUSO4	F - 1661	FLOTANOL H-53	XANTATO Z11 + Z6
Acondicionador	✓	✓	✓	X
I Rougher (OK-30)	✓	✓	✓	X
II Rougher	X	X	✓	X
Scavenger	X	X	✓	✓
I Cleaner	X	X	X	X
II Cleaner	X	X	X	X
III Cleaner	X	X	X	X
IV Cleaner	X	X	X	X

Fuente: Elaboración propia

4.3.4. MEDICIÓN DE pH EN LAS ETAPAS DE FLOTACIÓN DE ZINC SIN LA ADICIÓN DE CAL

Tabla N° 4.8: Medición del pH en la flotación de zinc sin adición de cal

ETAPAS	pH EN LA Flotación de zinc sin cal
	pH
Cabeza de zinc	8,50 – 9,30
Acondicionador	8,20 – 9,00
I Rougher (OK-30)	8,00 – 8,60
II Rougher	8,20 – 8,60
Scavenger	8,00 – 8,50
I Cleaner	8,30 – 8,70
II Cleaner	8,30 – 8,70
III Cleaner	8,30 – 8,60
IV Cleaner	8,30 – 8,60
Relave	7,90 – 8,30

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

1. Se concluye que al tener buenos resultados a nivel batch con el colector **F-1661**, se debe realizar una prueba industrial, y evaluar su efectividad en Planta Concentradora Andaychagua, también sería relevante su aporte ya que esto indicaría que los usos de estos reactivos colectores pueden mantener por lo menos la performance metalúrgica de zinc del proceso estándar sin la necesidad de adicionar de cal. Por otro lado, la mezcla de éstos reactivos o con un tercero es desfavorable para el proceso.
2. El pH que se ha determinado es 9 a 10,3
3. El reactivo colector que influye de forma negativa en la performance metalúrgica de zinc es el F-4277, siendo poco favorable para el proceso la mezcla o interacción con los demás reactivos colectores

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar una prueba a nivel industrial con el colector F-1661, descartando el colector F-4277 por un tema de costos.

BIBLIOGRAFIA

1. Jose Manzaneda Cabala; PROCESAMIENTO DE MINERALES:
Segunda edición.
2. Héctor Bueno Bullón; 2003 PROCESAMIENTO DE MINERALES: primera edición.
3. Antonio Bravo Gálvez. Manual de flotación de Zinc.
4. Quiroz Núñez. Manual de cinética de flotación.
5. Nataniel Linares Gutiérrez. Manual de Flotación selectiva.
6. Apuntes del laboratorio Metalúrgico Andaychagua.
7. José Pugna Bullón. Folleto; Tratamiento de aguas residuales en la Industria Minero – Metalúrgico.
8. OSINERMIN. Apuntes de GUIA AMBIENTAL PARA EL MANEJO DE RELAVES MINEROS.

PAGINA WEB DE COLECTORES.

<http://www.flottec.com/Prd/MSDS/Flottec%201661%20Collector%20SDS%20r01%202016-01-31.pdf>.

<http://www.resco.com.pe/colectores.php>