

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALURGICA**



**“EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE COBRE POR  
FLOTACIÓN DE MINERALES DEL YACIMIENTO CAOLÍN - 2017”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO METALURGISTA**

**Presentado por:**

**Bach. Ing. Homar Polmarthan, SANTOS CAJAHUANCA**

**Mg. Edgar Yoni AIRE MENDOZA**

**ASESOR DE TESIS**

**Cerro de Pasco – 2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALURGIA**



**TESIS**

**“EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE COBRE POR  
FLOTACIÓN DE MINERALES DEL YACIMIENTO CAOLÍN - 2017”**

**SUSTENTADO Y APROBADO, SIENDO JURADO CALIFICADOR**

---

**Mg. Eusebio ROQUE HUAMAN  
PRESIDENTE - JURADO**

---

**M.Sc. Ramiro SIUCE BONIFACIO  
MIEMBRO – JURADO**

---

**Mg. Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRUZ  
MIEMBRO – JURADO**

## **DEDICATORIA**

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos. Ha sido un privilegio ser su hijo, son los mejores padres.

## RESUMEN

La presente investigación se inicia con el objetivo de evaluar la recuperación de cobre, y darles un valor comercial a los minerales del yacimiento Caolín, y así poder tratar las doscientas mil toneladas de mineral de cobre, y con ello nos darán ingresos económicos para la empresa y la sociedad.

Los minerales sulfurados y oxidados polimetálicos principalmente de cobre, plomo y zinc son muy abundantes y en especial en nuestras regiones cercanas, de allí la gran importancia que tiene estudiar su comportamiento frente a la flotación diferencial, existen minerales muy dóciles a la flotación y también otros minerales complejos que presentan una flotación muy complicada.

Las muestras estudiadas corresponden a los denuncios de la mina de Utcush, propiedad de la Empresa Minera caolín.

El Estudio es del tipo experimental, se empleó una serie de técnicas e instrumentación de recolección de muestras y datos.

El mineral de cobre, que se ha estudiado no presenta dificultad durante la flotación selectiva, la calidad y la eficiencia de separación de los concentrados pueden ser mejorados con mayor tiempo de flotación y más etapas de limpieza, mientras que en los minerales de zinc no se observa concentrado por su baja ley de cabeza.

Se realizó el estudio mineralógico y químico de la muestra, las pruebas de

flotación bulk y la separación. Estas pruebas reportaron buenos resultados de cobre con una poca cantidad de oro y plata de acuerdo al balance metalúrgico.

Se realizó también unas pruebas de moliendabilidad para determinar la curva de moliendabilidad y para controlar la granulometría del producto de la molienda a ser investigada en la flotación.

Además de la granulometría, el pH de la pulpa, los colectores, el espumante (MIBC) y la velocidad de agitación son las variables de flotación a investigar.

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN.....	iii
ÍNDICE.....	v
INTRODUCCIÓN.....	viii

## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	6
1.2.1. PROBLEMA GENERAL.....	6
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	6
1.3. OBJETIVOS.....	6
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	6
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	7
1.5. IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
1.5.1. IMPORTANCIA TECNOLÓGICA.....	7
1.5.2. IMPORTANCIA ECONÓMICA.....	8
1.5.3. ALCANCES.....	8
1.6. LIMITACIONES.....	9

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES.....	10
2.2. BASES TEÓRICO – CIENTÍFICOS.....	19
2.2.1. FLOTACIÓN DE MINERALES.....	19
2.2.2. TERMODINÁMICA DE LA FLOTACIÓN.....	27
2.2.3. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA ADHESIÓN PARTÍCULA – BURBUJA.....	30
2.2.4. CINÉTICA DE FLOTACIÓN.....	35
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	35

2.3.1.	PLANTA CONCENTRADORA.....	35
2.3.2.	ADSORCION.....	36
2.3.3.	MINERALES HIDROFÓBICOS.....	36
2.3.4.	MINERALES HIDROFÍLICOS.....	36
2.3.5.	TENSIÓN SUPERFICIAL.....	37
2.3.6.	RECURSOS NO RENOVABLES.....	38
2.3.7.	MENAS.....	38
2.3.8.	GANGA.....	38
2.3.9.	PULPA.....	38
2.3.10.	pH.....	38
2.3.11.	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN.....	39
2.4.	HIPÓTESIS.....	39
2.4.1.	HIPÓTESIS GENERAL.....	39
2.4.2.	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS.....	39
2.5.	IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES.....	40
2.5.1.	VARIABLE DEPENDIENTE.....	40
2.5.2.	VARIABLES DEPENDIENTES.....	40
2.5.3.	VARIABLES INTERVINIENTES.....	40
2.6.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	40

### **CAPITULO III**

#### **METODOLOGIA**

3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	41
3.2.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	41
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	42
3.3.1.	POBLACIÓN.....	42
3.3.2.	MUESTRA.....	42
3.4.	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	42
3.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	42
3.6.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	43
3.7.	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS.....	43

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS, TABLAS, GRÁFICOS Y FIGURAS.....	44
4.2. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS. ....	47
4.2.1. PRUEBAS DE MOLIENDABILIDAD. ....	47
4.2.2. PRUEBA DE FLOTACIÓN. ....	49
4.2.2.1. MEJOR PRUEBA DE FLOTACIÓN. ....	49
4.2.2.2. PRUEBA DE FLOTACIÓN DEL PROMEDIO DEL MINERAL DE MINA. 52	
4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ....	56
4.3.1. MICROSCOPIA. ....	56
4.3.2. PRUEBA DE FLOTACIÓN ÓPTIMA. ....	56
4.3.3. PRUEBA DE FLOTACIÓN PROMEDIO MUESTRA DE MINA. ....	57
4.3.4. LEYES DE CONCENTRADOS Y RECUPERACIONES.....	57
<b>CONCLUSIONES</b> .....	59
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	60
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	61
<b>ANEXOS</b> .....	63

## INTRODUCCIÓN

El presente es una investigación metalúrgica realizado con minerales procedentes de la mina Caolín, ubicada en la Región de Huánuco, que se ubica dichos minerales, en un ambiente de rocas subvolcánicas cortada por vetas de cuarzo asociadas a diques andesíticos con mineralización de cobre plata y oro que pertenecen a la Cordillera Oriental.

En la zona se encuentran afloramientos de sedimentos del grupo Ambo cortados por intrusiones subvolcánicas andesíticas sellando a fallas con vetas de cuarzo en contacto con la roca caja, con mineralización de oro y cobre, estas vetas son del tipo Rosario (Sigmoidales), las cuales se encuentran afectadas por fallas (Falla Chaguan-Rondoni).

Los minerales estudiados corresponden a los denuncios Caolín S.R.L. y Caolín 2, presenta evidencias de mineralización de un manto y veta (60 cm) de espesor promedio con contenido de cobre, plata y oro en un ambiente de baja Sulfuración, estas vetas están asociadas a diques andesíticos.

Las reservas calculadas superan las doscientos mil toneladas métricas de minera con contenidos de cobre.

Se realizaron pruebas metalúrgicas de flotación con el mineral compuesto proveniente de la mina.

Las pruebas de flotación se realizaron a 60% -200 mallas a pH= 7,5 – 11

donde el concentrado Cu reporta leyes de 25,11% Cu, en promedio, alcanzando un grado comerciable.

El presente estudio consta de cuatro capítulos:

En el capítulo I se presentan la determinación del problema, formulación del problema, objetivos, justificación, importancia, alcance y limitaciones de la investigación.

En el Capítulo II, se presenta la fundamentación teórica necesaria en la que se basa la propuesta, tales como: antecedentes, bases teórico científicos, definición de términos, hipótesis genéricas y específicos e identificación de las variables.

En el Capítulo III, se presentan el tipo de investigación, diseño de la investigación, población y muestra, métodos de la investigación, técnicas e instrumentos de recolección de datos.

En el Capítulo IV: presentación de Resultado, tratamiento estadístico e interpretación de cuadros, y discusión de resultados.

Finalmente se presentan conclusiones, recomendaciones, y anexos que lo complementan.

EL AUTOR

## **CAPITULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.**

En la mina de Utcush, de propiedad de la Empresa Minera Caolín S.R.L., encontramos minerales de mena, sulfurados y oxidados de cobre el cual pretendemos beneficiar utilizando la flotación de minerales, como bien sabemos su objetivo es el de obtener en el concentrado la mayor cantidad de cobre, separándolos de la ganga.

Estos minerales de cobre de baja sulfuración, se presentan en vetas y mantos con contenidos de oro y plata presentes en las áreas de los denuncios mineros Caolín S.R.L. y Caolín 2, ubicados a 3 250

m.s.n.m., en el distrito de Cayna, de la provincia de Ambo, región Huánuco, comunidad de Utcush. Las vetas están asociadas a diques andesíticos en contacto con los sedimentos del grupo ambo y siempre están mineralizados.

A partir de las informaciones de reservas, el departamento de geología viene realizando más exploraciones y se viene a la fecha explotando el yacimiento, tratando su mineral en una planta concentradora de 30 Toneladas por día.

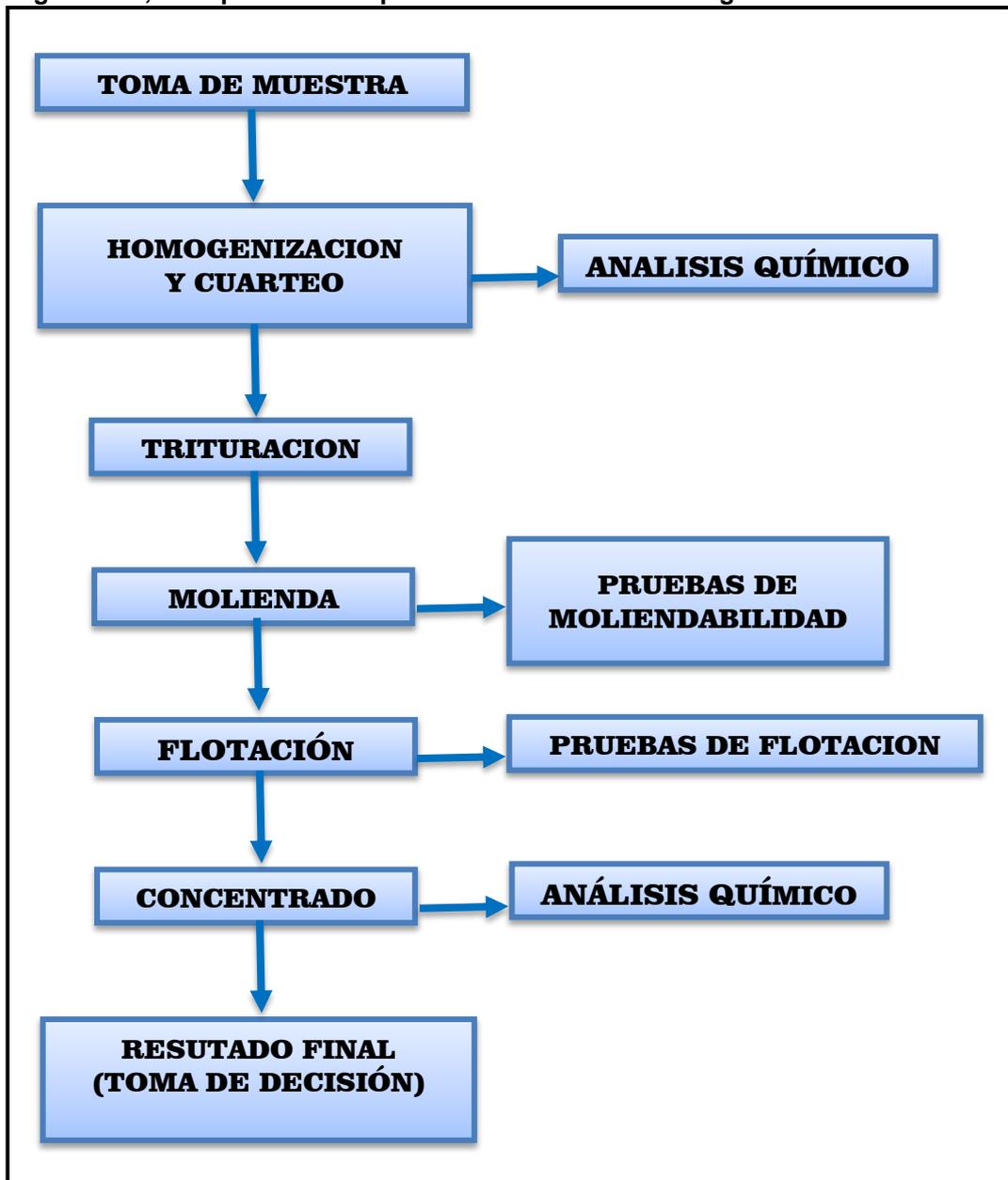
**Tabla N° 1,1: Reporte de reservas del mineral, Mina Caolín marzo 2017**

<b>UBICACIÓN DE MINERAL DE MINA 2017</b>						
<b>Mes</b>	<b>Tipo</b>	<b>Zona</b>	<b>Bloque</b>	<b>Tonelada</b>	<b>%Cu</b>	<b>Ag Oz/T</b>
Enero	Exploración	Norte	1	59 000	2,30	0,25
			2	23 600	3,01	0,28
Febrero	Exploración	Sur	3	97 500	3,31	0,39
			4	10 800	2,22	0,36
			5	9 150	2,46	0,32
<b>TOTAL</b>				200 050	2,66	0,32

**Fuente: Área de Geología de la Empresa Minera Caolín S.R.L.**

Para conseguir esto, en primer lugar, se planifica los procedimientos y usos de estándares combinados en un esquema (Figura N° 1,1) que nos lleve al éxito.

Figura N° 1,1: Esquema de los procedimientos de la investigación.



Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA.

Los informes geológicos presentados manifiestan la existencia de estructuras mineralizadas de longitudes y espesores variables, que a través de labores mineras subterráneas se vienen explotando y a la fecha se está acumulando este material para poder iniciar el beneficio en una planta concentradora.

Conocemos que las exploraciones geológicas son la base para el desarrollo de las actividades mineras y la empresa viene explorando el área de la mina y ha asumido riesgos económicos, debido a que estas inversiones se sostienen en los precios de los metales sujetos a altas oscilaciones de comercialización y justamente mediante la exploración minera se han podido ubicar doscientas mil toneladas de mineral de cobre cuyas características presentamos a continuación.

### **CARACTERÍSTICAS DEL MINERAL.**

La mineralización de cobre, se presenta como: cuerpos irregulares, vetas y mantos; las leyes de cobre son mayores hacia la superficie y en la periferie de los cuerpos, este va disminuyendo en cuanto la profundidad va aumentando.

En el campo se observa un manto continuo y corta al intrusivo tonalítico silicificado, el cual han trabajado a un nivel de 3 250, y han profundizado unos 12 metros, se cuenta con una galería de unos 40 metros, hasta donde se ha trabajado y en el cual se observa su potencia de 1,2 metros, con mineralización de sulfuros.

El mineral de la mina Caolín S.R.L. contiene las siguientes leyes:

**Tabla N° 1,2: Reporte químico de metales presentes en el mineral.**

<b>ANÁLISIS QUÍMICO DE CABEZA</b>	
<b>Elemento</b>	<b>%</b>
Cu	2,66
Pb	0,15
Zn	0,21
Ag*	0,46
Au**	10
Fe	13,50
* Oz/T.	
** Gr/T.	

**Fuente: Área de Geología de la Empresa Minera Caolín S.R.L.**

Se tiene una veta de cuarzo con mineralización de sulfuros del tipo rosario y está relacionada al piso de este intrusivo tonalítico, se ha formado en contacto del dique con los sedimentos del Grupo Ambo (Carbonífero inferior), dando lugar a una veta con cuarzo y contenido de oro, plata y cobre, no se sabe cuánto se profundizan, pero según el encampamento que se observa en campo este tiene más de 300 metros.

**Tabla N° 1,3: Estructuras mineralizadas.**

<b>NOMBRE</b>	<b>RUMBO Y BUZAMIENTO</b>	<b>ESPESOR</b>	<b>LONGITUD</b>
Nivel 3250 (Manto) Coordenadas 353605E 8868774N	N-S 40° E	1,2 m	150 m
Nivel 2850 (Manto) Coordenadas 354423E 8867616N	N-S 70° E	0,6 m	160 m

**Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA.**

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

### **1.2.1. PROBLEMA GENERAL.**

¿Cómo realizar un estudio metalúrgico de los minerales del yacimiento minero Caolín, por el método de flotación, para recuperar contenido de cobre?

### **1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS.**

- a) ¿Cuáles son las características de los minerales presentes en el yacimiento minero Caolín?
- b) ¿Qué porcentaje de recuperación de cobre se alcanzaría si este mineral es sometido al proceso de flotación?
- c) ¿De qué manera influyen los diferentes reactivos que se usan en la flotación, su preparación y dosificación?

## **1.3. OBJETIVOS.**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL.**

Evaluar la recuperación de cobre de los minerales polimetálicos contenidos en el yacimiento minero Caolín por el método de flotación.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- a) Determinar las características de los minerales presentes

en el yacimiento minero Caolín.

- b) Determinar la recuperación de cobre que se alcanzaría si este mineral es sometido al proceso de flotación.
- c) Evaluar los diferentes reactivos que se usan en la flotación, su preparación y dosificación.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.**

El presente estudio se justifica por la presencia de doscientas mil toneladas de minerales de cobre de baja sulfuración, en vetas y mantos con contenidos de oro y plata presentes en las áreas de los denuncios mineros de la Empresa Minera Caolín S.R.L.

Estas reservas deben beneficiarse porque representan valores económicos importantes, dado la actual alza de los precios de los minerales de cobre.

Ello será principal fuente de ingresos económicos para la empresa y la sociedad generando puestos de trabajo, y además la sociedad se beneficia por impuestos de Canon y regalías mineras.

#### **1.5. IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.**

##### **1.5.1. IMPORTANCIA TECNOLÓGICA.**

Recuperaremos valores sulfurados de cobre por el método de flotación contenidos en el yacimiento minero caolín, y este

estudio servirá como referencia para beneficiar otros depósitos mineralizados similares.

### **1.5.2. IMPORTANCIA ECONÓMICA.**

Al beneficiar y recuperar cobre, se podrá vender el concentrado, obteniendo resultados económicos.

### **1.5.3. ALCANCES.**

La presente investigación tiene carácter informativo para la realización de una Tesis, para optar el Título Profesional de Ing. Metalurgista, presentado por Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA. De igual manera esta investigación tiene importancia para la Empresa Minera Caolín S.R.L. Quienes decidirán en base a los resultados metalúrgicos, si van a beneficiar o no el mineral contenido en el yacimiento minero.

Con respecto a la investigación, antes de realizar las pruebas y ensayos de flotación se debe visitar el área de la mina y verificar los datos, realizar muestreos, analizar leyes y contenidos de cobre.

Se debe identificar las impurezas.

Someter el mineral al proceso de liberación, es decir someterlo a chancado, molienda y flotación.

Durante la flotación debemos encontrar los reactivos a utilizar, su consumo en base a las recuperaciones a obtener.

#### **1.6. LIMITACIONES.**

- a) En este tipo de trabajos las limitaciones generalmente son económicas por lo que los análisis químicos de las muestras cuestan caro alrededor de \$ 25 por elemento, entonces, la investigación debe llevarse a cabo con pocas muestras, optimizando los recursos.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES.**

##### **2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.**

Méndez, E. (2009), en su tesis para optar el título de Magister en Ciencias de la Ingeniería "*Flotación selectiva de enargita de un concentrado final de sulfuros de cobre de Collahuasi*", Universidad de Chile; concluye: Como respuesta al objetivo de este trabajo se puede concluir que es posible generar un procedimiento que permite limpiar de As un concentrado de Cu, entregando un concentrado de Cu de bajo contenido de As vendible y un concentrado con alto Cu y

As. Este último concentrado podría ser tratado por otros métodos, posiblemente hidrometalúrgicos, tema que está fuera del alcance de este estudio.

La mayor eficiencia relativa de separación (definida en la Ecuación 19 del Capítulo 5, considerando lo posible de separar) obtenida es de 99%, en la prueba A30, en la cual se modifica el tipo de reactivo de flotación. La recuperación de As es igual a 71,8 %, la recuperación de Cu es 26,3 % y la recuperación en peso es 21,3 %. Esta prueba se realiza a una velocidad superficial de gas (Jg) igual a 0,45 cm/s, la velocidad de agitación (Ns) es de 3,0 m/s, el porcentaje de sólidos en peso (Cp) es de 17,4% y el pH es 8. Se utilizan 15 g/t del colector AP 3418, 7,5 g/t del colector MX 7016 y 15 g/t del espumante F 501.

Soto, M. (2011), en su tesis para optar el título de Ingeniero Civil Industrial "*Diseño de una metodología para el apoyo del despacho de concentrado de cobre*", Universidad de Chile, concluye; Se ha formulado un modelo de planificación para la explotación de las celdas de la ISL para que la concentración depositada en la planta SX EW sea estable y cercana a una deseada, teniendo en cuenta la heterogeneidad del recurso minero en cuanto a ley, tonelaje, costo de producción y ubicación espacial relativa. Para ello se ha planteado un modelo y una metodología de resolución que, en base

a un enfoque numérico, sugiere como aproximar el valor óptimo del problema en estudio. La metodología es flexible a aspectos como las características del yacimiento y de la planta.

Sin embargo, se debe cuidar que la dimensión del problema permita implementarlo y resolverlo mediante un uso razonable de recursos. Existe un trade-off entre la calidad de la aproximación que entrega la metodología y las posibilidades de resolver el problema con una utilización de recursos razonable, ya que entre más veces se realice la heurística de mejoramiento mejor es la solución.

El programa realizado, en base al modelo y su metodología de resolución, es lo suficientemente amigable para el usuario, y permite realizar una programación anual para una parte del yacimiento completo. También, es altamente flexible a futuros cambios que permitan ampliar sus aplicaciones.

### **2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES.**

Curo, C. (2009), en su tesis "*Control estadístico multivariante en circuito de molienda en la concentradora Cuajone*" para optar el título de Ingeniero Metalúrgico – Universidad Nacional de Ingeniería, concluye; Las primeras pruebas que sirvieron de hipótesis a la tesis se realizaron en los molinos de bolas 1C y 1D de 16,5' x 20'. El incremento obtenido en estas pruebas fue de 93,86 TM en un tiempo

de 8h, utilizando para ello los modelos multivalentes PLS de la potencia y el tonelaje.

Para lograr el objetivo de la Hipótesis de la Tesis: Incrementar el tonelaje en la molienda, fue necesario adaptar, integrar y conciliar diversos componentes de la tecnología disponible en la Planta Concentradora Cuajone. El logro del incremento del tonelaje, requirió en principio el desarrollo de un sensor virtual del % malla +65 como una variable de control de calidad y del % de sólidos en el Overflow. La información recolectada de las variables de operación del circuito de molienda clasificación, permitió elaborar modelos multivalentes con el uso de la Aplicación SCAN, los cuales pudieron ser ingresados de dos formas al Sistema PI: mediante los Data Set, en forma manual y mediante el PI ACE, en forma automática.

Cabanillas, H. (2014), en su tesis "*Estudio metalúrgico de lixiviación de concentrados de plomo y cobre con alto contenido de arsénico, antimonio y bismuto*", para optar el título de Ingeniero Metalúrgico – Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, concluye: Tomando como línea base las concentraciones de arsénico y antimonio a disminuir y definidas en los objetivos concretos, los resultados obtenidos en las pruebas metalúrgicas de lixiviación alcalina de concentrados de flotación plomo - plata con el sistema NaOH + Na<sub>2</sub>S, en relación a las disoluciones y/o eliminaciones de arsénico y antimonio, estas alcanzaron los objetivos propuestos en

las siguientes pruebas metalúrgicas :

Se consiguieron los objetivos de disminuir el % de arsénico total en el concentrado final lixiviado (siendo el porcentaje eliminado arriba del 0,5 %, valor establecido en la línea base de disminución del arsénico). Esto es basándonos en los resultados de las pruebas metalúrgicas realizadas y específicamente en el grupo de lixivaciones alcalinas correspondiente a la prueba metalúrgica 1.

Concluimos en este grupo correspondiente a la prueba metalúrgica 1, que la solución de  $\text{Na}_2\text{S} + \text{NaOH}$ , elimina el contaminante arsénico en los test lix 2 , lix 3, lix 4, lix 5, lix 6, dentro del rango del porcentaje de eliminación del 29,51% al 31,84%, representando un % de disminución del arsénico en el concentrado final lixiviado respecto del % del arsénico total y/o global contenido en el concentrado inicial, siendo esta disminución neta del orden de 0,90% , 0,91%, 0,97%, 0,92% , 0,95% respectivamente, a porcentajes de sólidos evaluados en el rango del 0,5 % al 1,5 % . Similarmente en el caso del antimonio el test lix 3, lix 6 presentaron porcentajes de eliminación del contaminante antimonio del orden del 78,89% al 80,76% representando un % de disminución del antimonio en el concentrado final lixiviado respecto del % del antimonio total y/o global contenido en el concentrado inicial, siendo esta disminución neta del orden de 1,52 % y 1,56 % respectivamente en porcentajes de sólidos

evaluados de 0,75 % y 1,50 % respectivamente. Por tanto, en este grupo correspondiente a la prueba metalúrgica 1, los objetivos establecidos en la línea base de eliminación de arsénico test (lix 2, lix 3, lix 4, lix 5, lix 6), y antimonio tests (lix 3, lix 6), fueron conseguidas satisfactoriamente en los citados tests correspondiente a este grupo denominado prueba metalúrgica 1.

En el Perú tenemos numerosos antecedentes de la recuperación de valores de cobre, plata y oro de minerales sulfurados por el método de flotación. La presencia de los minerales, los contenidos metálicos, los tratamientos varían de mina a mina.

Tenemos el trabajo del Ing. AKIRA NAKAMURA, Sobre la investigación de procesos de separación de minerales polimetálicos que contienen cobre plomo, cinc y pirita, en el cual estructura una serie de diagramas de flujo, con flotaciones bulk y separaciones de los metales cobre, plomo, cinc y pirita.

Este autor realiza un análisis de las minas japonesas como Osarizowa, Yoshino, Hitachi, Hanawa II, Kimikita, Que aplican la flotación bulk diferencial, y también realiza el análisis de las minas Okenobe, Tsumo, Kamicka, Ogoya, quienes trabajan por el método Directo diferencial.

Además, este autor realiza el análisis medio diferencial, este

procedimiento lo utiliza la mina Shakanai – Y.

En toda su información las leyes de cabeza del mineral en contenido de cobre no superan el 2%.

También analiza el uso de reactivos como el cianuro de sodio, sulfuro de sodio, el hidróxido de calcio, el sulfato de cinc, el MIBC y otros.

El grado de concentrado en promedio de las minas se reportan 19% y la recuperación de cobre, 89%.

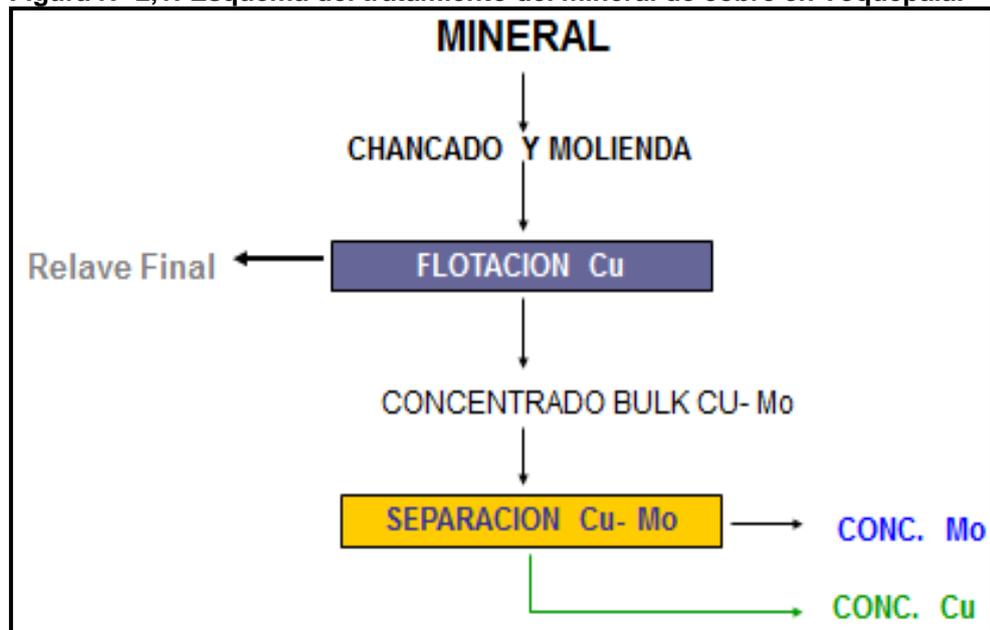
Como conclusión considera que es necesario investigar, antes de seleccionar el proceso propio para cada planta en función al mineral por tratar, pudiendo realizar comparaciones con las técnicas desarrolladas en el Japón.

Tenemos los trabajos de Luis Zegarra West, Estudio del mineral de la mina el Brocal, Colquijirca, manifestando que son minerales plomizos, polimetálicos, cuyo rendimiento no supera el 75% y nos da indicaciones que el pH de flotación debe estar entre 7 y 7,5. Indica además que el material polimetálico es lamoso y que es necesario primero la eliminación de elementos solubles.

Tenemos variedades en la flotación, de acuerdo al tipo de mineral. Tal es el caso del mineral monometálico de cobre, que trabajan en la mina

de Toquepala y Cuajone, cuyo esquema de flotación presento a continuación.

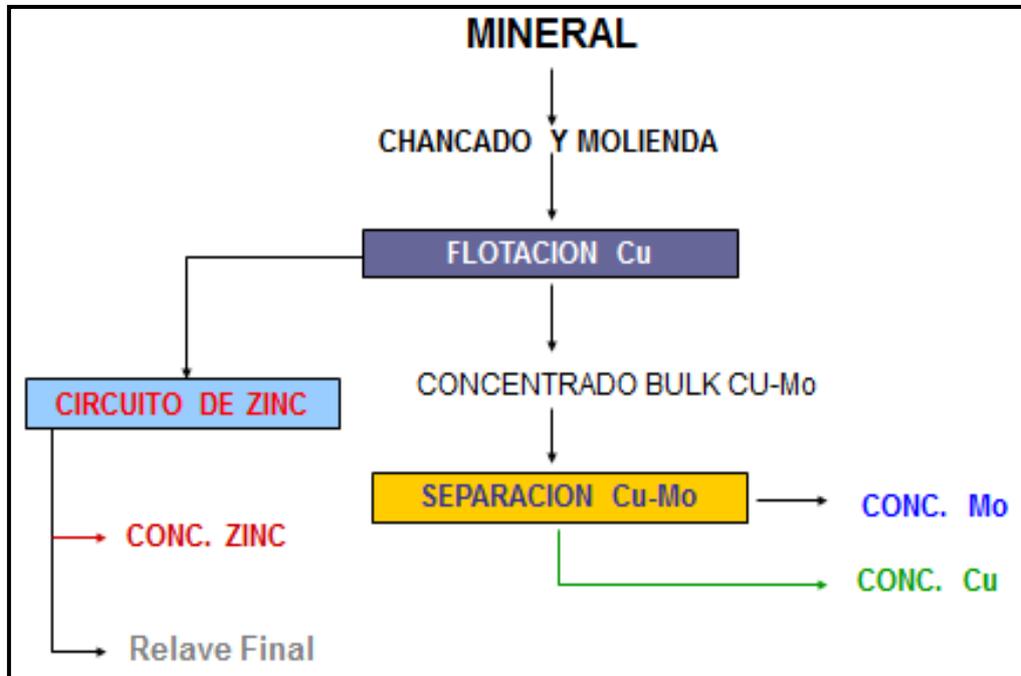
Figura N° 2,1: Esquema del tratamiento del mineral de cobre en Toquepala.



Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA.

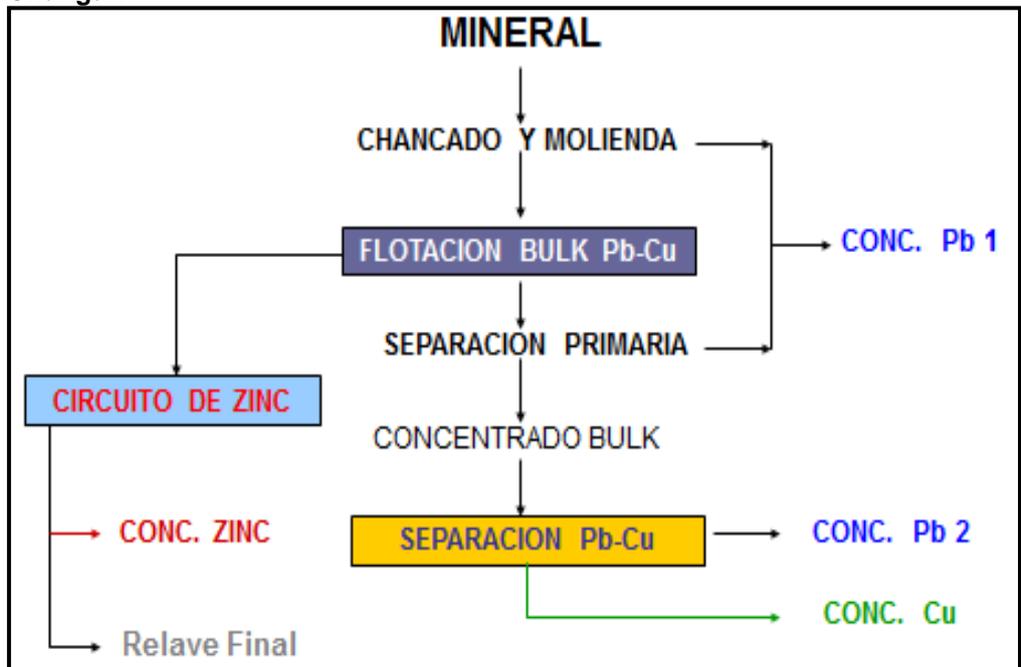
También tenemos el mineral polimetálico que trabaja la mina Antamina, que obtiene concentrados de cobre, zinc y molibdeno.

Figura N° 2,2: Esquema del tratamiento del mineral de cobre, zinc y molibdeno en la mina de Antamina.



Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA.

Figura N° 2,3: Esquema del tratamiento del mineral polimetálico de plomo, cobre, zinc en las minas de Raura, Milpo, Atacocha, Huaron, Quiruvilca, Chungar.



Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA.

## **2.2. BASES TEÓRICO – CIENTÍFICOS.**

### **2.2.1. FLOTACIÓN DE MINERALES.**

Los minerales son recursos no renovables que benefician la industria metálica y la no metálica.

Los minerales presentes en la naturaleza se distinguen de menas y gangas, las menas, son consideradas de valor comercial y son escasos, son extraídas de las minas y beneficiadas en las plantas concentradoras, y contienen generalmente sulfuros, utilizando el método de flotación.

La flotación de minerales es un proceso físico-químico de concentración de minerales finamente molidos.

Es un proceso selectivo que se emplea para llevar a cabo separaciones específicas de minerales complejos, basándose en las diferentes propiedades superficiales de cada uno.

La flotación es un fenómeno superficial. Una partícula aerofílica o hidrofóbica en un sistema de flotación, es aquella que es fuertemente atraída a una interface de aire. Por otro lado, una partícula hidrofóbica en el mismo ambiente, tiende a permanecer cubierta con agua, las condiciones diferenciales que promueven la separación de partículas aerofílicas de partículas hidrofílicas, son fenómenos de superficie. El

desarrollo de la teoría de flotación se presenta basada en la importancia que tiene la envoltura hidratada, la cual rodea todas las partículas de minerales en una pulpa. Se harán esfuerzos para establecer las fuerzas que adhieren las partículas físico-químicos y la película de aire a los sólidos en la pulpa. La envoltura química aplicada a la partícula le confiere el carácter aerofilico o hidrofílico a la superficie. De esta manera, la naturaleza de la materia fundamental tiene finalmente muy poco efecto sobre el medio ambiente, literalmente se flotan superficies hidrofóbicas.

#### **a) FASES DE LA FLOTACIÓN.**

Según la definición de flotación contempla la presencia de tres fases: solida, liquida y gaseosa.

#### **FASE SOLIDA.**

Está representada por los sólidos a separar (minerales) que tienen generalmente una estructura cristalina. Los factores de importancia en el proceso de flotación, en los que se refiere a los sólidos, son los siguientes:

- Carácter de la superficie aireada en la ruptura de solidos (tipo de superficie, fuerza residual de enlace).
- Imperfecciones en la red cristalina.

- Contaminaciones provenientes de los sólidos, líquidos y gases.

### **FASE LIQUIDA.**

Es el agua debido a su abundancia y bajo precio; y también debido a sus propiedades específicas, constituye un medio ideal para dichas separaciones.

Se debe subrayar la importancia de las impurezas y contaminaciones que tiene todo agua natural o industrial; se puede mencionar a la dureza del agua, se define como la contaminación natural causada por sales de Ca, Mg, y Na, estas sales es la causante del mayor consumo de reactivos de flotación con los cuales a menudo forman sales solubles.

A parte de la contaminación inorgánica, también la contaminación orgánica que puede ser mucha más importante y peligrosa, particularmente si se trata de aguas servidas.

### **FASE GASEOSA.**

Es el aire que se inyecta en la pulpa neumática o mecánicamente para poder formarlas burbujas que son los

centros sobre los cuales se adhieren las partículas sólidas. El aire es una mezcla de nitrógeno (78,10%) y oxígeno (20,96%) con pequeñas cantidades de CO<sub>2</sub> (0,04%) y gases inertes con argón y otros.

Las funciones del aire en el proceso de flotación son:

- El aire influye químicamente en el proceso de flotación.
- Es el medio de transporte de las partículas de mineral hasta la superficie de la pulpa.

#### **b) FACTORES QUE INTERVIENE EN LA FLOTACIÓN.**

En todo proceso de flotación intervienen 4 factores principales: pulpa, aire, reactivos y agitación mecánica.

Los reactivos, son sustancias químicas que sirven para la recuperación de los minerales valiosos y otros, despreciando o deprimiendo a la ganga e insolubles. Mediante el uso de reactivos podemos seleccionar los elementos de valor en sus respectivos concentrados.

La agitación, esta operación nos permite la formación de espumas de aire para la flotación y además sirve para la obtención de una mezcla uniforme de los reactivos con los

elementos que constituyen el mineral de la pulpa, dentro de la celda. Además, la agitación evita el asentamiento de los sólidos contenidos en la pulpa.

### **c) REACTIVOS DE FLOTACIÓN.**

Los reactivos de flotación por espumas corresponden a sustancias orgánicas que promueven, intensifican y modifican las condiciones óptimas del mecanismo físico-químico del proceso; se clasifican en 3: colectores, espumantes y modificadores.

#### **COLECTORES.**

Son moléculas o iones orgánicas que son absorbidos por las superficies de los minerales para volverlos hidrofóbicos de esa manera crear las condiciones favorables de su adherencia a las burbujas de aire.

Todos son llamados promotores, dando carácter hidrofóbico a las partículas minerales que se desea flotar.

El hidrofóbico del mineral se debe al radical hidrocarburo del promotor, impidiendo y destruyendo su hidratación, así mismo da al colector más estabilidad de absorción sobre la superficie del mineral.

## **ESPUMANTES.**

Son sustancias orgánicas heteropolares poco solubles en agua y reduce la tensión superficial del agua. Estos reactivos se adhieren a la interface aire-agua, para formar una espuma dentro de la pulpa y salen a la superficie de la pulpa.

## **MODIFICADORES.**

Los reactivos modificadores: tales como activadores, depresores, modificadores de pH, floculantes, dispersantes, sulfurantes y otros. Se usan para intensificar o reducir la acción de los colectores sobre la superficie del material o para modificar las propiedades fisicoquímicas de la superficie de las partículas minerales según sea el caso.

### **d) VARIABLES DE LA FLOTACIÓN.**

#### **FACTOR MINERAL.**

Tenemos ley de cabeza, dureza de mineral, ganga, oxidación, geología (características del mineral), y otros. Los silicatos, sulfatos y otros óxidos son un problema en la flotación.

### **FACTOR GRANULOMÉTRICO.**

El tamaño apropiado para que las burbujas lo puedan llevar a la superficie lo más recomendable para flotar el máximo es de 0,3 mm para sulfuros y los mínimos están sobre los 30 micrones.

### **FACTOR INFLUENCIA DE LAMAS.**

Las lamas tienen un efecto perjudicial, significando un aumento considerable en el consumo de los reactivos de flotación, hay un aumento de la viscosidad de la pulpa cuando las lamas finas recubren a los minerales valiosos se transforman a poco flotable, quedan en el relave después de haber tenido una buena superficie y liberación.

### **FACTOR DENSIDAD DE PULPA (d).**

El porcentaje (%) de sólidos dependerá de la disposición de agua, pero dentro de los límites razonables. La densidad de la pulpa recomendable es 1250 g/l, es aconsejable en la mayoría de los casos.

### **FACTOR CALIDAD DEL AGUA.**

Es recomendable utilizar agua blanda para evitar el mayor consumo de reactivos de flotación y la corrosión a las

máquinas de flotación.

### **FACTOR AIREACION.**

La aireación permitirá aumentar o retardar la flotación en beneficio de la recuperación o de la ley, respectivamente.

El aire es uno de los tres elementos imprescindibles en el proceso de flotación, junto con el mineral y el agua.

### **OTRAS VARIABLES.**

Tiempo de residencia, calidad y cantidad de reactivos de flotación, temperatura de pulpa, pH, altura de la espuma, tiempo de residencia, orden de adición de los reactivos, solubilidad de los reactivos, etc.

### **e) FASES Y TIEMPOS DE FLOTACIÓN.**

- Primera fase: absorción de los reactivos sobre la superficie del mineral.
- Segunda fase: encuentro de la partícula con la burbuja de aire.
- Tercera fase: transporte de las partículas de minerales por la burbuja de aire.

Los minerales flotan de 5-30 minutos cuando están bien liberados, siendo de 8-10 minutos el tiempo promedio de

flotación. Los sulfuros metálicos flotan rápidamente, los óxidos lentamente y los no metálicos rápidamente.

### **2.2.2. TERMODINÁMICA DE LA FLOTACIÓN.**

La flotación se explica entonces, en base a las propiedades hidrofóbicas de las partículas que tienen facilidad de adherirse y forma uniones estables con las burbujas de aire, anteriormente preparadas con ayuda de un espumante adecuado, sin embargo, la interrogante de todo proceso es: ¿cuál es la fuerza que hace posible la unión entre burbujas y la partícula?

La flotación de minerales se basa en el contacto íntimo entre tres fases, una sólida, una líquida y una gaseosa. Las dos últimas están representadas casi siempre por el agua y por el aire respectivamente. El sólido está constituido por minerales, sin embargo, existen experiencias recientes en las que se han utilizado  $SO_2$  o inclusive esferas de poliestireno, como medios para el transporte de las partículas de mineral que se desea separar, en reemplazo del aire.

Para que en la práctica ocurra la adhesión entre una burbuja y una partícula mineral, deben cumplirse condiciones termodinámicas a la vez que hidrodinámicas.

En primer lugar, debe ocurrir un encuentro físico entre la partícula y la burbuja (colisión). Para que dicha colisión sea exitosa se requiere que durante el corto tiempo que dura la colisión, tenga lugar el adelgazamiento y ruptura del film de líquido que los separa y se forme una nueva interface mineral/aire. Tanto la espontaneidad con que ocurra esta etapa, así como, la estabilidad en el tiempo de esta adhesión, dependen de la hidrofobicidad del mineral.

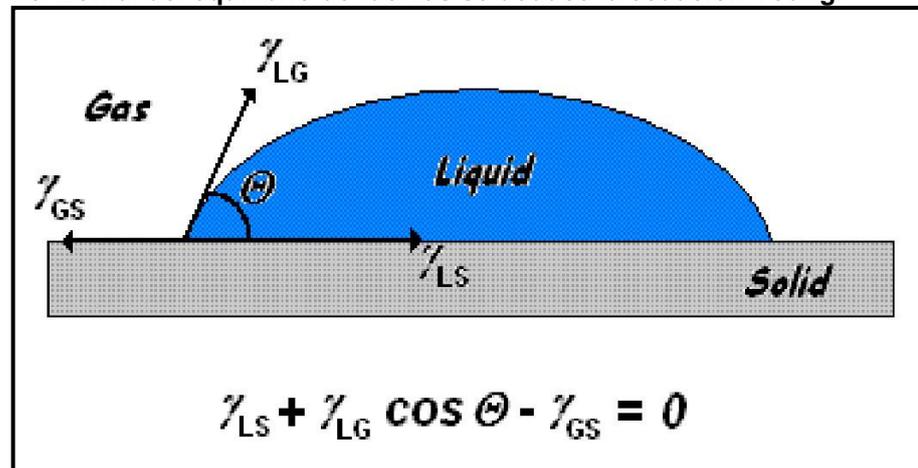
Durante la adhesión hay un efecto cinético importante. Hay un tiempo mínimo necesario para que ocurra una adhesión estable, llamado tiempo de inducción. Lógicamente, en la flotación se requiere que el tiempo de inducción sea menor que el tiempo de duración de la colisión.

Durante este corto lapso de tiempo debe ocurrir el reemplazo de la interface mineral/solución por la interface mineral/gas, lo cual involucra vencer ciertas fuerzas de oposición que surgen de la energía superficial del agua dispersa en un film muy delgado que a su vez es función de la afinidad con la superficie mineral. La flotación es básicamente la adhesión de una partícula mineral parcialmente hidrofóbica a una burbuja de gas. La propiedad que gobierna la hidrofobicidad es la tensión superficial.

La flotación ocurre cuando el balance de las tensiones superficiales en el sistema trifásico mineral/gas/líquido (generalmente agua) son favorables. Termodinámicamente, está dado por la expresión que define el cambio de energía libre superficial para la adhesión partícula/burbuja en medio acuoso.

Para el análisis de la espontaneidad de la adhesión y ante la falta de técnicas adecuadas para medir experimentalmente las tensiones interfaciales sólido/gas y sólido/líquido, se recurre a la ecuación de Young (Figura 2,4).

**Figura N° 2,4: Angulo de Contacto de una gota sobre la superficie de un sólido. Las tensiones interfaciales son representadas vectorialmente tangente a su interfaz. A partir de la componente horizontal del equilibrio de fuerzas se deduce la ecuación Young.**



Fuente: <https://lavallab.com/es/products/tensiometros/angulo-de-contact/>

Esto último define un parámetro medible vinculado a la hidrofobicidad, que es el ángulo de contacto  $\theta$ , en función de las tensiones interfaciales.

### **2.2.3. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA ADHESIÓN**

#### **PARTÍCULA – BURBUJA.**

Ningún sólido es completamente insoluble en un líquido electrolítico, como por ejemplo el mineral en agua, las reacciones entre moléculas de agua y varias superficies minerales no son todas iguales, por lo tanto, las energías libres de la solución varían. Como resultado de esto, algunos minerales o metales pasarán a solución en cantidades diferentes. De acuerdo a esto, el balance eléctrico en las superficies de las partículas cambia, porque la superficie mineral, adquiere una carga que es opuesta en signo a los iones que han sido disueltos.

El incremento en la carga eléctrica debido a la concentración de un tipo de ion en la superficie, obstruye el movimiento de los iones migrantes, desde la celda cristalina a la solución. Algunos de los iones que han pasado a la solución, están concentrados por la acción de la carga superficial, en la vecindad inmediata de la cara del mineral. De esta manera ocurre una separación de cargas y esta condición es la llamada doble capa eléctrica.

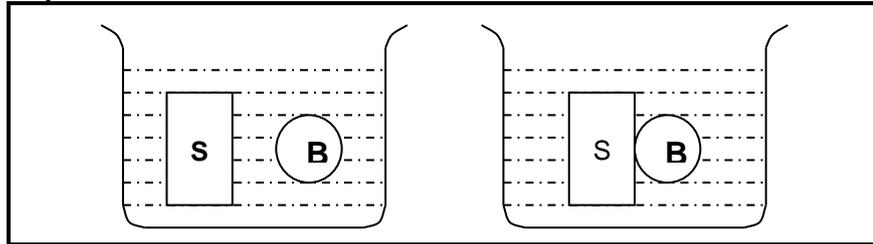
La capa interior se debe a la superficie cargada de mineral y la capa exterior está constituida de iones extraídos de la superficie del mineral por la acción de las moléculas del agua.

La capa interior de esta doble capa eléctrica se esparce solamente sobre la superficie mineral inmediata y no penetra profundamente en la fase sólida. Opuestos a esta capa interior, se asume que los iones en la capa exterior están posicionados a alguna distancia en la fase líquida. Estos iones probablemente están dispersos hacia fuera de la superficie mineral, pero sujetos a las grandes fuerzas eléctricas, tal como existen en el agua, la concentración del ion será una función de la distancia.

Aquellos iones que se encuentran en la vecindad de la superficie mineral, están fuertemente enlazados a la superficie, que, si la partícula mineral se mueve, los iones también se moverán con ella. Cualquier ion que se encuentre en las capas distantes de la superficie mineral tiende a separarse de la superficie sólida durante el movimiento, el equilibrio eléctrico del sistema se rompe y se genera luego una diferencia de potencial entre el líquido y la partícula en movimiento.

Consideremos la variación de energía libre superficial para el sistema descrito en la figura adjunta (Figura N° 2,5).

**Figura N° 2,5. Proceso de adhesión partícula – burbuja en una dispersión acuosa.**



**Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA**

En el proceso de adhesión partícula burbuja en una dispersión acuosa, haciendo la diferencia entre la energía libre final menos la inicial nos queda:

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG}$$

Donde:

$\Delta G_{adh}^s$  : Es la variación de energía libre superficial durante la adhesión partícula mineral burbuja.

$\gamma_{SG}$ : Son tensiones interfaciales para la interface solido/gas.

$\gamma_{SL}$ : Son tensiones interfaciales para la interface solido/liquido.

$\gamma_{LG}$ : Son tensiones interfaciales para la interface liquido/gas.

Para el análisis de la espontaneidad de la adhesión y ante la falta de técnicas adecuadas para medir experimentalmente las tensiones interfaciales sólido/gas y sólido/líquido, se recurre a la ecuación de Young. Esto último define un parámetro medible vinculado a la hidrofobicidad, que es el ángulo de contacto  $\theta$ , en función de las tensiones interfaciales.

En el año 1805 Thomas Young propuso tratar el ángulo de contacto de una gota de líquido colocada sobre una superficie sólida plana, como un equilibrio mecánico de las tensiones

interfaciales sólido/líquido, sólido/gas y líquido/gas (figura 2,4).

$$\gamma_{LG} \cos\theta = \gamma_{SG} - \gamma_{SL}$$

Si combinamos las ecuaciones se llega a:

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG}$$

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} \cos\theta - \gamma_{LG}$$

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} (\cos\theta - 1)$$

Dando el ángulo de contacto, cuando  $\theta$  es a  $0^\circ$ ,  $\cos\theta = 1$ .

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} (\cos 0 - 1)$$

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} (1 - 1)$$

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} (0)$$

$$\Delta G_{adh}^s = 0$$

Cuando el ángulo de contacto ( $\theta$ ) es igual a  $90^\circ$ ,  $\cos\theta = 0$ .

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} (\cos 90 - 1)$$

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} (0 - 1)$$

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} (-1)$$

$$\Delta G_{adh}^s = -\gamma_{LG}$$

Cuando el ángulo de contacto ( $\theta$ ) es igual a  $180^\circ$ , el  $\cos\theta = -1$ .

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} (\cos 180 - 1)$$

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} (-1 - 1)$$

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG} (-2)$$

$$\Delta G_{adh}^s = -2\gamma_{LG}$$

De aquí se desprende que la adhesión será termodinámicamente más probable mientras mayor sea el ángulo de contacto. Para un ángulo de contacto igual a cero no

ocurrirá la adhesión partícula – burbuja por lo tanto sería un mineral no flotable.

Fuerstenau y Chander señalan que aun cuando la termodinámica puede llegar a predecir la ocurrencia de la flotación cuando el ángulo de contacto es finito, la flotación en sistemas reales puede ocurrir solo si el ángulo de contacto ( $\theta$ ) es superior a determinado valor. El mínimo ángulo de contacto sobre el cual puede flotarse es función de muchos factores que incluye la gravedad específica del mineral, el tipo de colector etc. Por ejemplo, el mínimo ángulo de contacto para la flotación de cuarzo a diferentes pH y concentraciones del colector dodecilamina es de aproximadamente  $10^\circ$ .

Este análisis termodinámico, al igual que cualquier otro, no proporciona información sobre la cinética del proceso, ni sobre su mecanismo por lo cual se le debe asignar solo un carácter estadístico.

Se debe tener claro entonces que será de suma importancia los efectos cinéticos durante el proceso de adhesión. No se debe olvidar también que la flotación es un proceso dinámico y que el ángulo de contacto ( $\theta$ ) es un parámetro medido bajo condiciones de equilibrio.

#### **2.2.4. CINÉTICA DE FLOTACIÓN.**

Arbiter y Harris señalan que la cinética de la flotación es el estudio de la variación de la cantidad de espumas producidas en el overflow en el tiempo de flotación y la identificación cuantitativa de todas las variables que controlan la velocidad de flotación.

Blazzy señala que la cinética de la flotación de minerales puede caracterizarse por la variación en el tiempo de la cantidad de producto transportado por las espumas. Es posible relacionar el tiempo de dicha flotación con la cantidad de mineral flotado.

El tipo de ecuación que describe el fenómeno se deduce, bien de presunciones basadas en la teoría, o bien sea de los hechos establecidos por el estudio del mecanismo de la flotación de minerales, o bien sobre todo por las observaciones empíricas.

### **2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.**

#### **2.3.1. PLANTA CONCENTRADORA.**

Son plantas donde tratan minerales pobres con el objetivo de separar los minerales valiosos, y los que no valen son eliminados como relave.

### **2.3.2. ADSORCION.**

Las interfaces gas-liquido desempeñan un papel importante en los fenómenos de adsorción cuando los líquidos contienen sustancias disueltas están en distintas concentraciones en el líquido mismo y en su interface con el gas. Este fenómeno de cambio de concentración que la materia disuelta presenta entre el líquido y su interface con el gas se llaman adsorción.

### **2.3.3. MINERALES HIDROFÓBICOS.**

Son aquellos minerales que no son mojables o son pocos mojables por el agua, dentro de ellos tenemos: los metales nativos, sulfuros de metales o especies tales como: grafito, carbón bituminoso, talco y otros, haciendo de que evite el mojado de las partículas minerales, que pueden adherirse a las burbujas de aire y ascender.

Además, se puede observar, que los minerales hidrofóbicos son aerofílicos, ósea tienen afinidad con las burbujas de aire, mientras que los hidrofílicos son aerofóbicos, ósea no se adhieren normalmente a ellas.

### **2.3.4. MINERALES HIDROFÍLICOS.**

Son mojables por el agua, constituidos por: óxidos, silicatos,

carbonatos y otros, que generalmente representan la mayoría de los minerales estériles o ganga. Haciendo que se mojen, y permanezcan en suspensión, para finalmente hundirse.

### **2.3.5. TENSIÓN SUPERFICIAL.**

Se denomina tensión superficial de un líquido a la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área. Esta definición implica que el líquido presenta una resistencia al aumentar su superficie, poder desplazarse por la superficie del agua sin hundirse. La tensión superficial (una manifestación de las fuerzas intermoleculares en los líquidos), junto a las fuerzas que se dan entre los líquidos y las superficies sólidas que entran en contacto con ellos, da lugar a la capilaridad. Como efecto tiene la elevación o depresión de la superficie de un líquido en la zona de contacto con un sólido.

Otra posible definición de tensión superficial: es la fuerza que actúa tangencialmente por unidad de longitud en el borde de una superficie libre de un líquido en equilibrio y que tiende a contraer dicha superficie. Las fuerzas cohesivas entre las moléculas de un líquido son las responsables del fenómeno conocido como tensión superficial.

### **2.3.6. RECURSOS NO RENOVABLES.**

Es un recurso natural que no puede ser producido, regenerado o reutilizado a una escala tal que pueda sostener su tasa de consumo. Estos recursos frecuentemente existen en cantidades fijas o son consumidos mucho más rápido de lo que la naturaleza pueda crearlos.

### **2.3.7. MENAS.**

Es el mineral que presenta interés minero. En general, es un término que se refiere a minerales metálicos y que designa al mineral de que se extrae el elemento de interés.

### **2.3.8. GANGA.**

Es la parte del mineral que no tiene valor comercial.

### **2.3.9. PULPA.**

La pulpa viene a ser una mezcla por sólidos de una granulometría casi uniforme y otra constituida por un líquido, generalmente es agua.

### **2.3.10. pH.**

Es un indicador de alcalinidad o acidez de la pulpa en la flotación, ya que resulta fundamental en la recuperación,

selectividad y en la depresión de minerales. Los reactivos de flotación, principalmente los colectores, operan mejor en ciertos rangos de pH.

#### **2.3.11. RAZÓN DE CONCENTRACIÓN.**

La razón (o ratio) de concentración en términos prácticos, se refiere a las toneladas de mineral necesarias obtener para obtener una tonelada de concentrado.

### **2.4. HIPÓTESIS.**

#### **2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL.**

Evaluando los minerales del Yacimiento de Caolín por el método de flotación selectiva se logra la recuperación del cobre.

#### **2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS.**

- a) Flotando los minerales de cobre del yacimiento de Caolín determinaremos sus características, y lograremos recuperar valores contenidos de cobre.
- b) Realizando el proceso de flotación tendremos el Balance Metalúrgico, y nos reportara el porcentaje de recuperación de cobre.

c) Evaluando la flotación obtendremos datos sobre los reactivos, que tienen efectos sobre la recuperación del cobre.

## 2.5. IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES.

### 2.5.1. VARIABLE DEPENDIENTE.

Porcentaje de recuperación del cobre.

### 2.5.2. VARIABLES DEPENDIENTES.

Pruebas de flotación del mineral de cobre.

### 2.5.3. VARIABLES INTERVINIENTES.

- El pH de la pulpa
- Densidad de la pulpa
- Adición de reactivos.

## 2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Variables	Indicadores
<b>Dependiente:</b> Recuperación del cobre.	Porcentaje de cobre en concentrado
Pruebas de flotación del mineral de cobre.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH de la pulpa.</li> <li>• Densidad de la pulpa.</li> <li>• % Z -11</li> <li>• Gotas MIBC</li> <li>• Kg CaO</li> </ul>

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGIA**

#### **3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.**

De acuerdo al fin que se persigue es Aplicado.

#### **3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.**

La investigación es experimental y se realizó de la siguiente manera:

- Las muestras se tomaron en el yacimiento minero por el método de canales, previo a una planificación de mallas de muestreo.
- Se cuartearon y homogenizaron las muestras, obteniéndose dos sacos de 50 kilos cada uno.
- Se trituraron las muestras a 100%, - 10 mallas.
- Se realizaron análisis químico del mineral de cabeza.
- Se pesaron muestras de un kilogramo para las pruebas de

molienda y flotación. En total se han obtenido 20 muestras de un kilogramo.

- Se realizaron pruebas de moliendabilidad para obtener los tiempos óptimos para la flotación.
- Se realizaron las pruebas de flotación.
- Se realizaron análisis químico de los productos de la flotación.

### **3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.**

#### **3.3.1. POBLACIÓN.**

El mineral de cobre del yacimiento minero Caolín.

#### **3.3.2. MUESTRA.**

Obtenido de sucesivas etapas de cono y cuarteado del mineral de la mina Caolín.

### **3.4. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.**

El método es experimental porque a través de las pruebas se describe, analiza y se interpreta sistemáticamente un conjunto de hechos relacionados con otras variables.

### **3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.**

Las técnicas usadas en la investigación son las siguientes:

#### **a) MUESTREO.**

Se ha obtenido las muestras de acuerdo al protocolo de muestreo que tiene la empresa, de calicatas, por el método de redes, que luego se homogeniza a través de sucesivas etapas de cono y

cuarteado, para obtener una muestra representativa.

#### **b) PRUEBAS DE FLOTACIÓN.**

En base a las marchas analíticas aprendidas en las aulas universitarias, se desarrolló las pruebas de chancado, molienda y flotación, cuyos datos se ha obtenido en cuadros previamente establecidos.

### **3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.**

Para el procesamiento de datos, de acuerdo a la etapa de la investigación se desarrolló lo siguiente:

- Chancado: análisis de mallas y pesadas.
- Molienda: pesadas, adición de gramos de CaO, gotas de Z-11.
- Flotación: adición de gotas de MIBC, pesadas.

### **3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS**

Se aplicó una estadística simple, calculándose los promedios de la ley de concentrados de cobre y el porcentaje (%) de recuperación de cobre, la desviación estándar ley de concentrados de cobre y el porcentaje (%) de recuperación de cobre, todo desarrollado en el software EXCEL.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS, TABLAS, GRÁFICOS Y FIGURAS.**

El mineral de la mina Utcush, de la Compañía Minera Caolín S.R.L, proveniente de los niveles de operación 2 850 y 3 250, fueron analizadas y reporta los siguientes datos:

El reporte manifiesta la presencia de cobre que varía de 3% a 6,41% con presencia de oro y plata en cantidades variables. (Tabla N° 4,1).

Se realizó un compósito general con minerales de varios frentes

provenientes del cálculo de las reservas que reporto el departamento de geología.

Con estas muestras de mineral polimetálico se desarrollaron ensayos metalúrgicos.

**Tabla N° 4.1: Resultados promedios del análisis de muestras del mineral de mina de los niveles 2 850 y 3 250.**

NIVEL	MUESTRA	% Cu	% As	Ag (Oz/TM)	Au (g/TM)
2 850	1	6,41	-	0,46	-
3 250	2	3,00	0,02	0,38	-
	3	3,92	-	-	0,23

Fuente: Laboratorio químico de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

Se desarrollaron 15 pruebas de flotación con el mineral polimetálico, para evaluar la recuperación de sus contenidos metálicos tales como cobre, plata y oro. La dosificación de reactivos y la calidad de los concentrados a obtenerse.

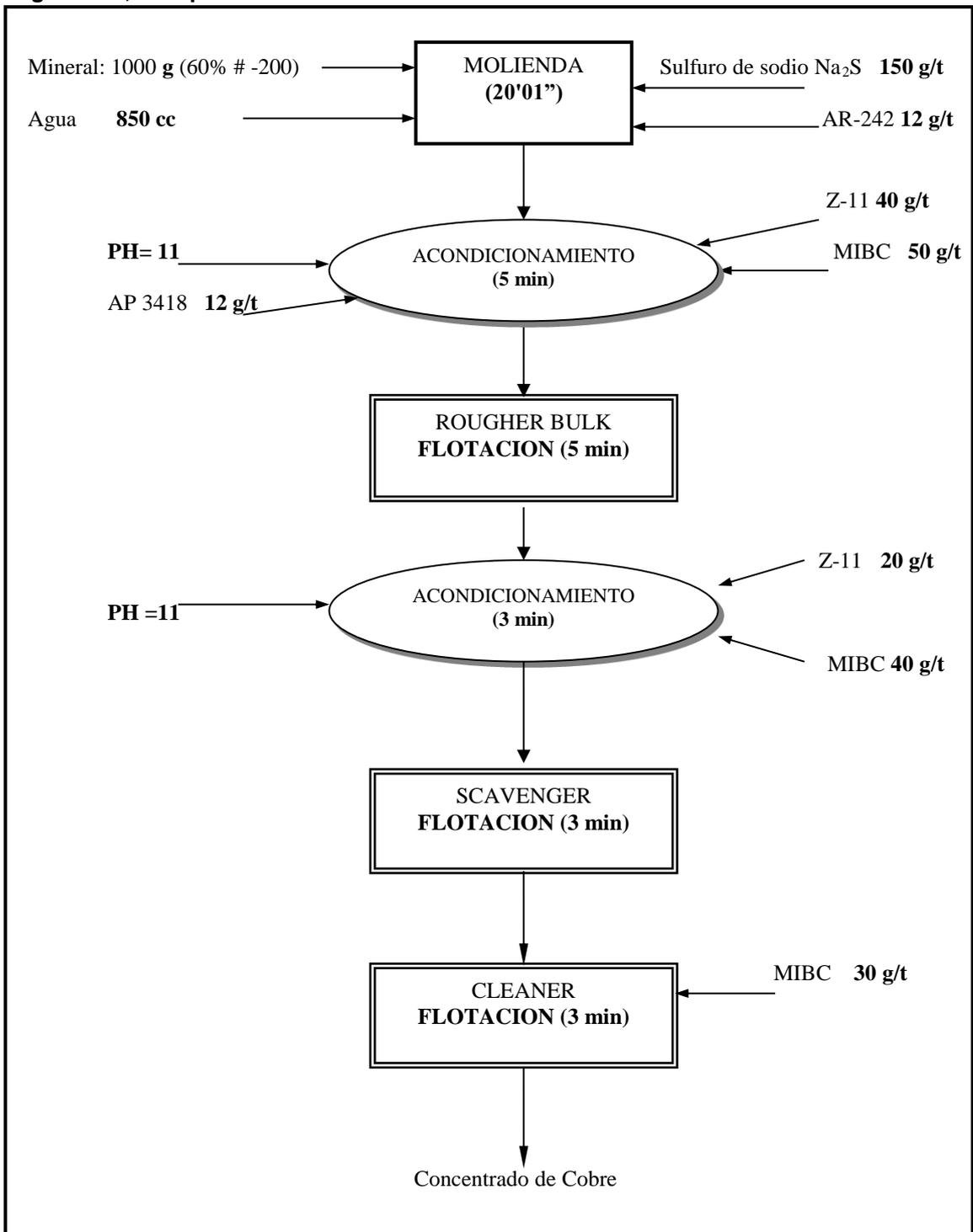
Los minerales recibidos reportaron las siguientes leyes.

**Tabla N° 4.2: Análisis químico realizado para el mineral de cabeza compuesto.**

LEYES					
	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ag (oz/TM)	Au (g/TM)
<b>MINA</b>	2,66	0,15	0,21	0,46	0,06

Fuente: Laboratorio químico de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

**Figura N° 4,1: Esquema de Flotación estándar Minera Caolín S.R.L.**



Fuente: Empresa Minera Caolín S.R.L.

Las muestras del mineral de cabeza siguieron las siguientes etapas experimentales:

- Se prepararon las muestras a 100% - 10 mallas. Pesándose muestras de 1 kg para las pruebas de flotación.
- Se realizaron pruebas de Moliendabilidad para obtener los tiempos óptimos para la flotación.
- Se realizaron las pruebas de flotación.

Los resultados de las pruebas metalúrgicas se muestran a continuación.

## **4.2. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.**

### **4.2.1. PRUEBAS DE MOLIENDABILIDAD.**

Se realizaron pruebas de molienda para determinar la curva de moliendabilidad. El siguiente cuadro nos muestran los resultados obtenidos.

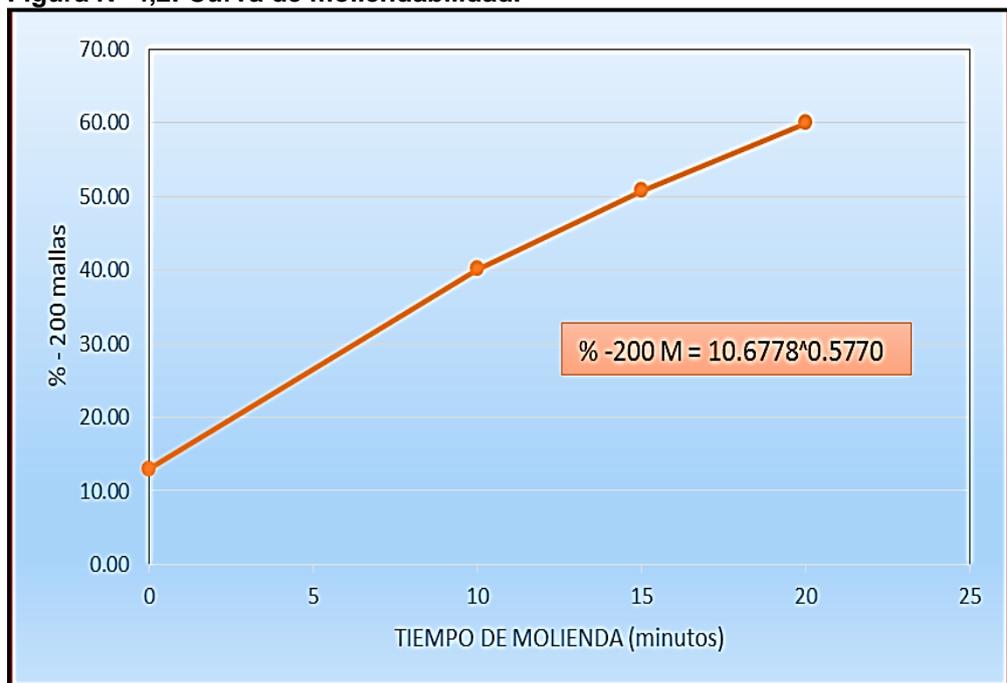
**Tabla N° 4,3: Prueba de moliendabilidad**

TIEMPO (minutos)	% - 200 mallas
0	13,00
10	40,20
15	50,80
20	59,97

60% - 200 mallas = 20' 01"

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA.

**Figura N° 4,2: Curva de moliendabilidad.**



Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA.

## 4.2.2. PRUEBA DE FLOTACIÓN.

### 4.2.2.1. MEJOR PRUEBA DE FLOTACIÓN.

#### Mineral de MINA

Condiciones:

Molienda

- Peso de mineral : 1000 g.
- Granulometría : 60% - 200 mallas
- Sulfuro de Sodio : 150 g/TM
- NaCN : 50 g/TM
- ZnSO<sub>4</sub> : 200 g/TM
- AR-242 : 12 g/TM
- Tiempo : 20´ 01”

#### Flotación Rougher Bulk

- Acondicionamiento : 5´
- pH flotación : 7,60
- AP 3418 : 10 g/TM
- Z-11 : 40 g/TM
- MIBC : 30 g/TM
- Flotación : 5´

#### Flotación Scavenger Bulk

- Acondicionamiento : 3´
- Z-11 : 20 g/TM
- MIBC : 30 g/TM
- Flotación : 3´

### **Flotación Cleaner Bulk**

- MIBC : 30 g/TM
- Flotación : 3´

### **Flotación Rougher Bulk Zn**

- Acondicionamiento : 5´
- Cal : 3.2 Kg/TM
- pH flotación : 11.00
- CuSO<sub>4</sub> : 200 g/TM
- Z-11 : 100 g/TM
- MIBC : 30 g/TM
- Flotación : 2´

No se observa concentrado de Zinc por su ley baja en la cabeza.

El concentrado Bulk básicamente es de cobre ya que no se observa minerales de plomo.

La siguiente tabla, nos muestra el Balance metalúrgico de la mejor prueba de flotación del mineral de MINA.

**Tabla N° 4,4: Balance metalúrgico de la mejor prueba de flotación – mineral de MINA**

	% Peso	LEYES			RECUPERACIÓN (%)			RADIO DE CONCENTRACIÓN
		Cu %	Ag oz/TM	Au g/TM	Cu %	Ag %	Au %	
Cabeza Flotación	100,00	2,66	0,460	0,060	100,00	100,00	100,00	
Concentrado Cu	4,56	29,20	5,100	0,500	56,05	51,63	49,22	21,93
Medios Cu	4,82	8,50	1,700	0,300	17,25	18,19	31,22	
Conc. Rougher Cu	9,38	18,56	3,353	0,397	73,30	69,82	80,44	10,66
Relave Flotación	90,62	0,70	0,150	0,010	26,70	30,18	19,56	
Cabeza calculada	100,00	2,376	0,450	0,046	100,00	100,00	100,00	

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA.

#### 4.2.2.2. PRUEBA DE FLOTACIÓN DEL PROMEDIO DEL MINERAL DE MINA.

Para comprobar solo la flotación de cobre se realizó esta prueba a un pH 11.

Condiciones:

##### **Molienda**

- Peso de mineral : 1000 g
- Granulometría : 60% - 200 mallas
- Cal : 3 Kg/TM
- Sulfuro de Sodio : 150 g/TM
- AR-242 : 12 g/TM
- Tiempo : 20´ 01”

##### **Flotación Rougher Cu**

- Acondicionamiento : 5´
- pH flotación : 11.00
- AP 3418 : 12 g/TM
- Z-11 : 40 g/TM
- MIBC : 50 g/TM
- Flotación : 5´

##### **Flotación Scavenger Cu**

- Acondicionamiento : 3´
- Z-11 : 20 g/TM
- MIBC : 40 g/TM
- Flotación : 3´

### **Flotación Cleaner Cu**

- MIBC : 30 g/TM
- Flotación : 3´

En el siguiente cuadro se reporta el balance metalúrgico de la prueba de flotación promedio, de mineral de MINA.

**Tabla N° 4,5: Balance metalúrgico de las pruebas de flotación promedio – mineral de MINA**

	% Peso	LEYES			RECUPERACION (%)			RADIO DE CONCENTRACION
		Cu %	Ag oz/TM	Au g/TM	Cu %	Ag oz/TM	Au gr/TM	
Cabeza Flotación	100,00	2,66	0,460	0,060	100,00	100,00	100,00	
Conc. Cu	5,17	28,16	4,230	0,450	63,50	47,12	57,72	19,345
Medios Cu	3,98	7,33	1,600	0,200	12,72	13,72	19,75	
Conc. Rougher Cu	9,15	19,10	3,086	0,341	76,22	60,85	77,46	10,930
Relave Flotación	90,85	0,60	0,200	0,010	23,78	39,15	22,54	
Cabeza calculada	100,00	2,293	0,464	0,040	100,00	100,00	100,00	

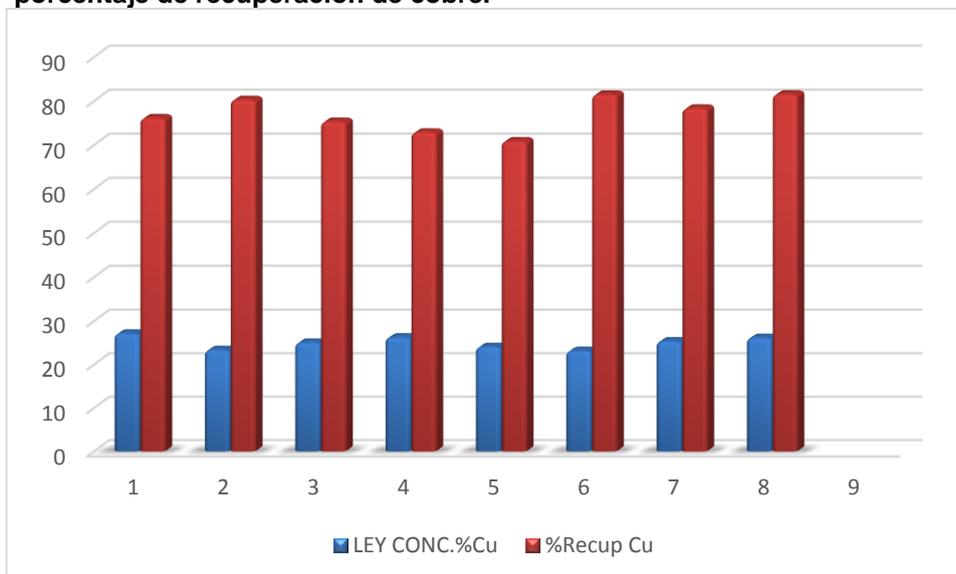
Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA.

**Tabla N° 4,6: Resumen de leyes de concentrado y recuperaciones alcanzadas en las pruebas.**

N° De prueba	Ley de concentrado % Cu	% de Recuperación De cobre
1	27,2	76,16
2	23,4	80,31
3	25,1	75,36
4	26,3	72,89
5	24,1	70,92
6	23,2	81,51
7	25,4	78,34
8	26,2	81,55
PROMEDIO	25,11	77,13

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

**Figura N° 4,3: Relación entre la ley de concentrado de cobre con el porcentaje de recuperación de cobre.**



Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

### **4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**

#### **4.3.1. MICROSCOPIA.**

Los Minerales en estudio se observa en el microscopio petrográfico; minerales de cobre (calcopirita masiva con intrusiones de bornita, covelita), piritas y óxidos: de cobre y (cuarzo, limonitas), no se observa oro libre.

Las pruebas de molienda nos indican que el mineral posee una dureza media, factor que influirá en el tiempo de molienda y chancado.

#### **4.3.2. PRUEBA DE FLOTACIÓN ÓPTIMA.**

Las pruebas se realizaron con el mineral compósito proveniente de la mina.

La prueba se realizó a 60% -200 malla a pH= 7,5. El cuadro N° 4,4 nos presenta el Balance Metalúrgico donde el concentrado Cu tiene leyes de 29,20% Cu, 5,100 Ag oz/TM y 0,500 Au g/TM con recuperaciones de 56,05% del cobre, 51,63% de la plata y 49,22% del oro, con un radio de concentración de 21,93. El concentrado Rougher Cu estimado tiene leyes de 18,56% o Cu, 3,353 Ag oz/TM y 0,397 Au g/TM con recuperaciones de 73,30% del cobre, 69,82% de la plata y 80,44% del oro, con un radio de concentración de 10,66.

#### **4.3.3. PRUEBA DE FLOTACIÓN PROMEDIO MUESTRA DE MINA.**

Esta prueba de flotación se realizó a 60% -200 mallas a pH= 11. El cuadro N° 4,5 nos presenta el Balance Metalúrgico donde el concentrado Cu tiene leyes de 28,16% Cu, 4,230 Ag oz/TM y 0,450 Au g/TM con recuperaciones de 63,50% del cobre, 47,12% de la plata y 57,72% de oro, con un radio de concentración de 19,345. El concentrado Rougher Cu estimado tiene leyes de 19,10% Cu, 3,086 Ag oz/TM y 0,341 Au g/TM con recuperaciones de 76,22% de cobre, 60,85% de la plata y 77,46% del oro, con un radio de concentración de 10,93.

#### **4.3.4. LEYES DE CONCENTRADOS Y RECUPERACIONES.**

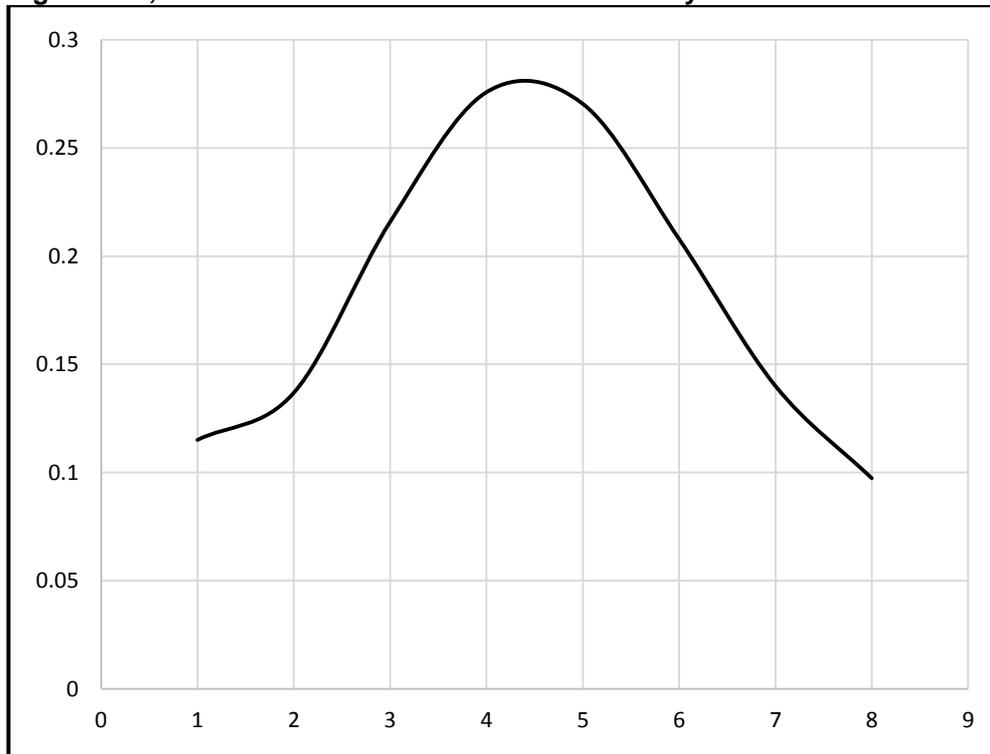
El promedio de la ley de concentrados de cobre obtenidos reporta 25,11%, los promedios de los porcentajes % de recuperaciones reportan 77,13%.

La desviación estándar de la muestra de datos de la ley de concentrados es:  $\sigma = 1,45$

La desviación estándar de la muestra de datos de la recuperación es:  $\sigma = 3,98$

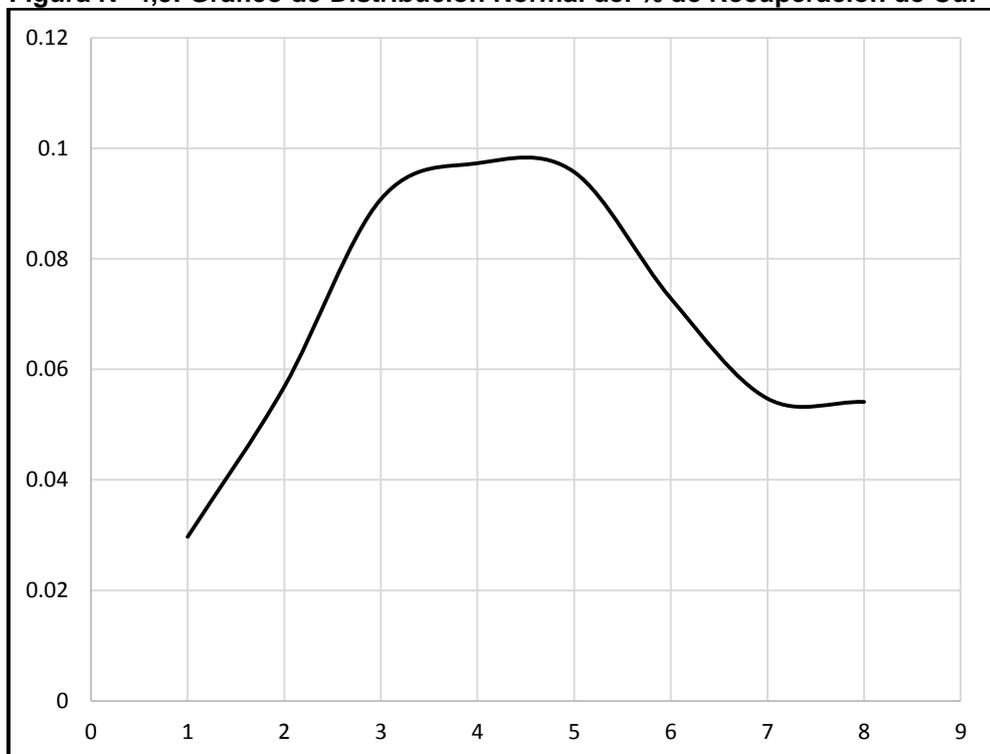
Estos datos corroboran que los experimentos fueron bien realizados. Y sus gráficos se muestran a continuación:

**Figura N° 4,4: Gráfico de Distribución Normal de la Ley de Concentrado de Cu.**



Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

**Figura N° 4,5: Gráfico de Distribución Normal del % de Recuperación de Cu.**



Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

## CONCLUSIONES

1. Las leyes del cobre (2,66%) en el mineral de Mina, son excelentes para trabajar una pequeña minería y tratamiento por flotación; puesto que normalmente la gran minería trabaja por debajo de 1% de cobre.
2. La calidad del concentrado de cobre obtenido en las pruebas es excelente, varía entre 23,2 y 27,2%, teniendo como promedio 25,11%, aunque los contenidos de oro y plata son bajos en el concentrado.
3. La recuperación del cobre varía entre 70,92% y 81,55%, teniendo un promedio de 77,13%, estos resultados se deben a que el mineral presenta óxidos de cobre que no flotan.
4. los contenidos de plomo y zinc en el mineral son bajos, motivo por el cual no tiene leyes comerciables en los concentrados.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar más pruebas con el objetivo de mejorar Las recuperaciones.
2. Se recomienda probar con otro proceso de recuperación, preferentemente que mejoren el contenido de cobre, oro y plata.
3. Se recomienda utilizar otros reactivos preferentemente que aporten a la flotación de óxidos de cobre, y se pueda mejorar el grado de concentrado y las recuperaciones.
4. Evitar la flotación de plomo y zinc, por su bajo contenido en el mineral.

## BIBLIOGRAFIA

1. Sutulov, Alexander (1990). *Flotación de Minerales*. Concepción Chile.
2. Gaudin, A.M (1957). *Flotación*. New York. Mc Graw. pg.22 -180.
3. Astucuri, Venancio (1986). *Fundamentos y Aplicaciones Principales de la Flotación de Minerales*. Lima, pg. 17-223.
4. Caiceo, Fernando (1994). *Diseño Experimental*. Chile, pg. 24-38
5. Chía Aquije, Juan (1984). Traducción, *Operaciones Unitarias en Procesamiento de Minerales*. Lima. pg.7,1-7,22, 9,1-9,15
6. DENVER EQUIPMENT COMPANY (1971). *Modern Mineral Processing Flow sheets*. USA, pg. 48-49, 147
7. Dunin Borkowki, Estanislao (1996). *Minerales Industriales del Perú*, INGEMMET. Lima, pg. 88. Edición PEISA SAC ATLAS, Regional del Perú, Tomo I, pg. 8-11, 78
8. Feddersen (1961). *Chinese Decorative Art, A Handbook for Collectors and Connoisseurs*. Londres, pg. 33-150.
9. Hurlbut Cornelius (1986). *Manual de Mineralogía de Dana*, Edit. Reverte, Barcelona. pg. 516-529.
10. Ayres, Fernando & Torres, Miguel. (1999). *Diseño experimental*, FERAYHI INGENIERIA Y COMPUTACION EIRL, pg. 1-39.
11. Ayala, Jorge & Pardo, Ricardo. (1995). *Optimización por diseños experimentales*, CONCYTEC, 1995. pg. 97-139.

12. Balestrini, M. (2006). *Cómo elaborar el proyecto de investigación*. (5ª Ed.). Caracas: Editorial Consultores Asociados.
13. Blas, Antonio. (2010). *Química Orgánica para Ingenieros* (Segunda Edición).
14. Balestrini, M. (2006). *Cómo se elabora el Proyecto de investigación*. (5ª Ed.). Caracas: Editorial Consultores Asociados.
15. INGEMMET, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.  
w.w.w.ingemet.gob.pe, [informacion@ingemet.gob.pe](mailto:informacion@ingemet.gob.pe)
16. <https://es.scribd.com/document/93338788/Apuntes-de-Concentracion-de-MInerales-I-Universidad-de-Flotacion>
17. <https://www.um.es/documents/378246/2964900/Normas+APA+Sexta+Edici%C3%B3n.pdf/27f8511d-95b6-4096-8d3e-f8492f61c6dc>

# **ANEXOS**

## **ANEXO Nº 01 Cálculos Matemáticos**

### **CÁLCULO MATEMÁTICO 01: APLICACIÓN DEL DISEÑO**

#### **EXPERIMENTAL DE PLACKETT Y BURMAN.**

#### **SELECCIÓN DE LAS VARIABLES MAS SIGNIFICATIVAS DEL PROCESO DE FLOTACIÓN.**

Teniendo como base la consulta en textos de metalurgia extractiva, informaciones de condiciones de trabajo en plantas de extracción de cobre vía Proceso de Flotación, se logra establecer en primera instancia, que las variables que influyen en el proceso citado son las siguientes:

1. AR-242
2. pH
3. Z-11.
4. Tiempo de Acondicionamiento
5. Tiempo de Flotación.

#### **NIVELES DE LAS VARIABLES CONSIDERADAS.**

Para establecer los rangos de variación, también se han hecho estimaciones preliminares sobre las bases de resultados y recomendaciones técnicas de profesionales que han trabajado con el Proceso de Flotación. De esta se resume los siguientes rangos de operación.

**Tabla N° 01: Niveles de Variables**

	VARIABLES	NIVEL (-)	NIVEL (+)
Z1	AR-242	10 g/TM	15 g/TM
Z2	pH	7,5	11
Z3	Z-11.	20 g/TM	40 g/TM
Z4	Tiempo de Acondicionamiento	3´	5´
Z5	Tiempo de Flotación.	5´	10´

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

### Planificación del diseño experimental de Plackett y Burman.

Una vez definido, los niveles para cada factor, y considerando dos variables ficticias, se procedió a efectuar las pruebas.

### Valores de las variables en escala natural (Z<sub>j</sub>).

Esta tabla nos sirve para correr cada una de las 8 pruebas con las variables condicionados a un determinado nivel ya sea mínimo o máximo y obtendremos como respuesta la función objetivo Y, para nuestro caso viene a ser la **Ley de concentrado % Cu** para cada una de las 8 pruebas.

**Tabla N° 02: Pruebas experimentales según Plackett y Burman**

N°	Z0	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
1	1	15	11	20	5´	5´
2	1	15	11	40	3´	5´
3	1	15	7,5	20	3´	10´
4	1	10	11	20	5´	10´
5	1	15	7,5	40	5´	10´
6	1	10	7,5	40	5´	5´
7	1	10	11	40	3´	10´
8	1	10	7,5	20	3´	5´

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

## VARIABLES EN ESCALA CODIFICADA, INCLUYENDO LA POSICION DE LAS VARIABLES FICTICIAS.

Según el metodom de Plackett y Burman recomienda el empleo de variables ficticias, las que figuran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 03: Pruebas experimentales según Plackett y Burman que incluye variables ficticias en escala natural.**

N°	Z0	Z1	Z2	F1	Z3	Z4	Z5	F2
1	1	15	11	1	20	5´	5´	-1
2	1	15	11	-1	40	3´	5´	1
3	1	15	7,5	1	20	3´	10´	1
4	1	10	11	-1	20	5´	10´	1
5	1	15	7,5	-1	40	5´	10´	-1
6	1	10	7,5	1	40	5´	5´	1
7	1	10	11	1	40	3´	10´	-1
8	1	10	7,5	-1	20	3´	5´	-1

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

## ESTIMACION DE EFECTOS DE LAS VARIABLES.

Previamente hemos establecido como función objetivo (Y) la **Ley de concentrado % Cu** en le Proceso de Flotacion. A continuación estamos presentando el vector Y con los resultados de cada una de las 8 pruebas.

**Tabla N° 04: Resultados experimentales obtenidas según el diseño de Plackett y Burman que incluye variables ficticias en escala natural.**

N°	Z0	Z1	Z2	F1	Z3	Z4	Z5	F2	Yexp
1	1	15	11	1	20	5´	5´	-1	76,16
2	1	15	11	-1	40	3´	5´	1	80,31
3	1	15	7,5	1	20	3´	10´	1	75,36
4	1	10	11	-1	20	5´	10´	1	72,89
5	1	15	7,5	-1	40	5´	10´	-1	70,92
6	1	10	7,5	1	40	5´	5´	1	81,51
7	1	10	11	1	40	3´	10´	-1	78,34
8	1	10	7,5	-1	20	3´	5´	-1	81,55

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

Como el método recomienda para el tratamiento de los resultados, los datos reales o naturales deben ser transformados a escala codificada, es decir en terminos mínimos y máximos. Esto se resume en la siguiente tabla.

**Tabla N° 05: Resultados experimentales obtenidas según el diseño de Plackett y Burman que incluye variables ficticias en escala codificada.**

N°	Z0	Z1	Z2	F1	Z3	Z4	Z5	F2	Yexp
1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	76,16
2	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	80,31
3	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	75,36
4	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	72,89
5	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	70,92
6	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	81,51
7	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	78,34
8	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	81,55

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

Calculo del  $[X]^T[Y]$ :

$$[X]^T[Y]Z_0 = 76,16 + 80,31 + 75,36 + 72,89 + 70,92 + 81,51 + 78,34 + 81,55 = 617,04$$

$$[X]^T[Y]Z_1 = 76,16 + 80,31 + 75,36 - 72,89 + 70,92 - 81,51 - 78,34 - 81,55 = -11,54$$

$$[X]^T[Y]Z_2 = 76,16 + 80,31 - 75,36 + 72,89 - 70,92 - 81,51 + 78,34 - 81,55 = -1,64$$

$$[X]^T[Y]F_1 = 76,16 - 80,31 + 75,36 - 72,89 - 70,92 + 81,51 + 78,34 - 81,55 = 5,7$$

$$[X]^T[Y]Z_3 = -76,16 + 80,31 - 75,36 - 72,89 + 70,92 + 81,51 + 78,34 - 81,55 = 5,12$$

$$[X]^T[Y]Z_4 = 76,16 - 80,31 - 75,36 + 72,89 + 70,92 + 81,51 - 78,34 - 81,55 = -14,08$$

$$[X]^T[Y]Z_5 = -76,16 - 80,31 + 75,36 + 72,89 + 70,92 - 81,51 + 78,34 - 81,55 = -22,02$$

$$[X]^T[Y]F_2 = -76,16 + 80,31 + 75,36 + 72,89 - 70,92 + 81,51 - 78,34 - 81,55 = 617,04$$

Cálculo del efecto:

$$Efecto Z_1 = \frac{-11,54}{8/2} = -2,885$$

$$Efecto Z_2 = \frac{-1,64}{8/2} = -0,41$$

$$\text{Efecto } F_1 = \frac{5,7}{8/2} = 1,425$$

$$\text{Efecto } Z_3 = \frac{5,12}{8/2} = 1,28$$

$$\text{Efecto } Z_4 = \frac{-14,08}{8/2} = -3,52$$

$$\text{Efecto } Z_5 = \frac{-22,02}{8/2} = -5,505$$

$$\text{Efecto } F_2 = \frac{3,1}{8/2} = 0,775$$

Con este procedimiento se determina de calcular los efectos de todas las variables inclusive los valores para variables ficticias, y son las siguientes:

**Tabla N° 06: Efectos calculados de las variables investigadas en el proceso de flotación**

	X0	X1	X2	F1	X3	X4	X5	F2
$[X]^T[Y]$	617,04	-11,54	-1,64	5,7	5,12	-14,08	-22,02	3,1
Efectos	---	-2,885	-0,41	1,425	1,28	-3,52	-5,505	0,775

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

Como podemos observar, los efectos mas grandes son AR-242 (Z1), Tiempo de Acondicionamiento (Z4) y Tiempo de Flotación (Z5). El efecto del Tiempo de Flotación Z5 es negativo lo que significa que su nivel inferior (-) de la variable resulta significativo.

Cálculo del Analisis de Varianza:

$$SS_E = (1,425)^2 + (0,775)^2 = 2,631$$

$$SSM = \frac{2,631}{2} = 1,315$$

$$Z_1 = \frac{(-11,54)^2}{8} = 16,646$$

$$Z_2 = \frac{(-1,64)^2}{8} = 0,336$$

$$F_1 = \frac{(5,7)^2}{8} = 4,061$$

$$Z_3 = \frac{(5,12)^2}{8} = 3,277$$

$$Z_4 = \frac{(-14,08)^2}{8} = 24,781$$

$$Z_5 = \frac{(-22,02)^2}{8} = 60,610$$

$$F_2 = \frac{(3,1)^2}{8} = 1,201$$

**Tabla N° 07: Cálculo de Análisis de Varianza.**

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grado de Libertad	Media de Cuadrados	Fo
X1	16,64645	1	16,64645	12,6528836
X2	0,3362	1	0,3362	0,25554394
F1	4,06125	1	4,06125	3,08693587
X3	3,2768	1	3,2768	2,49067933
X4	24,7808	1	24,7808	18,8357625
X5	60,61005	1	60,61005	46,0693967
F2	1,20125	1	1,20125	0,91306413
ERROR	2,63125	2	1,315625	
TOTAL	113,54405	9		

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

La significancia estadística es determinada por la comparación de la prueba  $F_{calculada}$  ( $F_o$ ) y la  $F_{tablas}$ . El criterio es: Si  $F_o < F_{tablas}$ , la variable es significativa estadísticamente.

Para un nivel de significancia del del 95%,  $F_{tabla} = 18.51$ , por lo cual, el tiempo de acondicionamiento ( $Z_4$ ) y el tiempo de Flotación ( $F_5$ ) son significativos

### CÁLCULO DEL MODELO MATEMÁTICO:

Una vez determinado los efectos de las variables en el proceso de flotación y sus implicancias en la operación total del % de Recuperación de Cobre, es necesario establecer un modelo matemático que represente la recuperación de oro en función de las variables más importantes.

$$b_0 = \frac{154,26}{2} = 77,13$$

$$b_4 = \frac{-3,52}{2} = -1,76$$

$$b_5 = \frac{-5,505}{2} = -2,75$$

El modelo matemático para esta etapa considerando solamente las variables significativas codificadas es la siguiente:

$$Y = 77,13 - 1,76 Z_4 - 2,75 Z_5$$

La gráfica del modelo puede observarse en la **figura 01**.

### Cálculo de la Validez del Modelo Matemático

La prueba estadística de este modelo demuestra la validez del mismo bajo un nivel de confianza 95%.

	X0	X4	X5	
	1	1	-1	77,13
	1	-1	-1	-1,76
	1	-1	1	-2,75
	1	1	1	
	1	1	1	
	1	1	-1	
	1	-1	1	
	1	-1	-1	

Para calcular la Tabla de Validez del Modelo Matemático (Yest.) resolvemos lo siguiente:

$$Y_{est} = (77,13x1) + (-1,76x1) + (-2,75x - 1) = 78,12$$

$$Y_{est} = (77,13x1) + (-1,76x - 1) + (-2,75x - 1) = 81,64$$

$$Y_{est} = (77,13x1) + (-1,76x - 1) + (-2,75x1) = 76,14$$

$$Y_{est} = (77,13x1) + (-1,76x1) + (-2,75x1) = 72,62$$

$$Y_{est} = (77,13x1) + (-1,76x1) + (-2,75x1) = 72,62$$

$$Y_{est} = (77,13x1) + (-1,76x1) + (-2,75x - 1) = 78,12$$

$$Y_{est} = (77,13x1) + (-1,76x - 1) + (-2,75x1) = 76,14$$

$$Y_{est} = (77,13x1) + (-1,76x - 1) + (-2,75x - 1) = 81,64$$

**Tabla N° 08: Validez del Modelo Matemático**

Y	Yest.	Y-Yest,	(Y-Y est.) <sup>2</sup>
76,16	78,12	-1,962	3,851
80,31	81,64	-1,333	1,776
75,36	76,14	-0,778	0,605
72,89	72,62	0,273	0,074
70,92	72,62	-1,697	2,882
81,51	78,12	3,388	11,475
78,34	76,14	2,203	4,851
81,55	81,64	-0,093	0,009
TOTAL (SSR)			25,522

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

$$SSR = (-1,962)^2 + (-1,332)^2 + \dots + (-0,092)^2$$

$$SSR = 25,522$$

$$MSR = \frac{25,522}{8/2} = 6,38$$

$$F = \frac{6,38}{1,316} = 4,85$$

Para un nivel de significancia del 95% el valor  $F_{\text{tablas}} = 18,51$ , esta es mayor que 4,85. Por lo tanto, el modelo matemático ajusta o representa adecuadamente a los datos experimentales.

**Tabla N° 09: Calculo de la escala natural**

N°	Z4	Z5
(-)	3	5
(+)	5	10
Z°	4	7,5
$\Delta Z$	1	2,5
$\varepsilon$	4	3

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

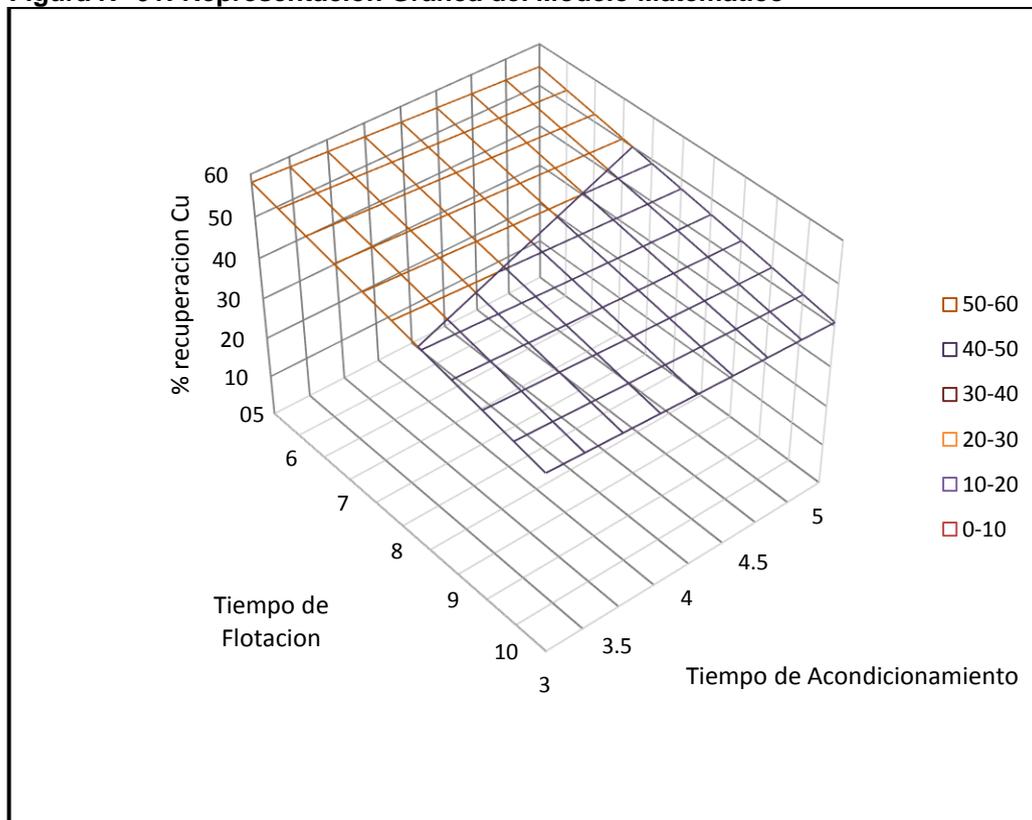
$$a_0 = 77,13 - 1,76 Z_4 - 2,75 Z_5$$

$$a_0 = 77,13 - 1,76(4) - 2,75(3)$$

$$a_0 = 61,84$$

## GRÁFICA DEL MODELO MATEMÁTICO

**Figura N° 01: Representación Gráfica del Modelo Matemático**



Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

## ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Tabla N° 10: Resumen de los Efectos en el Proceso de Flotación

	VARIABLES	NIVEL (-)	NIVEL (+)	VALOR DE EFECTO
Z1	AR-242	10 g/TM	15 g/TM	-2,885
Z2	pH	7,5	11	-041
Z3	Z-11.	20 g/TM	40 g/TM	1,28
Z4	Tiempo de Acondicionamiento	3´	5´	-3,52
Z5	Tiempo de Flotación.	5´	10´	-5,505

Fuente: Bach. Ing. Homar P. SANTOS CAJAHUANCA

Las variables mas significativos son aquellos que tienen mayor valor absoluto. De los resultados del cuadro anterior observamos que la variable Z5 definida por Tiempo de Flotación, esta variable tiene un **Valor Negativo**, y esto nos indica que cuando se incrementa de 5´ a 10´ en el tiempo de Flotación, se produce una disminucion en % de Recuperación de Cobre. Este comportamiento nos sugiere que se debe trabajar en el límite inferior. La siguiente variable es Z4, identificada por Tiempo de Acondicionamiento, esta variable tiene un Valor Negativo , y esto nos indica que cuando se incrementa de 3´ a 5´ en el Tiempo de Acondicionamiento, se produce una disminucion en % de Recuperación de Cobre. Este comportamiento nos sugiere que se debe trabajar en el límite inferior.

Otra variable con efecto negativo es Z1 identificado po AR-242. Como sabemos es Colector para flotar sulfuros, que en nuestro caso es sulfuro de Cobre. Esta variable se mantendra en un nivel Promedio (12,5 g /TM) en los experimentos.

**CÁLCULO MATEMÁTICO 02: MEDIA ARITMÉTICA O PROMEDIO ( $\bar{x}$ ) DE LAS LEYES DE CONCENTRADO CU Y EL % DE RECUPERACIÓN DE COBRE.**

Ley de concentrado % Cu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Reemplazando en la fórmula:

$$\bar{x} = \frac{1}{8} (27,2 + 23,4 + 25,1 + 26,3 + 24,1 + 23,2 + 25,4 + 26,2)$$

$$\bar{x} = \frac{200,9}{8}$$

$$\bar{x} = 25,1125$$

% de Recuperación de Cobre:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Reemplazando en la fórmula:

$$\bar{x} = \frac{1}{8} (76,16 + 80,31 + 75,36 + 75,89 + 70,92 + 81,51 + 78,34$$

$$+ 81,55)$$

$$\bar{x} = \frac{617,04}{8}$$

$$\bar{x} = 77,13$$

**CÁLCULOS MATEMÁTICOS 03: DEVIACIÓN ESTÁNDAR ( $\sigma$ ) DE LAS LEYES DE CONCENTRADO % CU Y EL % DE RECUPERACIÓN DE COBRE.**

**Ley de concentrado % Cu:**

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

**Reemplazando en la fórmula:**

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{8-1} [(27,2 - 25,11)^2 + (23,4 - 25,11)^2 + \dots + (26,2 - 25,11)^2]}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{7} [14,6488]}$$

$$\sigma = 1,45$$

**% de Recuperación de Cobre:**

$\sigma$

$$= \sqrt{\frac{1}{8-1} [(76,16 - 77,13)^2 + (80,31 - 77,13)^2 + \dots + (81,55 - 77,13)^2]}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{7} [110,9128]}$$

$$\sigma = 3,98$$

## Anexo N° 02 Fotos

Foto N° 01: Resultados del análisis de muestras de minerales del yacimiento minero Caolín de los Niveles 2 850 y 3 250, hechos por el Laboratorio Químico de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
Facultad De Ingeniería Geológica, Minera Y Metalúrgica  
LABORATORIO DE ESPECTROMETRIA

### ANALISIS DE TRES MUESTRAS

SOLICITADO POR : COMPAÑIA MINERA CAOLIN S.R.L  
PROCEDENCIA DE MUESTRA : HUANUCO  
RECEPCIÓN DE MUESTRA : Lima, 11 de Junio del 2012

### RESULTADO DEL ANALISIS DE TRES MUESTRAS

	MUESTRA	% Cu	% As	Ag (Oz/TM)	Au (g/TM)
NIVEL 2850	1	6.41	-	0.46	-
NIVEL 3250	2	3.00	0.02	0.38	-
	3	3.92	-	-	0.23

LIMA, 19 DE Junio del 2012



Foto N° 02: Visita de la bocamina principal del Nivel 3 250.



**Foto N° 03: Vista del Manto del Nivel 3 250, al inicio es de menor espesor, pero de acuerdo ha como se profundiza, este se vuelve de mayor espesor.**

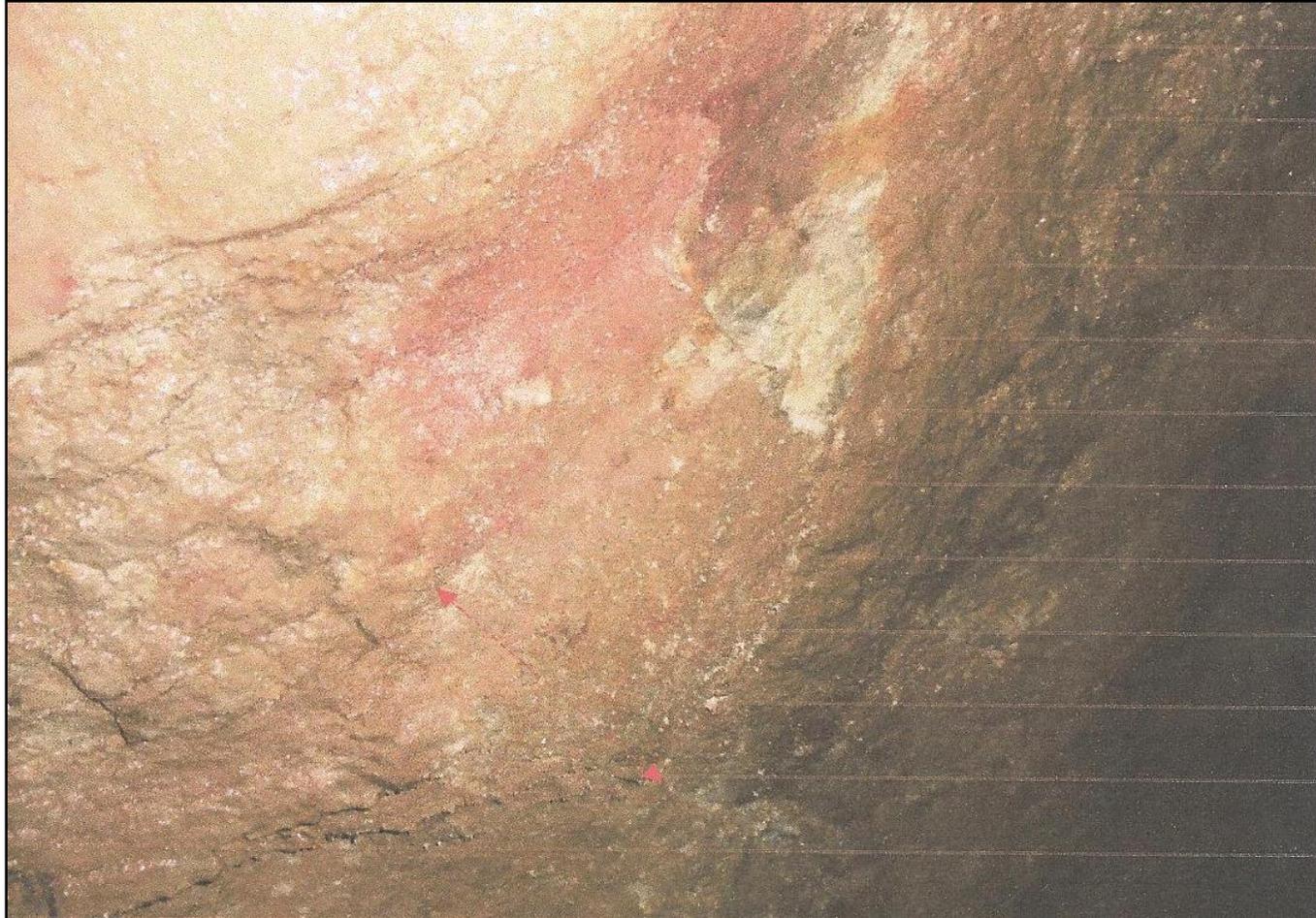


Foto N° 04: Vista de lejos de la entrada de la bocamina al Nivel 2 850.



Foto N° 05: Vista de la Bocamina del Nivel 2 850.



**Foto N° 06: Vista de la Veta de cuarzo del tipo rosario en el nivel 2 850, se observa cómo se estrangula la veta de rumbo N-S buzando 50° E.**



**Foto N° 07: Vista de la veta de Cuarzo en el Nivel 2 850, en la galería se observa una bolsada de 1.50 m de espesor y unos 6 m de continuidad.**



**Anexo N° 03**  
**MATRIZ DE CONSISTENCIA**

**TITULO: "EVALUACION DE LA RECUPERACION DE COBRE POR FLOTACION DE MINERALES DEL YACIMIENTO CAOLIN - 2017"**

<b>PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>HIPOTESIS</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>METODOLOGIA</b>
<p style="text-align: center;"><b><u>General:</u></b></p> <p>Evaluar la recuperación de cobre de los minerales polimetálicos contenidos en el yacimiento minero Caolín por el método de flotación.</p> <p style="text-align: center;"><b><u>Específicos:</u></b></p> <p>a) ¿Cuáles son las características de los minerales presentes en el yacimiento minero Caolín?</p> <p>b) ¿Qué porcentaje de recuperación de cobre se alcanzaría si este mineral es sometido al proceso de flotación?</p> <p>c) ¿De qué manera influyen los diferentes reactivos que se usan en la flotación, su preparación y dosificación?</p>	<p style="text-align: center;"><b><u>General:</u></b></p> <p>Evaluar la recuperación de cobre de los minerales polimetálicos contenidos en el yacimiento minero Caolín por el método de flotación.</p> <p style="text-align: center;"><b><u>Específicos</u></b></p> <p>a) Determinar las características de los minerales presentes en el yacimiento minero Caolín.</p> <p>b) Determinar la recuperación de cobre que se alcanzaría si este mineral es sometido al proceso de flotación.</p> <p>c) Evaluar los diferentes reactivos que se usan en la flotación, su preparación y dosificación.</p>	<p style="text-align: center;"><b><u>General:</u></b></p> <p>Evalutando los minerales del Yacimiento de Caolín por el método de flotación selectiva se logra la recuperación del cobre.</p> <p style="text-align: center;"><b><u>Específicos</u></b></p> <p>a) Flotando los minerales de cobre del yacimiento de Caolín determinaremos sus características, y lograremos recuperar valores contenidos de cobre.</p> <p>b) Realizando el proceso de flotación tendremos el Balance Metalúrgico, y nos reportara el porcentaje de recuperación de cobre.</p> <p>c) Evaluando la flotación obtendremos datos sobre los reactivos, que tienen efectos sobre la recuperación del cobre.</p>	<p style="text-align: center;"><b><u>Dependiente</u></b></p> <p>Porcentaje de recuperación del cobre</p> <p style="text-align: center;"><b><u>Independientes</u></b></p> <p>Pruebas de flotación del mineral a nivel global que se manifiestan como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El pH de la pulpa</li> <li>• Densidad de la pulpa</li> <li>• La adición de reactivos.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b><u>Tipo de Investigación</u></b></p> <p>De acuerdo al fin que se persigue: Aplicada.</p> <p style="text-align: center;"><b><u>Diseño de la Investigación</u></b></p> <p>El diseño es experimental</p> <p style="text-align: center;"><b><u>Población y Muestra</u></b></p> <p><b>a) Población</b> El mineral de cobre con contenidos de oro y plata del yacimiento minero Caolín.</p> <p><b>a) Muestra</b> Una porción del mineral de cobre con contenidos de oro y plata del yacimiento minero Caolín.</p> <p style="text-align: center;"><b><u>Métodos de la Investigación</u></b></p> <p>Los métodos de investigación es experimental</p>