



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

Vicerrectorado de  
**INVESTIGACIÓN**

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO**

**ESPEZAMIENTO, FLOCULACIÓN DE RELAVE PARA LA OBTENCIÓN DE  
PASTA DE LA COMPAÑÍA MINERA CAOLÍN S.A.C. – PASCO 2018**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADEMICO DE:  
DOCTOR EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

**AUTOR:**

RAMIRO SIUCE BONIFACIO

**ASESORA:**

DRA. ESENARRO VARGAS DORIS

**JURADO:**

DR. ROSADIO BERNAL, RAÚL

DR. GUEVARA BENDEZU, JOSÉ CLAUDIO

DRA. TAFUR ANZUALDO, VICENTA IRENE

LIMA – PERÚ

2019

## INDICE

RESUMEN .....	vii
ABSTRACT.....	viii
I. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Descripción del problema .....	4
1.3. Formulación del problema .....	10
Problema general.....	10
Problema específico .....	10
1.4. Antecedentes de la investigación .....	11
1.5. Justificación de la investigación .....	16
1.5.1. Justificación de la investigación.....	16
1.5.2. Justificación practica .....	16
1.5.3. Justificación metodológica .....	17
1.5.4. Justificación tecnológica .....	17
1.5.5. Justificación social .....	17
1.5.6. Importancia de la investigación.....	18
1.6. Limitación de la investigación .....	18
1.7. Objetivos.....	18
Objetivo General.....	18
Objetivo específico .....	18
1.8. Hipótesis .....	19
Hipótesis General.....	19
Hipótesis Especifico.....	19
II. Marco teórico.....	20
2.1. Marco Conceptual.....	20
2.2. Teoría Especializada .....	21
2.2.1. Relaves .....	21
2.2.2. Presas de relaves.....	23
2.2.3. Tipos de disposición de relaves.....	24
2.2.4. Separación sólido –Líquido.....	27
2.2.5. Espesamiento o sedimentación.....	29
2.2.6. Pruebas de sedimentación discontinua .....	30
2.2.7. Sedimentación de suspensiones concentradas reales .....	32
2.2.8. Espesador .....	33
2.2.9. Variables que se relacionan con la pulpa alimentada .....	41

2.2.10. Pastas minerales .....	42
2.2.11. Pruebas de pasta .....	43
2.2.12. Disposición superficial .....	48
2.2.13. Beneficios del relave espesado .....	49
2.2.14. Floculación .....	50
2.2.15. Contaminación ambiental .....	54
2.2.16. Desarrollo sostenible .....	55
2.2.17. Marco filosófico .....	56
2.2.18. Marco legal .....	61
III. Método .....	65
3.1. Tipo de Investigación .....	60
3.2. Población y muestra .....	67
3.3. Operacionalización de variables .....	67
3.4. Instrumentos .....	68
3.5. Procedimiento .....	70
3.6. Análisis de datos .....	71
IV. Resultados .....	72
4.1. Actividades de campo .....	72
4.1.1. Características del mineral .....	73
4.1.2. Análisis granulométrico de relave .....	74
4.1.3. Pruebas de sedimentación sin floculante .....	75
4.1.4. Prueba de selección de floculante .....	76
4.1.5. Determinación de la densidad de alimentación .....	80
4.1.6. Dosificación de floculante .....	83
4.1.7. Tiempo de sedimentación en la formación de nivel de cama .....	86
4.1.8. Aplicación del diseño factorial .....	88
4.2. Contrastación de hipótesis .....	94
4.2.1. Hipótesis de investigación .....	94
4.2.2. Hipótesis estadística .....	95
4.3. Contrastación de hipótesis específicas .....	96
4.4. Pruebas de pasta .....	101
V. Discusión de resultados .....	105
VI. Conclusiones .....	108
VII. Recomendaciones .....	110
VIII. Referencias .....	111
IX. ANEXOS .....	115
Anexo 1. Matriz de consistencia .....	115

Anexo 2. Instrumento de recolección de datos .....	116
Anexo 3. Definición de términos .....	120
Anexo 4. Fotografías del trabajo de campo .....	123

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Empresas mineras y su disposición de relaves .....	7
Tabla 2. Resistencia de fluencia de asentamiento.....	45
Tabla 3. Tamaño de conos para pruebas de consistencia.....	46
Tabla 4. Operacionalización de variables .....	67
Tabla 5. Toma de muestras de la alimentación.....	69
Tabla 6. Diseño experimental para la obtención de pasta.....	69
Tabla 7. Variables de alimentación de pulpa .....	72
Tabla 8. Gravedad específica de la muestra.....	73
Tabla 9. Resultados de análisis químico .....	73
Tabla 10. Análisis granulométrico .....	74
Tabla 11. Resultado de mediciones de sedimentación.....	75
Tabla 12. Condiciones físicas y químicas de relave .....	77
Tabla 13. Datos de sedimentación de diferentes floculantes .....	78
Tabla 14. Condiciones físicas de relave.....	80
Tabla 15. Pruebas de densidad en % sólidos .....	81
Tabla 16. Datos experimentales de PHP 30 a distintas dosificaciones.....	84
Tabla 17. Tiempo de residencia en el espesamiento.....	87
Tabla 18. Condición del diseño factorial .....	88
Tabla 19. Diseño factorial.....	88
Tabla 20. Efectos estimados para pasta .....	89
Tabla 21. Análisis de varianza .....	91
Tabla 22. Coeficiente de regresión .....	92
Tabla 23. Resultados estimados para pasta.....	92
Tabla 24. Optimización respuesta.....	94
Tabla 25. Correlación de Pearson .....	96
Tabla 26. Análisis de varianza para hipótesis específica 1 .....	97
Tabla 27. Análisis de varianza para hipótesis específica 2.....	98
Tabla 28. Análisis de varianza para hipótesis específica 3.....	100
Tabla 29. Resultados de altura de abatimiento .....	101
Tabla 30. Resultados de ángulo de reposo.....	103

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista aérea de las relaveras.....	8
Figura 2. Presa de relave aguas arriba .....	25
Figura 3. Presa de relave aguas abajo .....	26
Figura 4. Presa de relave eje central .....	27
Figura 5. Mecanismo de separación sólidos-líquido.....	28
Figura 6. Mecanismo de espesamiento .....	30
Figura 7. Prueba de sedimentación de pulpa .....	31
Figura 8. Curvas de sedimentación.....	32
Figura 9. Comportamiento del %S vs Dosificación de floculante.....	35
Figura 10. Zonas de sedimentación .....	37
Figura 11. Sedimentador de cono profundo.....	40
Figura 12. Definición teórica de pulpa/pulpa alta densidad/torta .....	43
Figura 13. Procedimiento del ensayo de abatimiento .....	44
Figura 14. Forma y dimensiones de canaleta.....	47
Figura 15. Diagrama esquemático del fluido.....	47
Figura 16. Disposición de relave en pasta .....	48
Figura 17. Mecanismo de floculación.....	50
Figura 18. Distribución del tamaño de partículas .....	74
Figura 19. Velocidad de sedimentación de relave .....	76
Figura 20. Curva de sedimentación con diferentes floculantes .....	79
Figura 21. Curvas de sedimentación 12, 18 y 25 %S .....	82
Figura 22. Velocidad de sedimentación con floculante PHP 30.....	85
Figura 23. Nivel de cama en el cono de sedimentación.....	86
Figura 24. Tiempo de residencia, altura de cama y % de solidos .....	87
Figura 25. Efectos principales para pasta .....	90
Figura 26. Interacciones para pasta.....	91
Figura 27. Contorno de superficie respuesta.....	93
Figura 28. Superficie respuesta estimada.....	93
Figura 29. Dispersión de los datos experimentales.....	95
Figura 30. % Sólidos vs altura de abatimiento .....	102
Figura 31. % sólidos vs ángulo de reposo.....	103

## RESUMEN

El trabajo de investigación se realizó en la Empresa Minera Caolín S.A.C. ubicado en el anexo de Yacutinco, distrito de San Francisco de Yarusyacan, a 22 km de Pasco. La empresa realiza la explotación y concentración de minerales polimetálicos, además presta servicios de tratamiento de minerales de los pequeños mineros. Producto de concentrar los minerales, la empresa genera residuos sólidos estériles que son depositados en el depósito de relaves para que sedimenten por gravedad.

La investigación pretende realizar el espesamiento, floculación de relave para ser depositado en forma de pasta mineral, se aplicó pruebas empíricas para hallar los parámetros que intervienen en el proceso y luego aplicar un diseño experimental a nivel de pilotaje, la muestra de relave se obtuvo a la salida de las celdas de flotación; se secó a 105 °C, se homogenizó y cuarteo para obtener una muestra representativa; el remanente sirvió para las pruebas empíricas de sedimentación sin y con floculantes en probetas de 1000 cc para elegir el floculante óptimo que acelera la sedimentación. Como instrumento de colección de datos se utilizó las fichas elaboradas, tanto en el laboratorio y en el pilotaje. Los resultados a nivel piloto evidencian que, si es posible obtener relave en pastas con un 60 a 73,45 % S en peso, las pruebas de consistencia y canaleta confirma la tendencia esperada a que la pasta más densa presenta una mayor altura de abatimiento y alcanza un mayor ángulo de reposo para su deposición. Para % abatimiento de 12 a 61 % se tiene de 72 a 80 % S en peso, en cuanto al ángulo de reposo para la pasta es de 69 a 78 % S en peso, tenemos un ángulo de inclinación de 3,07 ° a 4,06 ° en correspondencia a la horizontalidad, donde la pasta permanece estable.

**Palabras claves:** espesamiento, floculación, pasta mineral, cono de sedimentación.

## ABSTRACT

The research work was carried out in the Caolín Mining Company S.A.C. located in the annex of Yacutinco, San Francisco district of Yarusyacan, 22 km from Pasco. The company is dedicated to the exploitation and concentration of polymetallic minerals, also provides mineral treatment services for small-scale miners. Product of the concentration of minerals, the company generates sterile solid waste that is deposited in the tailings deposit to settle by gravity.

The research aims to perform the thickening and flocculation of tailings to be deposited in the form of mineral paste, empirical tests were applied to find the parameters involved in the process and then apply an experimental design at pilot level, the tailings sample was obtained at the exit of the flotation cells; dried at 105 ° C, homogenized and quartered to obtain a representative sample; the remnant was used for empirical tests of sedimentation without and with flocculants in 1000 cc specimens to choose the optimal flocculant that accelerates sedimentation. As an instrument of data collection, the elaborated files were used, both in the laboratory and in the pilotage. The results at the pilot level show that if it is possible to obtain tailings with 60 to 73,45% solids by weight, the consistency and gutter tests confirm the expected tendency for the denser pulp to have a higher depression height and reaches a greater angle of repose for its deposition. For % abatement of 12 to 61% you have 72 to 80% solids by weight, as for the angle of repose for the paste is 69 to 78% solids by weight, we have an angle of inclination of 3,07 ° to 4,06 ° in relation to horizontality, where the pasta remains stable.

Keywords: thickening, flocculation, mineral paste, sedimentation cone.



## **I. INTRODUCCIÓN**

El reciente trabajo de tesis tiene como objetivo realizar la sedimentación, floculación de relave y obtener pasta de relave en la Empresa Minera Caolín S.A.C., utilizando la tecnología de sedimentación de cono profundo mediante la deposición de relave espesado en la antigua sopladura de la relavera, esto debido a que la presa de relave de uso actual está casi al tope de su vida útil, además, ya han realizado el refuerzo de su bases del talud con muros de contención de concreto, y de seguir realizando la deposición de relave producto de las operaciones se corre el riesgo de sobre cargar la relavera y provocar la licuefacción y reviente la presa.

La tecnología de relave en pasta, data de 1907, donde se patenta el primer cono profundo “Callow cone” en Estados Unidos, y en 1953 en Alemania se presenta un equipo que mejora la separación sólido-líquido mediante la sedimentación. Este equipo consiste en un espesador con una geometría similar al espesador de pasta actual, con los mismos principios de mantener un lecho de lodos a gran profundidad.

El relave en pasta surge a raíz, de las complicaciones ambientales de contaminación, que genera la minería para tratar sus residuos, a medida que sus necesidades de su tratamiento incrementaban con los grandes yacimientos puestos en operación en los últimos años. Su aplicación se hace útil para la separación sólido – líquido, para obtener una concentración de sólidos con valores entre 65 a 75 %. A esa concentración de sólidos el relave no se segrega, el depósito se hace homogéneo, y se puede disponer en pendiente y acceder a minimizar o eliminar el requerimiento de muros de contención, además el remanente se seca por evaporación y alcanza el límite de sedimentación compacta, lo que representa un estado geotécnico viscoso, no licuable y sísmicamente estable.

Las grandes empresas mineras, tienen acceso a esta tecnología fácilmente, mientras que la pequeña minería por falta de recursos no puede acceder, por tal motivo el trabajo consiste en realizar las pruebas de sedimentación a nivel de laboratorio, pilotaje y producir relave en pasta en un espacio cercano a la planta concentradora, y con los resultados obtenidos la empresa pretende instalar un sedimentador de cono profundo.

El informe de tesis se divide en cinco capítulos.

En el capítulo 1, se presenta los antecedentes de la investigación, se describe la realidad problemática que tiene la empresa minera Caolín en el anexo de Yacutinco, la formulación del problema, objetivos, justificación del trabajo y para luego continuar con las delimitaciones temporales de la investigación.

En el capítulo 2, se pone énfasis sobre la importancia de los conceptos generales relacionados a la investigación; seguidos por temas especializados referente al espesamiento, equipos de sedimentación, separación sólido –líquido y floculación, y el marco legal que respalda a este trabajo de investigación, el fundamento filosófico de la ciencias naturales, la concepción del desarrollo sostenible en la minería y finalmente se desarrolla el marco conceptual.

En el capítulo 3, se realizó la hipótesis del trabajo, viéndose la hipótesis general y las hipótesis específicas y las variables de la investigación.

En el capítulo 4, se desarrolló el diseño y las estrategias de la contrastación de hipótesis, los planteamientos metodológicos, el tipo y nivel de investigación, como también la determinación del tamaño de la muestra, de la población y técnicas de la investigación.

En el capítulo 5, se realizó las pruebas empíricas en el laboratorio, determinando la gravedad específica del mineral, análisis granulométrico, análisis químico del relave y ensayos de sedimentación con y sin floculante para obtener los parámetros de densidad, dosificación de floculante, además en el campo se realizó el pilotaje para determinar el tiempos de sedimentación en la formación del nivel de cama, datos que son utilizado para el procesamiento, análisis e interpretación de los resultados observados, en el marco de la prueba de hipótesis.

Finalmente, en el capítulo 6, se expone las discusiones del resultado, comparándolo con las deducciones de otros autores, para luego, presentar las conclusiones y recomendaciones pertinentes de los resultados alcanzados.

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las grandes empresas mineras y de mediana minería en el Perú, realizan el control técnico de sus relaves, aplicando tecnologías nuevas como el espesado de relaves. Pero aun así escapan al control debido a fallas del equipo de bombeo y atoros de tuberías, por el incremento del tonelaje de tratamiento. La pequeña minería en cambio no realiza ningún control y manejo técnico de sus relaves y siguen manejando depósitos de relaves por inundación en posas que no prestan garantías ante un evento sísmico y sobre carga del espejo de agua en épocas de lluvia que tienden a debilitar los muros de coronación.

El problema de la Compañía Minera Caolín S.A.C., radica en que realiza la deposición de su relave en un dique que tiene las bases debilitadas y reforzadas con concreto armado, además esta relavera esta casi al tope de su vida útil, y de seguir sobre cargando con relave se corre el riesgo de la licuefacción y pueda reventar la relavera e impactar al ecosistema contaminando la cuenca del río tinco y llegar al río Huallaga.

La solución lo que se propone, es reutilizar la relavera antigua rellenando el espacio vacío y nivelar el talud aplicando la tecnología de relave en pasta y de esta manera prologar las operaciones de la empresa por espacio de 6 años.

Por todas estas razones la sedimentación y floculación de relave es importante para la empresa y obtener pasta que garantice la estabilidad de la relavera a través del tiempo.

## **1.2. DESCRIPCION DEL PROBLEMA**

La actividad minera y metalúrgica en Cerro de Pasco viene desde épocas prehispánicas, según cronistas de esa época afirman que fue parte del rescate de Atahualpa. Los españoles tomaron posesión de la zona atraídos por la riqueza minera y buscaron juntar a las etnias Pasqueñas de tradición ganadera, como los yaros y pumpus hoy convertidos en los centros poblados de Villa de Pasco, Vicco y Ninacaca.

En el año 1630 inicia los españoles con la explotación minera, extrayendo en mayor cantidad de plata (argentum). En el siglo XIX el empresario Norte Americano James Ben Alin Haggin compra todos los derechos mineros de Cerro de Pasco y funda la Cerro de

Pasco Copper Corporation con la finalidad de explotar el cobre. En 1906 construye la fundición de tinyahuarco para procesar minerales.

Desde el año 1913 la Cerro de Pasco Copper Corporation depositaba sus relaves a los ríos y lagunas, principalmente al río San Juan y la laguna de Quiulacocha y a través de estos al lago de Junín/Chinchaycocha (donde nace el río Mantaro); y numerosos ríos y lagos en Pasco y continúan contaminando hasta la actualidad.

En la Región de Pasco se tiene inscrito en el MINAM, 187 pequeños mineros que tienen concesiones mineras las cuales, vienen pagando el derecho de vigencia, sin realizar la explotación minera, mientras que 25 propietarios de estas concesiones mineras realizan la explotación minera y vienen alquilando los servicios de una planta concentradora para el beneficio de sus minerales y esto lo realizan transportando el mineral extraído a la localidad de Wari, perteneciente a la región Junín.

En los distritos de Chaupimarca, Yanacancha, Simón Bolívar, Tinyahuarco, Huayllay y Yarusyacán, pertenecientes a la Provincia de Pasco, actualmente vienen operando diez empresas mineras y siete plantas de beneficio mineral, todas ellas producen una gran diversidad de agentes contaminantes que son fuentes importantes de impactos directos e indirectos para el ecosistema y la existencia humana de Cerro de Pasco y de las zonas limítrofes donde se desarrollan estas acciones.

Las localidades de los distritos de Simón Bolívar, Yanacancha y toda la jurisdicción de Chaupimarca están claramente afectadas por los procesos de contaminación ambiental minero, observándose los siguientes problemas:

- Permanente contaminación del recurso hídrico con relaves mineros, botaderos, residuos sólidos y líquidos y aguas acidificadas, que, entre otros aspectos, trae como consecuencia la pérdida de la flora y fauna. Adicionalmente se presenta la carencia de abastecimiento de agua para el dispendio del ser humano, porque el suministro de agua es compartido con la empresa minera.
- La contaminación del aire no ha sido controlada, y es origen directo de enfermedades en la población, exclusivamente de los niños pequeños de cinco años, a lo que hay que adicionar la contaminación derivada por las pozas de relaves, botaderos de residuos sólidos, domésticos, desmontes mineros al aire libre, precipitaciones ácidas y los orígenes de aguas contaminadas móviles y fijas.
- La contaminación por plomo en sangre, en valores que exceden los límites permitidos dispuestos por la Organización Mundial de la Salud (10 ug/dl) esencialmente en niños pequeños de doce años en centros poblados como Paragsha, Champamarca y Huayllay.

### **Depósitos de Relaves en Pasco**

Cerro de Pasco es una ciudad que se encuentra cercado de varias empresas Mineras que ejecutan sus operaciones unitarias de minerales polimetálicos, de las cuales para recuperar una tonelada de concentrado tiene que procesar entre 15 a 30 toneladas de mineral de mina. Este mineral molido que no se recupera en la concentración se envía a la relavera en forma de pulpa con una densidad de 1 120 g/l a 1 250 g/l.

Las empresas mineras que operan en Pasco son de mediana a gran minería, pequeña y minería artesanal, siendo las compañías de mediana minería que realizan la deposición de sus relaves en presas de relaves y algunos están incluyendo el método seguro de deposición en relave en pasta y otras empresas todavía no lo realizan. En la tabla 1 se observa las empresas que vienen operando en Pasco y en la figura 1 la vista aérea de las relaveras de cada una de estas empresas.

Tabla 1  
*Empresas mineras y su disposición de relaves*

	<b>Empresas Mineras</b>	<b>Tipo de relavera</b>	<b>Relave en Pasta</b>	<b>Ton/día de tratamiento</b>	<b>Mineralización</b>
<b>1</b>	Empresa minera Nexa	Dique	No	6500	Pb, Zn y Cu
<b>2</b>	Cerró SAC. Volcan	Dique	No	10 000	Pb, Zn
<b>3</b>	Atacocha	Dique	No	6000	Pb, Zn
<b>4</b>	Panamerican Silver -Huarón	Dique	No	3500	Ag, Pb y Zn
<b>5</b>	Chancadora Centauro	Dique	No	--	Au, Ag y Cu
<b>6</b>	Aurex	Dique	Si	1200	Ag y Au
<b>7</b>	Sociedad Minera el Brocal	Dique	No	180000	Ag, Au, Cu, Pb, Zn
<b>8</b>	Caolín S.A.C.	Dique	No	25	Cu, Pb, Zn
<b>9</b>	Mina Pilar	Pasivo	No	--	Pb, Zn y Ag
<b>10</b>	Chungar	Dique	Si	3200	Zn, Ag y Pb

Fuente: elaboración propia



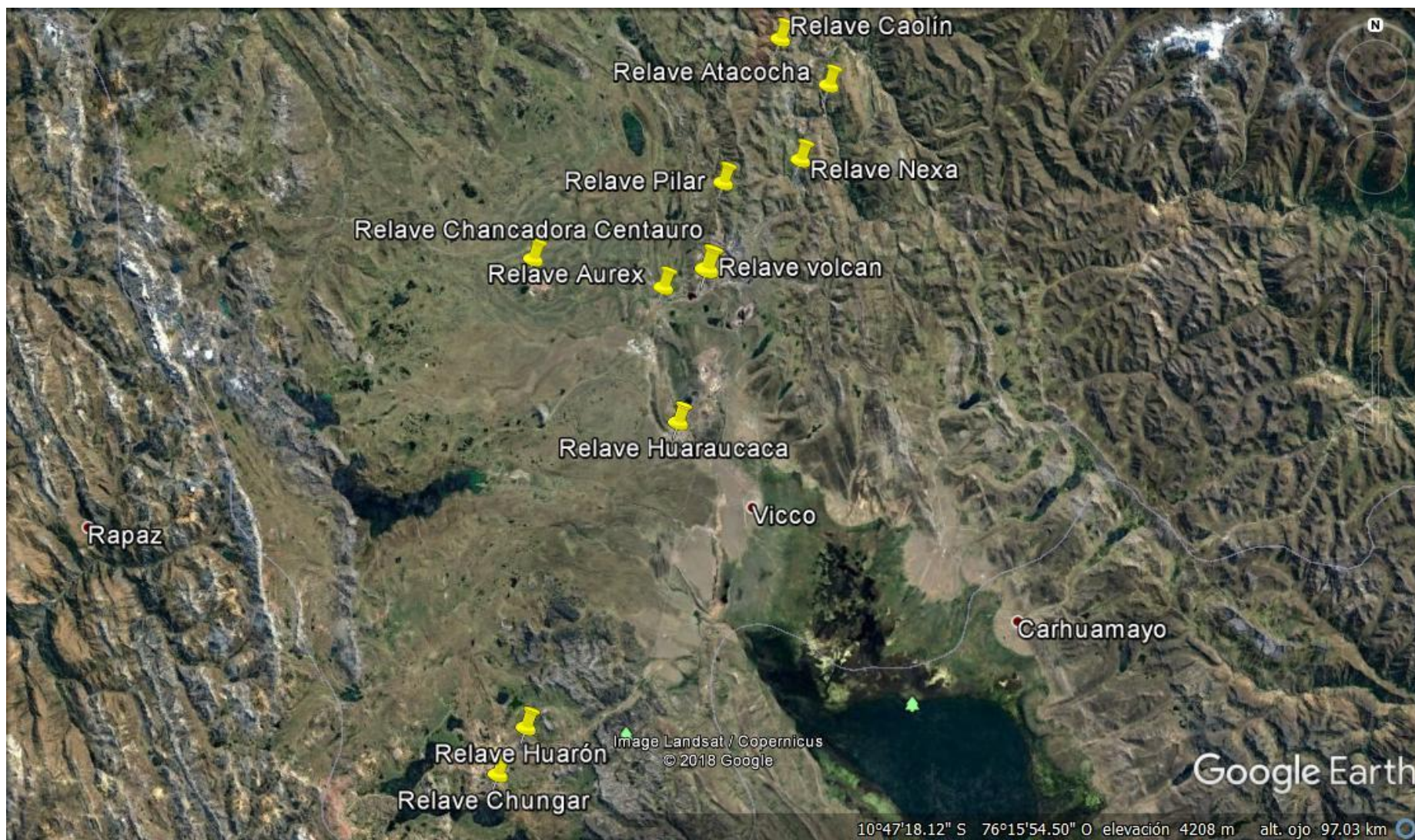


Figura 1: Vista aérea de las relaveras ubicadas en la provincia de Yanacancha - Pasco (Google Earth)



La Empresa minera Caolín inicia sus operaciones en el año 2016 con el tratamiento de minerales polimetálicos provenientes de la jurisdicción de Ambo, distrito de Cayna donde se encuentra la mina, Región Huánuco. La empresa alquila la planta concentradora de 30 TMD que se encuentra ubicada a un costado de la quebrada del anexo de Yacutinco, en dicha quebrada se encuentra la presa de relave que viene operando desde 1965 en forma intermitente, la planta de procesamiento y la presa de relave que perteneció a la Empresa Minera Cipriano Proaño S.A. que operó hasta el año de 1980, con un tratamiento de 80 TMD, desde esa fecha quedo paralizado y se desmantelo la planta concentradora.

En el año 2006 la Empresa minera San Sebastián alquila la planta concentradora de 30 TMD de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión y operó hasta el año 2010. En el año 2007 tuvo problemas con la relavera 1, ubicado a un costado de la presa de relave, esto debido a las intensas lluvias de los meses enero y febrero que ocasionó la licuefacción de sus bases y originó el deslizamiento del relave ocasionando impactos ambientales a la flora, fauna y a las comunidades vecinas y al río Tinco, afluente del río Huallaga. El año 2008 la presa de relave presento una inconsistencia de sus bases debido a que tenía filtraciones de agua provenientes de la quebrada, por lo que se optó por reforzarla con una muralla de contención de cemento que hasta la actualidad viene operando.

Como se entiende, la relavera proviene de muchos años de operación y abandono si ningún tratamiento y cuidado técnico, que han hecho que sus bases se sigan debilitando. De seguir depositando relave se va generar una presión de poros inducida por la aplicación de carga cíclica que alcanza el valor de la presión confinamiento

“licuefacción inicial” y las filtraciones llegue a afectar las bases de la relavera y el muro no pueda contener más y provoque el desembalse de la relavera. Ante este problema; se propone realizar la deposición de relave en pasta en la antigua relavera, que es una técnica que se viene aplicando en la gran minería y que es inaccesible para la pequeña minería, debido a los altos costos de los equipos de sedimentación y al estudio técnico de especialistas para instalar este equipo.

La deposición de relave en pasta tiene la ventaja de ser estables ante movimientos sísmicos y no requiere de presas de relave, y tiene la capacidad de secado rápido por evaporación por el alto contenido de sólidos entre 65 % a 75 %, lo que le da una consistencia muy estable y permite a la vez extender la vida útil de la relavera. La necesidad de mejorar la reutilización de agua y las normas ambientales nos han llevado a la implementación de técnicas que mejoren la reutilización de agua desde los relaves.

### **1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **- Problema General**

¿Cómo influye el espesamiento, floculación de relave en la obtención de pasta de la compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco 2018?

#### **- Problema específico**

- ¿Cómo la densidad de alimentación de relave (%S) influye en la sedimentación para la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018?
- ¿Cómo la dosificación de floculante en pulpa de relave influye en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018?

- ¿Cómo el tiempo de sedimentación en la formación de nivel de cama influye en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018?

#### **1.4. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **Antecedentes Internacionales**

(Olca Barreda, 2014). “realizó la evaluación de la producción de suspensiones concentradas conocidas como pastas minerales de relaves provenientes de procesos de beneficio de manganeso obtenidas mediante un espesador de pasta en escala de laboratorio. Así mismo reporta que las muestras de relave de manganeso tienen una granulometría muy fina de 4,63  $\mu\text{m}$ , siendo el tiempo mínimo requerido para alcanzar el punto de compresión superior a los 2000 s; alcanzando el mejor resultado con un floculante no iónico.

Las pruebas de abatimiento de relave de manganeso presentaron pastas comprendido entre 48 a 56% de sólidos en peso. Los ángulos de reposo de canaleta fueron cercanos a los 8° para 55% de sólidos en peso, factor que indica una ventaja en lo que concierne a estabilidad del material depositado. En los ensayos reológicos las pastas se presentaron con un carácter mixto en los ciclos reológicos ensayados. La relación entre el esfuerzo de cedencia y el % de sólidos de las pastas minerales estudiadas mostró ser del tipo exponencial alcanzando valores próximos a los 100Pa, que es un valor típico de estos sistemas sólido-líquido. El espesador de laboratorio utilizado para la producción de pasta mineral mostró tener una operación satisfactoria.

(Gómez Paredes, 2012) investigó, analizó y evaluó la alternativa de aplicar la tecnología de espesamiento de relave con el objeto de validarla, de tal forma que permita

disponer de un relave con alto contenido de sólidos y utilizar estos relaves para desarrollar pruebas básicas que permitan identificar los principales factores operativos y los efectos que podrían causar al variarlos. Y propone un relave espesado con un contenido de sólidos superior al 65%, siendo esto un proceso simple y rápido que requiere de pocos insumos siendo su principal desventaja el alto costo el capital de inversión para implementar la planta. Realiza la selección de floculante SNF- 913 para la operación de relaves obteniendo los mejores tiempos de sedimentación en una solución con relave a una concentración entre 15% y 20%. El diseño de la planta considera una unidad de espesamiento que debido a su gran altura proporciona el tiempo de residencia necesario para alcanzar una óptima compactación y concentración de sólidos en la descarga sobre 65% de sólidos. Los factores operativos, de control fueron la tasa de procesamiento de relave y la altura de interface.

(Hernandez Osorio, 2007) Realizó la evaluación del rendimiento de diferentes reactivos coagulantes y ligantes para la producción de pasta de relave que se emplearan en la disposición de los residuos procedentes de la minería de hierro. En la que concluye: los análisis del sólido estudiado indican que el desecho de la minería de hierro tiene una granulometría fina, la que contiene especies como hematita y cuarzo. Las pruebas de abatimiento ("slump") y de canal ("flume") son herramientas para caracterizar la consistencia y fluidez de las pastas minerales mediante la determinación del % ABT y del ángulo de reposo. Para la determinación de esto realizó pruebas factoriales  $2^2$ ,  $2^4$  y  $2^3$  determinando primero la elección del tipo de floculante, ligante y posteriormente las variables que influyen en la velocidad de sedimentación, abatimiento y reología. Llegando a la siguiente conclusión:

- a) El efecto de la adición de los agregantes sólo fue más significativo en las respuestas velocidad de sedimentación y % de abatimiento en el caso de la pasta mineral del 75% de sólidos.
- b) Para el caso de la pulpa del 70% de sólidos no se detectaron diferencias respuesta del % de abatimiento ya que en todas las condiciones estudiadas fue del 90%
- c) La velocidad de sedimentación se ha incrementado casi tres veces al añadir 20 g/t del coagulante y el comportamiento reológico en el ciclo rotacional 1-20-1 rpm fue más tixotrópico, lo que representa una condición reológica más favorable en el caso de la pulpa del 70% de sólidos
- d) En la pasta del 75% en sólidos se incrementó en la velocidad de sedimentación cuando se añadieron 20 g/t de coagulante fue de más del 250%, y en el caso de la consistencia medida a través del % ABT, también la condición de agregación añadiendo 20 g/t de coagulante fue la mejor al alcanzar un 60 % de "slump", situación que también fue respaldada por el comportamiento más tixotrópico en la reología de la pasta.

(Valenzuela Pratt, 2011) Estudio experimentalmente el comportamiento de un flujo de una pasta tipo plástico de Bingham sobre un plano inclinado y obtener relaciones adimensionales empíricas que lo describen, de manera de poder extender estos resultados a las escalas industriales. Los resultados obtenidos del experimento de caracterización reológica muestran unos lodos bentónicos con un comportamiento típico de un plástico de Bingham, con un esfuerzo de fluencia bien definido y una ley de potencia con  $n=1$ .

La estabilidad de los flujos cumplió a cabalidad el criterio expuesto por Coussot (1997). Las pastas de relaves, si bien tienen comportamientos reológicos más complejos

que los lodos bentónicos, pueden ser modeladas a partir de sus propiedades intensivas como el esfuerzo de fluencia, la densidad, el coeficiente de consistencia, de forma de poder modelar su comportamiento en flujos en pendientes de ancho muy grande.

### **Antecedentes Nacionales**

(Ames Ramírez, 2012) Determinó las condiciones de floculación adecuada que permita la máxima claridad del líquido y máxima densidades en la descarga con el mínimo de dosificación que permita seleccionar las condiciones de alimentación para la operación del espesador piloto. En el cual determina las condiciones de alimentación que sigue una serie de ratios de tratamientos para determinar la máxima carga posible bajo condiciones óptimas de floculación en TPD/m<sup>2</sup>. Durante las pruebas mantiene constante el nivel de los sólidos y monitorea la densidad del underflow manteniendo el balance de alimentación descarga. Las muestras de rebose y descarga fueron tomadas con la mayor frecuencia posible para determinar cualquier variación en las características de la alimentación que pueda afectar la floculación y en consecuencia la claridad del rebose y espesamiento. Típicamente la distribución granulométrica, tipo de mineral, y pH tiene un gran impacto.

(Romero A. , 2011). Realiza el estudio de caracterización de la pasta de relave para uso como relleno en labores mineras. Tiene como objetivo el estudio de los parámetros técnicos del relave de Ticapampa y su aplicación para el relleno en pasta. Realiza pruebas de análisis granulométrico, velocidad de sedimentación (slump) y prueba de velocidad de percolación. La investigación se ubica en el nivel exploratoria. Realiza trabajos en laboratorio y en campo. Realizado las pruebas llega a la siguiente conclusión:

Se tendrá óptimas propiedades del relave para ser usado como relleno de pasta si se determina tener el valor de slump y la velocidad de percolación, en los rangos óptimos requeridos para la elaboración de pasta de relave.

Quispe Ordoñez (2011) realiza el estudio “Uso y selección de coagulantes y floculantes orgánicos en la industria minero metalúrgica” Tiene como objetivo optimizar la separación sólido líquido en diferentes tipos de soluciones, pulpas y drenajes presentes en las diferentes operaciones mineras. Realizado las pruebas experimentales llega a las siguientes conclusiones:

#### Coagulación de Partículas Sólidas

1. La coagulación dependerá directamente de la carga superficial de la partícula, se requiere llegar al potencial cero de carga para neutralizar las fuerzas de repulsión de las partículas que estabilizan a los coloides.
2. En la práctica no es muy necesario conocer la potencial zeta de las partículas ya que por lo general es una mezcla de muchos tipos de partículas y lo recomendable es realizar una prueba de jarras para encontrar un coagulante adecuado y con una concentración óptima que funcione bien al pH requerido como resultado en campo.

#### Floculación de Partículas Sólidas

3. La floculación se realizará con una agitación suave para evitar romper los flóculos formados.
4. Para pulpas de relaves se recomienda utilizar floculantes aniónicos de baja densidad de carga y alto peso molecular
5. Para soluciones con alto contenido de coloides se recomienda utilizar floculantes catiónicos de baja densidad de carga, pero de alto peso molecular.

6. Para la remoción de iones metálicos precipitados como hidróxido (a pH 7-8) se recomienda utilizar floculantes aniónicos de densidad de carga media, pero con alto peso molecular.
7. Es recomendable probar siempre con floculantes de distinta densidad de carga ya que muchas veces la variación mineralógica en las pulpas de concentrados y relaves influyen en la performance del polímero aplicado como floculante.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.5.1. Justificación de la Investigación**

El estudio beneficiará a la Cía. Minera Caolín con la deposición del relave en pasta, incrementando la vida útil de la relavera, gracias a la estabilidad del relave que es depositado. Este método de deposición de relave responde adecuadamente a épocas de lluvia, fenómenos sísmicos, que se mantienen estables a través del tiempo sin que se produzca la licuefacción del relave.

El tratamiento de efluentes provenientes del tratamiento metalúrgico garantiza el adecuado manejo ambiental, evitando el vertimiento no controlados y reutilizando el agua de las operaciones de concentración de minerales polimetálicos.

### **1.5.2. Justificación Práctica**

Los resultados de la investigación serán puestos a disposición de la Empresa Minera Caolín, para que tomen decisiones y puedan implementar la planta de Relave en Pasta, y de esta manera extender la vida útil de la presa de relave, además recuperar agua industrial del proceso que esté acorde a las normas ambientales de los límites máximos permisibles de los efluentes mineros y convivir amigablemente con el entorno natural sin afectar la flora y fauna, además a las comunidades aledañas.



### **1.5.3. Justificación Metodológica**

Para alcanzar los objetivos del estudio, se realizó las pruebas experimentales para medir la variable independiente “espesamiento y floculación de relave” y su repercusión en la variable dependiente “obtención de pasta”. Estos instrumentos fueron elaborados, y filtrados mediante el juicio de expertos para después contrastar la validez y confiabilidad.

Con la utilización de los instrumentos de medición y su procesamiento, se busca conocer los parámetros de los factores principales y aplicar el diseño factorial  $2^3$  y a cada prueba realizar las respectivas combinaciones con los parámetros determinados y obtener las respuestas en % sólidos de pasta y aplicar el software estadístico del STATGRAPHICS Centurión, para conocer los efectos de los factores principales e interacciones en la obtención de una pasta de calidad.

### **1.5.4. Justificación Tecnológica**

Los sedimentadores a pequeña escala si favorecen al pilotaje en planta, que nos permiten realizar pruebas reales de producción de relave en pasta (% sólidos), manejando los parámetros independientes. Los datos experimentales que se obtienen nos sirven para escalar a nivel industrial y no cometer errores de dimensionamiento de los equipos.

### **1.5.5. Justificación social**

En el aspecto socio ambiental el tratamiento del relave también beneficia a la población debido a que se reduce la contaminación y no se vulnera al derecho a la vida lo más digna posible.

### **1.5.6. Importancia de la investigación**

La obtención de relave en pasta (% sólidos) en la pequeña minería es posible realizarlo, sin recurrir a costos elevados de adquirir un cono sedimentador, debido a que se puede fabricarlo dentro de los talleres de mecánica que cuenta la empresa con las especificaciones técnicas de las dimensiones de todos los componentes estructurales.

## **1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

Se tuvo limitaciones en el estudio porque no se contó con los equipos de laboratorio como: reómetro, viscosímetro, turbidímetro digital, para realizar una investigación más extendido.

## **1.7. OBJETIVOS**

### **- Objetivo General**

Determinar la influencia del espesamiento, floculación de relave en la obtención de pasta de la compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco 2018

### **- Objetivo Especifico**

- Determinar la influencia de la densidad de alimentación de relave (%S) en la sedimentación para la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018.
- Determinar la influencia de dosificación de floculante en pulpa de relave en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018.
- Determinar el tiempo de sedimentación de la formación de nivel de cama que influye en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018.

## **1.8. HIPOTESIS**

### **- Hipótesis General**

El espesamiento, floculación de relave influye significativamente en la obtención de pasta de la compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco 2018

### **- Hipótesis Específico**

- La densidad de alimentación de relave (%S) influye significativamente en la sedimentación para la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018.
- La dosificación de floculante en pulpa de relave influye significativamente en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018.
- El tiempo de residencia de sedimentación en la formación de nivel de cama influye significativamente en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018.

## II. MARCO TEÓRICO

En los últimos diez años la minería ha tenido grandes avances con las tecnologías de tratamiento de relaves que sean más amigables con el medio ambiente, uno de estos son los sedimentadores de cono profundo que permite tener relaves con alto contenido de sólidos que es más conocido como relave en pasta.

### 2.1. MARCO CONCEPTUAL

**Espesamiento.** - Conocido también como sedimentación, es el asentamiento de una partícula mineral, o una suspensión de partículas, en un fluido por efecto de una fuerza externa, que puede ser la gravedad, una fuerza centrífuga o cualquier otra fuerza de cuerpo, incrementando los sólidos en la descarga del espesador.

**Floculación.** - Proceso que antecede a la coagulación, que se realiza por la agitación de los sólidos coagulados que permitir el engrandecimiento y acumulación de los flóculos que se han formado con el objetivo de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad.

**Relave.** - Es el desecho que no tiene valor económico, que consiste en mineral molido con agua y demás componentes, que se obtienen de la extracción del mineral de valor económico mediante la flotación con reactivos.

**Pasta.** - Son relaves a los cuales se les remueven gran parte del agua, mediante el uso de espesadores y adición de floculantes para obtener una concentración de sólidos con valores entre 65 o 75 %” y pueden ser depositados en pendientes.

**Tamaño de partículas.** - Es aquel donde la partícula mineral es liberada de los enlaces químicos que lo contiene, conocido como ganga. Y el control se realiza mediante mallas.

**Porcentaje de sólidos.** - Es el porcentaje de sólidos de mineral molido contenidos en un litro de pulpa, que se determina con un densímetro.

**Altura de cama.** - Es el nivel de concentración de sólidos en un tiempo determinado en un espesador, que nos permite realizar el control, para realizar la descarga de sólidos con menor contenido de agua. Un incremento de nivel de sólidos incrementa la densidad de descarga, presión en la base del sedimentador y el valor del torque.

**Tiempo de residencia.** - Es el tiempo en que se concentra las partículas, formando un colchón para que pueda mantenerse la concentración de sólidos en la descarga del cono sedimentador.

**Floculante.** - Es un reactivo químico que produce la aglomeración de partículas finas llamadas flóculos, que al unirse adquieren un peso suficiente para provocar la precipitación y en líquido acelera su sedimentación.

## **2.2. TEORIA ESPECIALIZADA**

### **2.2.1. Relave**

El relave es producto de las operaciones unitarias del proceso de concentración de minerales que se depositan en grandes relaveras que contienen residuos de reactivos de flotación y metales pesados.

Según (Cuenca, 2015) “Se trata de grandes depósitos de ganga toxica, que contienen plomo, sale de cianuro, arsénico, mercurio, y químicos utilizados en la operación minera, que se acumulan en miles de toneladas. Las consecuencias sobre la vida humana y el medioambiente que estos confinamientos de material contaminante producen son incalculables” (p.1).

La (SNMPE, 2008) afirma: “Son los residuos resultantes del proceso de recuperación de los metales. Una vez que el mineral con contenidos de metales valiosos haya sido fracturados y molidos, estas pasan a una serie de operaciones y procesos unitarios que son conocidos como concentración o beneficio – para recuperar los metales. Una vez finalizado el mismo, se obtiene el componente con valor que es el concentrado y por otro lado lo que queda es el relave o desecho” (pág. 2).

“El relave son partículas de mineral finamente molido, que se desechan en operaciones mineras. La minería de sulfuros de plomo extrae grandes cantidades de mineral del yacimiento que se explota. Sólo una fracción pequeña corresponde al elemento de mayor interés económico que se aspira recuperar (algo menos de 1%). Una vez que ese material valioso ha sido molido y separado por procesos de flotación, se obtiene un material (el concentrado) con una concentración más alta de plomo (entre 50 y 55%), que se puede vender como Concentrado o procesar hasta plomo metálico puro. El resto del material (muy pobre en plomo) se denomina “relave”, y se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable” (SERNAGEOMIN, 2007).

### **2.2.2. Presas de Relaves**

La construcción de presas y depósitos para recoger los desperdicios mineros metalúrgicos, es una creación del siglo XX. Antes de esto los desechos de operaciones de recuperación de mineral eran habitualmente descargados en espacios cerca de la mina, o en las aguas superficiales más cercanas.

(Carrillo Gil, 2012) Afirma: “Las presas son generalmente las más peligrosas estructuras de la ingeniería, más aún las presas de relave. La falla de la presa, puede causar pérdidas de vidas y propiedades, donde cuyo valor es mucho mayor que de una presa en sí. La investigación de fallas de una presa de relave es de gran valor para la profesión de la ingeniería, si se realiza un estudio minucioso y analiza objetivamente. La forma en que una presa de relave falla se relaciona con sus funciones primordiales: fallas hidráulicas, debido a la erosión de la superficie de la estructura; filtraciones excesivas a través de la presa y fallas estructurales, como derrumbes o colapso estructural de la presa o cimentación.”.

Con respecto al tema Romero A. et al, (2010) manifiesta: “Los relaves tienen altas concentraciones de químicos y elementos que afectan el medio ambiente, por lo que requieren ser transportados y acopiados en tanques o pozas de relaves donde paulatinamente los contaminantes se van decantando en el fondo y el agua es reutilizada o evaporada. El material queda dispuesto como un depósito estratificado de materiales sólidos finos. La administración de relaves es una operación clave en la recuperación de agua y para evitar filtraciones hacia el suelo y capas subterráneas, ya que su confinamiento es la única opción”.

El trabajo de (Sofrá, 2002) también indica que “los métodos convencionales húmedos utilizados para el almacenamiento de relaves son problemáticos debido al riesgo de contaminación del suelo con las aguas de la represa y la difícil recuperación del terreno”. Además manifiesta que en la década del 70 se registraron alrededor de 35 fallas de represas en todo el mundo, resultando en al menos 471 muertes de seres humanos, con un gran daño ambiental asociado. Así mismo de la problemática ambiental, existe una tendencia mundial a la minimización del uso del agua para reducir así los costos operativos, mejorando la performance de la planta. Por lo tanto, una alternativa que presenta ventajas significativas, en relación a seguridad y otros factores, serían las técnicas de disposición en pasta, utilizando rechazos que deben ser espesados o desaguados antes de su disposición. Entre las aplicaciones de estos métodos en seco está la preparación de pasta, que corresponde a una pasta de relleno. La producción de relave en pasta mejora los factores como la recuperación de reactivos y el agua, además de disminuir los volúmenes de los relaves y disposición, facilitando la posterior recuperación del suelo”.

### **2.2.3. Tipos de Disposición de Relaves**

El confinamiento de relaves se realiza en presas para que contenga los relaves y el agua provenientes de las operaciones unitarias de concentración de minerales.

Del manual de (SERNAGEOMIN, 2007) Métodos de disposición de relaves. “El levantamiento de la presa se inicia con un dique de arranque que es construido de material natural de préstamo” (pág. 2), el tamaño de la construcción debe permitir el almacenamiento del volumen de dos o más años de flujo de relave.



Indistintamente del tipo de material empleado en la construcción, el crecimiento de la presa se realiza por tres métodos de disposición: Aguas Arriba, Aguas Abajo y Línea Central. Estas denominaciones son en función en que se mueven la cresta de la presa, respecto a la posición inicial del dique de arranque, a medida que se incrementa su altura (pág. 3).

### Método Aguas Arriba

Es el sistema más antiguo. Cada apresamiento se sostiene sobre el muro de relave anterior y la playa de colas depositadas, ver figura 2. La presa es levantada por la construcción de muros perimétricos sobre la superficie de la acumulación de relaves precedente, de tal manera que cada dique avanza sucesivamente hacia el interior conforme la presa es levantada. (Rodríguez, 2006). Al respecto (SERNAGEOMIN, 2007) menciona: “Este método produce el tipo de muro menos resistente frente a oscilaciones sísmicas” (pág. 9)

Mittal y Hardy en 1947 indican que “rangos de crecimiento de 45 m/año pueden provocar falla de la presa”.

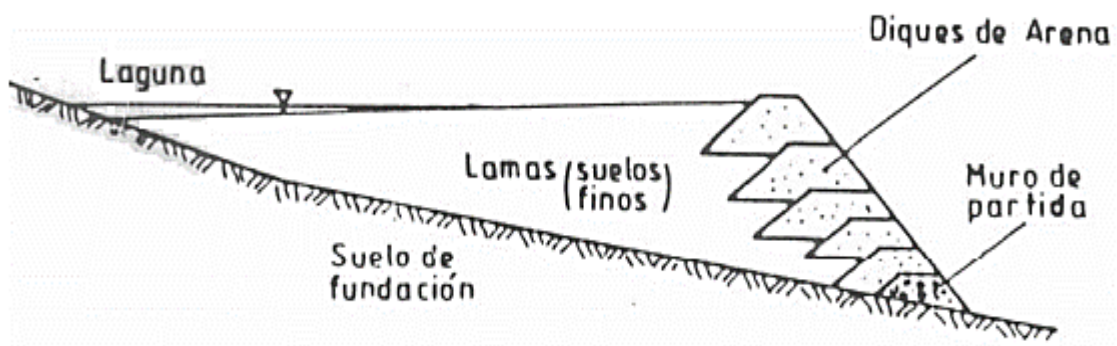


Figura 2: Presa de relave Aguas arriba (SERNAGEOMIN, 2007)

### Método aguas abajo

Se inicia con un muro del mismo material del terreno que es compactado, y con un clasificador las arenas gruesas se vacían hacia el lado del talud aguas abajo de este muro y las partículas finas se depositan hacia el talud aguas arriba, ver fig.3. (SERNAGEOMIN, 2007)

Esta técnica de deposición de aguas abajo pretende confinar un gran volumen de partículas molidas y permite estabilizar los muros, siendo estos más estables a la resistencia sísmica.

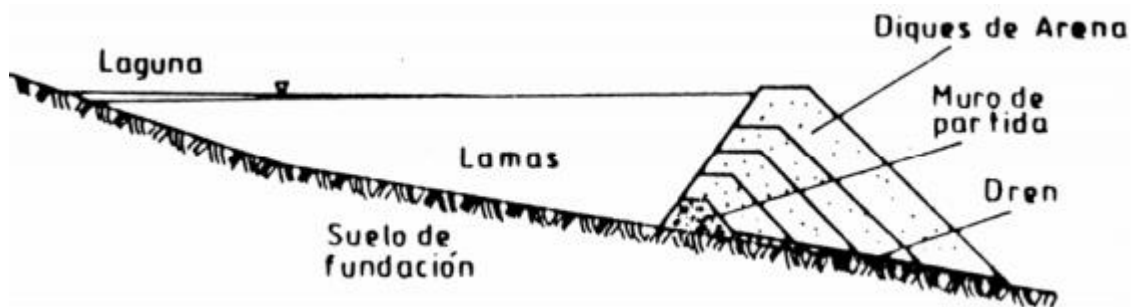


Figura 3: Presa de relave aguas abajo. (SERNAGEOMIN, 2007)

### El Método Eje Central o Mixto

Esta técnica de deposición es una combinación de los métodos aguas arriba y aguas abajo, al igual que las anteriores se inicia con el mismo material del terreno compactado, sobre el cual mediante un clasificador las arenas gruesas se depositan hacia el muro de contención del lado de aguas abajo y las partículas finas hacia el centro de la poza del lado de aguas arriba. Una vez realizado la operación de clasificación de arenas y lamas al inicio del muro de relave, se eleva el muro de coronamiento con arenas y lamas, siguiendo la misma línea del plano vertical inicial de la muralla de coronamiento del muro inicial, ver figura 4. Lo que consigue es una muralla de coronamiento de arenas cuyo eje central se mantiene en el mismo plano vertical, manteniendo el talud de aguas

arriba más o menos vertical, y el talud de aguas abajo puede tener el ángulo de reposo que el diseño considera adecuada.

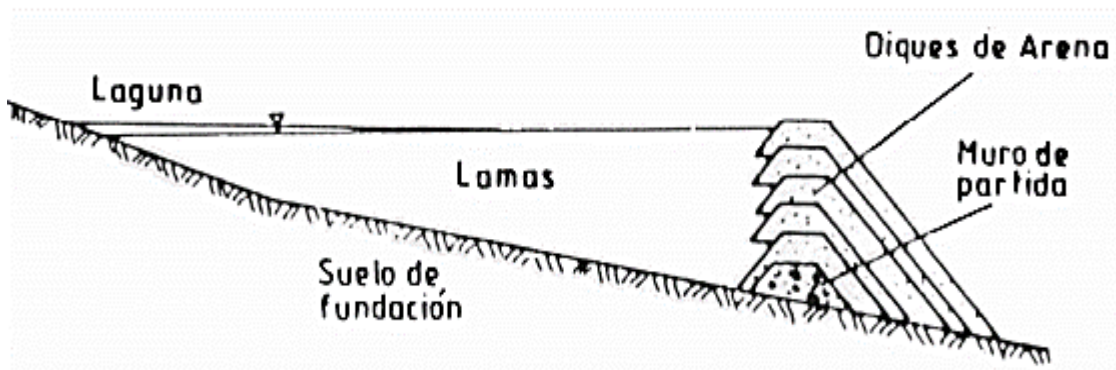


Figura 4: Presa de relave método de eje central. (SERNAGEOMIN, 2007)

#### 2.2.4. SEPARACIÓN SÓLIDO - LÍQUIDO

En la minería el agua es el recurso hídrico de mayor importancia para sus operaciones. La mayor parte de sus operaciones y procesos utilizan agua, y por lo tanto requieren su recuperación para reutilizarlas, mediante las etapas de separación sólido – líquido. En las fases de separación sólido - líquido se separa de una alimentación formada por una suspensión de partículas de un sólido en un líquido, un líquido exento de partículas y otro con sólidos en una concentración superior a la de la alimentación. La disgregación total no es posible de obtener porque, si bien el líquido puede no tener partículas sólidas en suspensión, la corriente con sólidos retendrá líquido entre sus partículas.

Al respecto del tema (Ros Moreno, 2014) manifiesta “La separación de sólido y líquidos de una mezcla se puede realizar mediante métodos puramente mecánicos y térmicos” (p.10). La figura 5 muestra estos métodos y las operaciones o procesos a los que da origen.



Figura 5: Mecanismos de separación sólido-líquido. (Ros Moreno, 2014)

A la vez (Ros Moreno, 2014), menciona “la sedimentación realiza la separación de las partículas más densas que el líquido y, que incrementan su velocidad de sedimentación tal, que lleguen al fondo del tanque espesador en un determinado tiempo que sea económicamente admisible” (p, 10).

Entonces, los factores que tienen influencia en una separación sólido-líquido son:

- a) **Concentración de sólidos:** la mayor concentración se consigue en los filtros de prensa o discos, y en tanques de sedimentación a menores concentraciones, mayor eficacia y simplicidad.
- b) **Distribución granulométrica:** El exceso de granulometrías finas originan dificultades en la separación, ya sea en el proceso de sedimentación o filtración.
- c) **Relación sólida/líquido y grado de saturación o concentración de la solución:** La mayoría de veces es ventajoso obtener soluciones altamente concentradas que presentan ventajas de precipitación posterior, por lo que una disminución del

volumen total empleado en el transcurso de separación puede representar ventajas económicas adicionales.

- d) **Claridad de la solución enriquecida:** Lo más deseable es obtener una solución clara que a veces repercute en la calidad del sólido y por ende afecta la recuperación total de solubles.

### **2.2.5. Espesamiento o Sedimentación**

La invención del espesador data en 1905 con la introducción en las plantas concentradoras de Dakota del Sur de los Estados Unidos de Norteamérica, fue punto de partida de la era moderna de espesamiento en América. Aunque debemos manifestar que el espesamiento no es un proceso moderno y no fue desarrollado en América.

Respecto al tema (Concha arcil, 2001), afirma: “Se denomina sedimentación al proceso de asentamiento de un material sólido o líquido desde un fluido, generalmente agua o aire, desde un estado de suspensión” (p. 4). El mismo Concha, explica la sedimentación con esferas sólidas en un líquido. “La eficacia de la separación depende esencialmente de la longitud del campo de fuerza de cuerpo aplicada, gravitacional o centrífuga, de la diferencia de densidades entre las partículas sólida y líquida, de la dimensión de las partículas y de la densidad del líquido. La cantidad de líquido de una suspensión que es capaz de separar la sedimentación es toda aquella que no llena los poros del sedimento formado” (p. 5).

La sedimentación por gravedad en la que se centraliza nuestra tesis, en principal, un fenómeno netamente físico. Está relacionada únicamente con las propiedades de caída

de las partículas en el líquido. Cuando se produce la precipitación de suspensiones de partículas, el efecto concluyente será siempre un fluido purificado y una suspensión más concentrada.

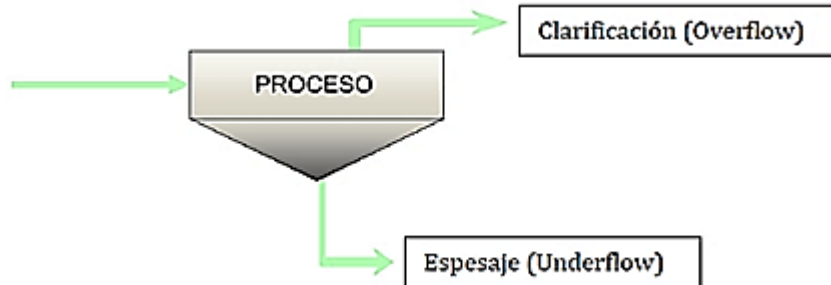


Figura 6: Mecanismo de espesamiento (Ros Moreno, 2014)

Según (Ros Moreno, 2014) los objetivos que se diseñan en la precipitación de sólidos en líquidos son:

- La generación de una etapa líquida principalmente clara (limpia),
- La aglomeración de los sólidos suspendidos con la finalidad de formar lodos más densos (sedimentación), o
- El esparcimiento de partículas de diferentes dimensiones, formas y gravedades específicas en fracciones (clasificación).

Hablamos de clarificación de líquidos cuando tenemos un interés en el flujo purificado, y de espesamiento cuando el beneficio es la concentración de suspensiones.

#### **2.2.6. Pruebas de Sedimentación discontinua**

Se realizaron para determinar experimentalmente las velocidades de sedimentación  $R$ , a diferentes concentraciones comprendidas entre la concentración de la alimentación y de la descarga. (Quiroz Nuñez, 1986)

Para ello, se realizarón pruebas de sedimentación discontinua en probetas conteniendo pulpas a una concentración inicial definida, que, al sedimentar, permite

medir la variación de la altura de la interfase entre la solución clara y la pulpa que sedimenta respecto al tiempo. Esto a su vez nos admite calcular la velocidad de asentamiento  $R$ .

Como  $R$  está en relación con la concentración de los sólidos, los valores obtenidos en las pruebas discontinuas, podrán ser aplicados en operaciones continuas.

La metodología experimental se inicia con la preparación de la pulpa a una concentración específica y moviendo la pulpa en el interior de la probeta para alcanzar la uniformidad. Luego comienza la sedimentación avanzando el proceso en la forma que se indica en la figura 7.

Diferentes etapas de la sedimentación. La letra A, representa al agua clara, B a la pulpa que sedimenta y D a los sólidos compactados.

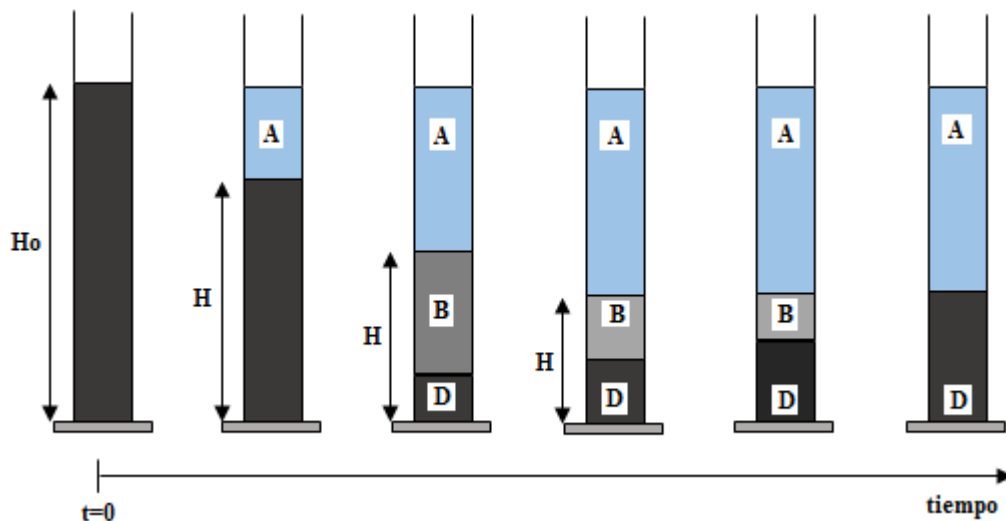


Figura 7. Prueba de sedimentación de pulpa (Quiroz Nuñez, 1986)

Para determinar la velocidad de precipitación, se precisa tomar datos de la altura de la interface entre las zonas A y B, en relación al tiempo, graficándolos luego para conseguir las curvas de sedimentación.

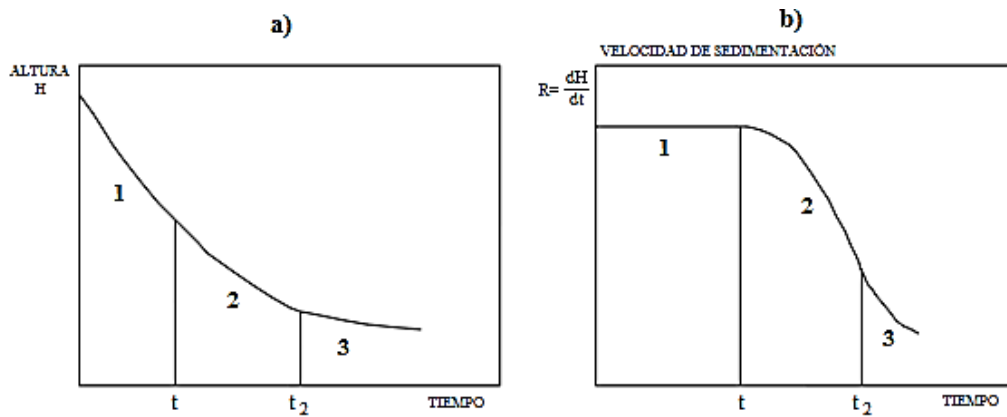


Figura 8: Curvas de sedimentación (Quiroz Nuñez, 1986)

En la porción 1 de las curvas la velocidad de sedimentación  $R$  es constante, luego la velocidad disminuye en la sección 2 para finalmente tender a cero cuando los sólidos se encuentran compactados.

El valor del  $R$  que deberá utilizarse es el que corresponde a la pendiente de la curva de sedimentación en la zona 1, que será la velocidad de sedimentación de los sólidos para la concentración inicial. Las velocidades de sedimentación en las porciones 2 y 3 de la curva que podrían calcularse por las pendientes respectivas, corresponden a concentraciones diferentes y para la técnica de Coe-Clevenger no deberán ser usadas.

Realizando varias pruebas similares a la descrita se dispondrá de un conjunto de datos de  $R$  y  $C$  que permitirán calcular el área unitaria y por lo tanto el diámetro adecuado del espesador.

### 2.2.7. Sedimentación de suspensiones concentradas reales

Los estudios realizados de sedimentación de partículas aisladas no guardan concordancia con hechos de la realidad, (que las partículas se encuentran en una suspensión) no se puede observar realmente lo satisfactorios o productivos que pueden



ser los mismos, de allí que se hayan realizado estudios que permiten adicionalmente conocer la correlación que existe entre la sedimentación de una partícula y la sedimentación de una suspensión.

Según (Ros Moreno, 2014), Si puede observarse la sedimentación de pequeñas esferas vidrios. Cuando cada partícula está bien dispersa en la fase continua. Las partículas finamente molidas pierden su velocidad de sedimentación siendo está más pequeña. Y para ayudar a la sedimentación de estas partículas pequeñas se realiza la floculación, que consiste en que cada floculo aglomere estas partículas finas, incrementando el tamaño de estas partículas y por ende se incrementa la velocidad de sedimentación. Sin embargo, estas partículas floculadas mantienen una cierta cantidad de líquido al ser parte del sedimento, la que sólo puede ser comprimida y expulsada de él. Este fenómeno se genera por la presión realizada sobre los flóculos por el material que se acumula sobre ellos. En este proceso la sedimentación se extiende más allá del momento crítico a una velocidad imperceptible que recibe el nombre de *consolidación*. Como la concentración del sedimento dependerá de la cantidad de líquido que expulse, y ésta penderá del peso que soporte el material en esa posición, es obvio que las capas inferiores que resisten todo el peso del sedimento serán más condensadas que las capas superiores de éste (pág. 39).

Es así como la sedimentación se establecerá una pendiente de concentración que adquirirá un valor constante en el equilibrio final.

#### **2.2.8. ESPESADOR**

Según Ara Gabriel (2019) describe: “El espesador es un equipo que trabaja en forma continua, tiene un rastrillo que sirve para empujar lentamente, hacia la descarga

del underflow, las partículas asentadas en el fondo en forma de lodo espeso, con la finalidad de evacuarlo por la descarga (cono). El movimiento de los rastrillos evita que el lodo se asiente totalmente en el fondo, y sin este dispositivo mecánico el lodo se endurecería en el fondo del tanque”. (p, 29)

Sobre el mismo tema (Chia Aquije, 1984) manifiesta: “La sedimentación industrial de las suspensiones de sólidos en agua, se lleva a cabo generalmente a través de un proceso continuo en tanques cilíndricos llamados espesadores; el cual tiene dos brazos mecánicos de rastrillaje del barro o carga espesada”. (pág. 57).

#### **A. Tipo de Espesadores**

En función al tratamiento de relaves en pasta tenemos.

##### **a) Espesador de Alta Capacidad**

Se desarrolló en 1975 impulsados por la introducción de floculantes aniónicos más potentes, alcanzando áreas unitarias de 3 a 5 ft<sup>2</sup>/t/día. La alta capacidad la define el tipo de floculante, dosificación y forma de alimentación del mismo.

Este tanque cuenta con un procedimiento especial de dosificación de floculante y un pozo de alimentación profundo. El espesado alcanza de 60 a 70 % de sólidos, requieren do por tal motivo un mecanismo más reforzado de rastras.

Este espesador que maneja razones de 3 a 5 ft<sup>2</sup>/ton/día. Aunque existen diferentes modelos de espesadores que proporcionan una alta capacidad, dicha facultad no es función del tipo de espesador si no de la dosis de floculante como lo muestra la figura 9.

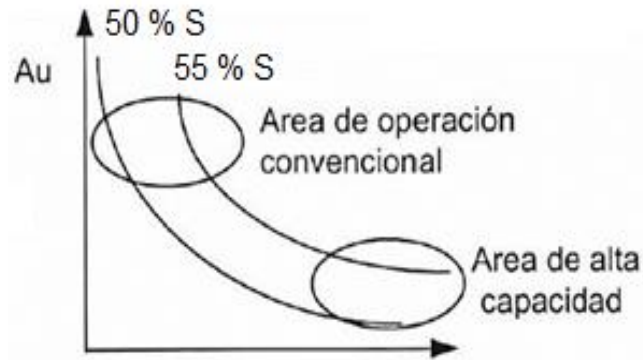


Figura 9: Comportamiento % sólidos vs la dosis de floculante en un espesador.

### b) Espesador de cono profundo

Los sedimentadores de cono profundo fueron desarrollados en la producción del carbón británico en los años 1960 a 1970. Con el paso del tiempo el espesador se combinó con las técnicas de floculación, produciéndose cambios en el sistema de alimentación, forma del tanque, rastras y sistema de descarga del underflow. Este espesador se destaca por la gran altura que puede alcanzar (varios metros), generando más altas las fuerzas de compresión que origina el aumento de los sólidos concentrados en la descarga. (Slotte, 2005).

El espesamiento se realiza huyendo de las reglas convencionales de dimensionamiento de espesadores y resultando en equipos con alturas superiores a sus diámetros. Tanto el elevado torque requerido para el mecanismo como el sistema interno de rastra, se evalúa a través de pruebas piloto de descarga, sin los cuales resulta prácticamente improbable determinar el comportamiento de los equipos industriales.

El espesamiento en sólidos de las pulpas resulta con una elevada tensión necesaria para que se eleve exponencialmente a partir de un determinado

porcentaje de sólidos, esto convertido en valores de tensión de flujo superiores a 80 Pa (Araujo, 2003).

En los equipos de separación sólido / líquido, se ha observado una notable sinergia entre floculantes de alto peso molecular y la elevada velocidad de espesamiento. Últimamente se han desarrollado el aumento de la altura de los espesadores, haciendo uso de la compresibilidad natural de las pulpas altamente floculadas para producir así "Underflow" grueso, en muchas situaciones conveniente para la disposición directa. En esto favorece la forma cónica de la descarga que facilita el movimiento de pasta, cuyo ángulo varía de 10 a 60°. Según Stephen (2005), los espesadores de pasta mineral se vuelven atractivos por permitir una elevada recuperación de agua en un solo equipo.

## **B. Funcionamiento del Espesador**

(Ros Moreno, 2014), afirma "El espesador es un equipo de función limitada. Si se desea obtener el objetivo esperado, se debe operar y controlar dentro unos límites específicos. Normalmente se debe evitar tamaños sólidos gruesos entre 20 a 65 mallas" (pág. 69).

De acuerdo a Coe H.S. y Clevenger G.H. (1916), se clasifican cuatro zonas en un espesador convencional continuo, ver figura 10.

**Zona I.** Denominado zona del líquido claro. Es donde, este líquido, ha sido separado de la suspensión, es recuperado en el rebalse.

**Zona II.** Denominada zona sedimentación obstaculizada. Donde la mayor parte de los sólidos de la pulpa es uniforme que sedimentan a velocidad constante.

**Zona III.** Zona de transición. Donde la pulpa se encuentra en una situación intermedia entre el espesamiento y compresión.

**Zona IV.** Zona de compresión. Denominada así porque los sólidos eliminan parte del agua por compresión. Ella consiste en una pulpa más densa en que los flóculos, reposan unos sobre los otros constituyendo una capa pesada, que ejerce una presión sobre la capa inferior debido al peso, dando origen a un gradiente de presión. Esta gradiente de presión origina, a su vez un gradiente de concentración.

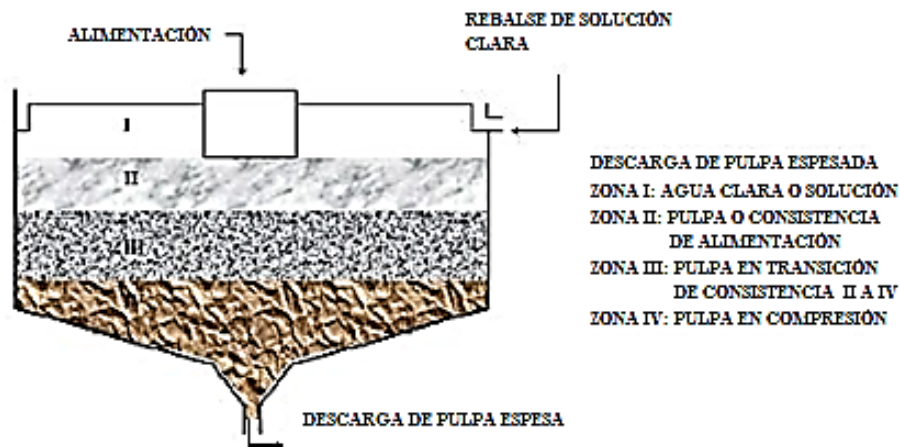


Figura 10: Zonas de sedimentación (Ros Moreno, 2014)

### C. Normas de funcionamiento del espesador

Según Donald L King (1985) “El espesador se debe operar y controlar en entendimiento como funciona y la importancia de las variables envuelta”. (p. 113)

- a. Alimentación menor que la descarga=Acumulación
- b. La excesiva acumulación resulta en problemas de funcionamiento, lo que ocasiona paradas y limpieza. Puede ocurrir algunas de las consecuencias siguientes:
  - La pulpa comenzara a salir del tanque por el rebose
  - El hundido (underflow) puede resultar demasiado espeso para el bombeo

- Se formara una “isla” en el espesador, y la densidad del hundido llegará a hacerse próximo a la alimentación.
- El mecanismo de rastrillo llegará a sobrecargarse y será parado por el control de accionamiento.

#### **D. Control de la operación**

(Mular, 1985), manifiesta, “Lo que ocurre en el interior del espesador no resulta claro a la observación visual”. Por lo que hay que tener en cuenta:

- **Nivel de pulpa.** El aumento de nivel nos indica hay una acumulación, probablemente de flóculos o insuficiente salida de sólidos sedimentados.
- **Alimentación.** Densidad, distribución granulométrica, y cantidad de sólidos.
- **Hundido (underflow).** Densidad, distribución granulométrica de los sólidos, y cantidad. Los sólidos en la alimentación se esperan que vayan hacia el hundido.
- **Par (torque).** El aumento de par indica que puede ocurrir sobrecarga.
- **Nivel de cama.** La capa de sólidos en el espesador se monitorea, mediante un sensor de nivel óptico de cristales. Un incremento de nivel sólidos, o tiempo de residencia de sólidos, incrementara la densidad de descarga, presión en las bases del espesador y valores de par (torque). La presión de la capa de sólidos es una medida que nos orienta la altura que se está obteniendo.
- **Dosificación de floculante y mezcla**
- **pH del líquido,** cuando se requiere

## **E. Espesamiento de Relaves**

Este proceso tiene la finalidad de espesar los relaves resultantes de la flotación. Este proceso se realiza en sedimentadores (espesadores), que en su diseño tradicional son depósitos que tienen la forma cilíndrica con un fondo en forma de cono de gran ángulo, para facilitar la descarga de la pulpa de relave.

Según Donal King (1965) “el espesado de relave se realiza conforme entra la alimentación en el espesador, los sólidos van decantando hacia el fondo. El líquido clarificado rebosa por la parte superior, y los sólidos se evacuan por la descarga inferior” (p, 84).

Concha Jairo (2014) manifiesta, en resumen, “los espesadores de alta densidad o de pasta, maximizan la eficiencia del floculante por medio de sistemas patentados de dilución, usan un precipitador muy alto para formar alta compresión, ángulos de cono entre 40° a 60° y sistemas muy robustos para sus rastras, para así operar materiales muy densos. Además, es una práctica común industrial, el empleo de sistemas de cizallamiento y un alto grado de automatización en este tipo de espesadores, con los que se consigue un control preciso de las condiciones que se desean en la descarga, sin poner en riesgo la integridad de los equipos posteriores” (p, 66)

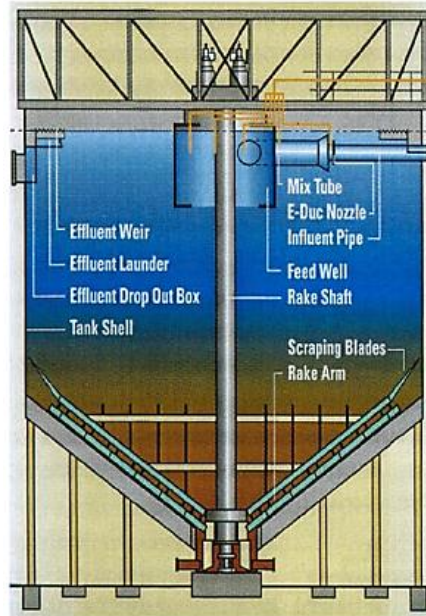


Figura 11: Sedimentador de cono profundo con rastras (Concha arcil, 2001).

## F. Parámetros de espesamiento

### a. Parámetros de sedimentación

La cuantificación de la sedimentación se hace a través de la concentración de la suspensión, medida como fracción volumétrica de sólidos, y por la densidad de flujo de sólidos, definida como el producto de la concentración y la velocidad de la suspensión.

Se realiza pruebas de sedimentación batch a distintas concentraciones, midiendo la velocidad de asentamiento de la interface agua-suspensión con el tiempo.

### b. Parámetros de consolidación

La consolidación se produce debido al peso que soportan las capas de sedimento. Por una parte, los efectos de la consolidación se observan en la presión en exceso de poros y por la otra, en el perfil de concentraciones. Por



ello, la ecuación constitutiva del esfuerzo efectivo del sólido se puede calcular midiendo estas dos variables.

### **2.2.9. VARIABLES QUE SE RELACIONAN CON LA PULPA ALIMENTADA**

Según (Bravo Galvez, 2003), las variables que se relacionan con la alimentación al cono sedimentador y que tienen que controlarse son:

- a) **Porcentaje de sólidos.** El porcentaje de sólidos en la alimentación al sedimentador nos indica la cantidad de sólidos que está ingresando por litro de pulpa, está a la vez tiene influencia en la granulometría del mineral que tiene efecto en el proceso de sedimentación, por ello para una operación eficiente de sedimentación se debe controlar en el rango 10 y 20 % de sólidos, en dicho rango la variación del porcentaje de sólidos no afecta la sedimentación. (pág. 19).
  
- b) **Densidad.** La densidad de alimentación al cono sedimentador, depende del control de la alimentación de carga a la molienda, que repercute en la flotación y en la sedimentación de partículas de minerales, y por ende en la granulometría final del relave. Cuando la densidad es baja; nos indica que: La pulpa que entra al sedimentador es muy aguada, esto perjudica la formación del nivel de capa o cama, debido a la baja concentración de sólidos que no permite la compactación de partículas sedimentados en el cono debido a la formación de espacios vacíos. Cuando la densidad es alta; nos indica que: La pulpa que entra es espesa, y provoca el enturbiamiento del rebose de agua del sedimentador, que ocasiona el desplazamiento de sólidos en exceso al rebalse. (pág. 19)

### c) **Granulometría**

La distribución granulométrica de partículas es un importante parámetro para obtener pastas mineras, que tiene influencia en la porosidad, permeabilidad y en varias propiedades reológicas.

(Falcucci, 2007), “las pastas mineras pueden habitualmente ser obtenidas desde un amplio rango de granulometría, mientras que contenga un mínimo del 15% de las partículas del material que representa un tamaño de 20  $\mu\text{m}$ ”.

En espesadores de cono con rastras, este factor es significativa en la elección del torque, debido a que las partículas de mayor tamaño sedimentan más rápido y requiere de un mayor torque, debido a la alta acumulación de sólidos en las capas profundas del material sedimentado. Por otro lado, las partículas de menor tamaño de sedimentación lenta necesitan un menor torque. (Campos, 2016)

#### **2.2.10. PASTAS MINERALES**

La producción de pastas minerales se genera en los conos sedimentadores que aglomeran las partículas finas en la parte cónica, dejando salir una masa más densa con poco contenido de agua.

Las aplicaciones de pasta minerales en el mundo son muy diversas de acuerdo al trabajo de Houman et Jhonson (2003)

Al respecto Theriaul et. al. (2001), manifiesta “las pastas minerales son masas debidamente desaguadas que no sufren segregación de minerales cuando son depositadas sobre superficies y que liberan una mínima cantidad de agua”.

Así mismo Araújo et. al. (2003) complemento esta definición como “sistemas coloidales, de aspecto homogéneo, en los cuales no ocurre la segregación granulométrica de partículas y que, se ha dispuesto de forma suave sobre superficies estables, no presenta una proporción significativa de agua”.

A través de la obtención de la tensión de flujo (yield stress o tensión de ruptura) de las suspensiones minerales y distinguir posibles rangos de concentrado de sólidos en que se observa la transición del estado de pulpa a pasta mineral. La Figura 12, presentada por Landriault (2002), muestra cualitativamente el esfuerzo de cedencia (o de ruptura) en función del porcentaje de sólidos en masa, presentando los principales estados posibles de estos fluidos, los equipos utilizados en cada caso y las características de bombeo y filtración.

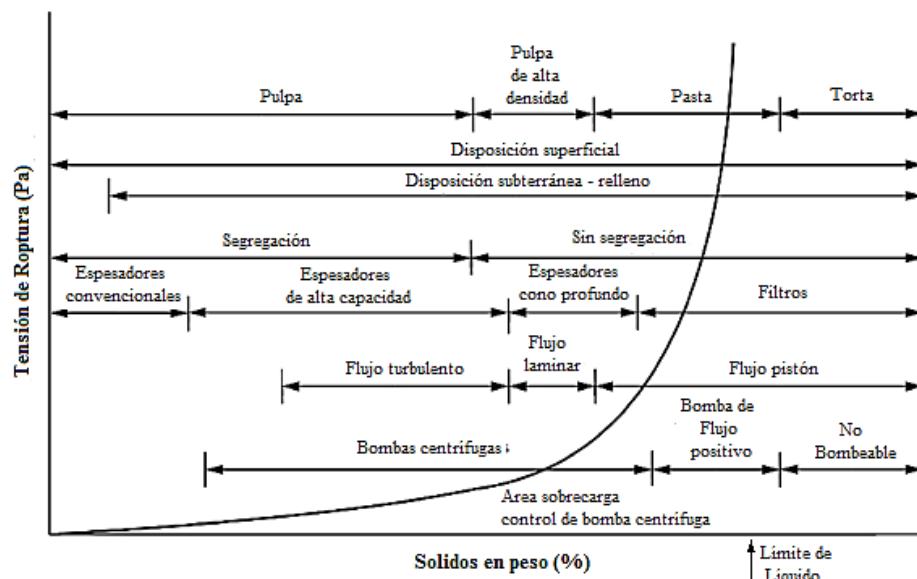


Figura 12: Definición teórica de pulpa, pulpa de alta densidad, pasta y torta (adaptado de Landriault, 2002)

### 2.2.11. PRUEBA DE PASTA

El concepto de pasta de mineral, puede ser conceptualizado como un sistema coloidal o casi coloidal, que se presenta como un fluido homogéneo, en el cual no ocurre segregación granulométrica de las partículas y que, al ser dispuesto suavemente sobre

superficies estables, no muestra drenaje significativo de agua. Según (Araujo et. al. Jewe, 2002). Su fluidez y consistencia durante su deposición, pueden ser determinadas mediante técnicas tales como los ensayos de “abatimiento” (slump test) y de “canaleta” (flume test). A continuación, se hace la descripción de las pruebas que se realiza a la pasta de relave.

#### a) Pruebas de abatimiento ("slump")

La prueba de abatimiento (slump) se dio para medir la consistencia o plasticidad de mezclas de hormigón en un inicio, posteriormente se normalizo por la norma ASTM a partir del año 1998. (Clayton, Grice y Boger. 2003)

La prueba de cono se inicia con el llenado con concreto hasta completar todo su volumen, siendo retirado verticalmente, y verificándose la diferencia entre la altura original y la final, que se denomina altura de "Slump" o altura de abatimiento. (Figura N° 13).

El porcentaje de abatimiento (%ABT) se determina mediante la ecuación siguiente:

$$\% ABT = \frac{H - h}{H} \times 100$$

Donde:

H: altura del cilindro

h: altura de pasta ensayada

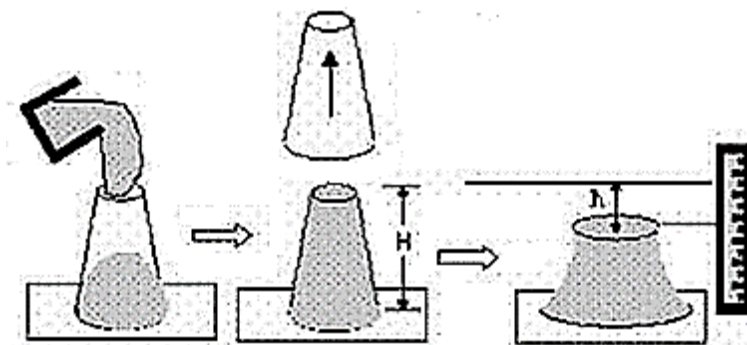


Figura 13: Procedimiento del ensayo de abatimiento. (Clayton et. al., 2003)

El ensayo de slump se ha realizado para determinar la consistencia de fluidos inelásticos, en concretos, shotcrete y en suspensiones de residuos de minerales. La altura del cono se utiliza como parámetro de control, para evaluar la consistencia de una carpeta. Esta altura es dependiente de la tensión de flujo como de la densidad del material.

En el contexto minero, estos factores podrían variar con los cambios en el origen del mineral o cambios en su procesamiento ver tabla 2. Como resultado, la utilización de la altura de "slump" como el único parámetro para la evaluación de la consistencia para el sistema de disposición de los desechos puede no ser suficientes. Una superficie cilíndrica puede utilizarse de forma alternativa al cono para pruebas en laboratorio.

Tabla 2  
*Resistencia a la fluencia de asentamiento*

<b>Parámetro</b>	<b>Relave de carbón</b>	<b>Relave de Au</b>	<b>Relave de Pb/Zn</b>
<b>Densidad</b>	1450 kg/cm <sup>3</sup>	2800 kg/cm <sup>3</sup>	4100 kg/cm <sup>3</sup>
<b>%S</b>	36%	75%	75%
<b>Asentamiento de cono</b>	203 mm (8")	203 mm (8")	203 mm (8")
<b>Resistencia de fluencia</b>	160 Pa	1275 Pa	330 Pa
<b>Perdida de fricción (calculada)</b>	5,07 kPa/m	8,13 kPa/m	9,6 kPa/m

Tomado de Boger (2002, p 31)

La Tabla 3 presenta algunos tamaños de cilindro utilizados por (Clayton, 2003) y Hernández (2005).

Dimensiones y material de construcción de cinco cilindros para la prueba de "slump" de laboratorio, utilizados en los experimentos de Clayton et al. (2003) y Hernández et al. (2005).

Tabla 3  
*Tamaño de conos para prueba de consistencia*

<b>Cilindro</b>	<b>Altura, H (mm)</b>	<b>Diámetro, D (mm)</b>	<b>Material de construcción</b>
<b>1</b>	75	75	PVC
<b>2</b>	102	102	PVC
<b>3</b>	120	120	Perspex
<b>4</b>	200	200	Lámina metálica
<b>5</b>	100	100	PVC

Tomado de Clayton (2003) y Hernández (2005)

En la industria mineral, la prueba de "slump" encuentra una importante aplicación para evaluación de materiales para "relleno".

Para maximizar la disposición de los desechos y minimizar el uso de cemento, los sistemas de "relleno" operan normalmente en el rango de concentración de sólidos entre 70 a 90% en masa. En estas altas concentraciones, la tensión de flujo de la pasta es muy sensitivo a las alteraciones de la concentración de sólidos y, por consecuente, es vital un control efectivo de la estabilidad de la carpeta. (Clayton et al., 2003)

(Jung, 2002), utilizando pruebas de "slump" en función a la norma ASTM C143, se encontraron correlaciones consistentes entre los valores de altura de "slump" y las cantidades de agua de las mezclas o pastas estudiadas. Esto fue muy útil para establecer una apropiada consistencia de la mezcla con cemento, ya que un adecuado contenido de agua fue compatible con los criterios de proyectos existentes.

## b) Prueba de canaleta ("Flume")

Una canaleta de laboratorio fue construida en acrílico para la realización de estos ensayos (Hernández et. al., 2007), con dimensiones de 100 cm de largo, 20 cm de ancho y 20 cm de altura. Ver figura 14 y 15

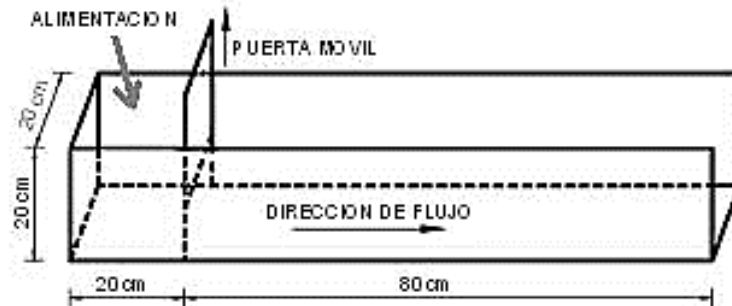


Figura 14: Forma y dimensiones de la canaleta utilizada (Hernández et. al., 2007).

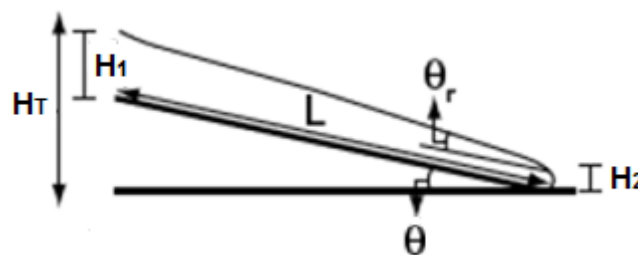


Figura 15: Diagrama esquemático del fluido estacionario en la canaleta. (Sofrá et al, 2002)

La siguiente ecuación se utiliza para estimar el ángulo de reposo ( $\theta_R$ ) del relave espesado.

$$\theta_R = \arctg \left[ \frac{(H_1 - H_2)}{L} \right]$$

Donde:

$H_1$ : altura en el punto inicial de la canaleta

$H_2$ : altura del punto final de la canaleta

$L$ : largo del recorrido por la pasta ensayada en la canaleta

Esta prueba consiste en llenar el relave espesado en la caja de la canaleta, que consta de una compuerta, el cual se levanta y se deja correr el desplazamiento del relave. El

ángulo de reposo es otra propiedad importante de las carpetas que se puede estimar realizando la prueba de canal ("Flume"). Esta prueba consiste en determinar el ángulo máximo posible en el que la pasta aún se mantiene en reposo.

### 2.2.12. Disposición superficial

La depositación de relaves mineros en forma de pulpa, se realizó desde el inicio de la minería, y en grandes extensiones de terreno, las cuales requieren de grandes inversiones asociadas a infraestructura y obras de ingeniería, y además en los diversos casos constituyen costo operativo demasiado alto. Sin embargo, la metodología de espesado de relaves en forma de pasta no sólo despertó el interés de la industria minera en el campo de la disposición superficial desde el punto de vista económico (costos de inversión y de operación) sino también desde el aspecto ambiental y geotécnico, figura 16. (Cabrejo Salinas, 2011).

“Las pastas de relaves que presentan flujos de inclinación de 3 a 10 grados, proporcionan una buena estabilización del material durante la disposición superficial”. (Olcay Barreda, 2014)

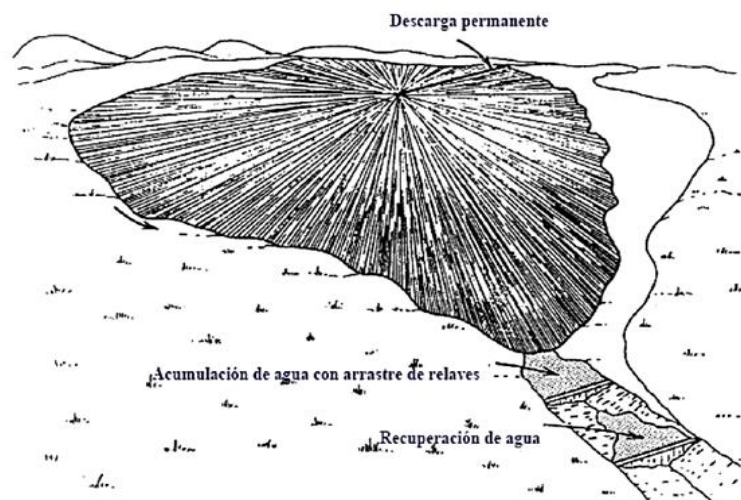


Figura 16: Disposición de relave en pasta



### **2.2.13. Beneficio del Relave Espesado**

A continuación, detallaremos los beneficios de la deposición de relave espesado:

- No requiere de un dique de represión.
- Incremento de la capacidad del depósito.
- Se reduce los riesgos de impactos de la napa y cuencas naturales.
- Ampliación de la estabilidad sísmica y eliminación de la posible licuación.
- Eliminación de la contaminación por degradación de aguas lluvias ni por acción eólica.
- Se incrementa la recirculación de agua de proceso considerablemente.
- Se reduce el área de suelo requerido para disponer los relaves, mejorando la utilización del suelo.
- En el perímetro del depósito se puede realizar trabajos de represión para la recirculación de agua.
- Los relaves son depositados conteniendo sobre 50 %S en peso.
- La pulpa mineral discurre en forma libre, sin disgregación del material por tamaño.
- En la sección de descarga se forma un cono natural con material de relave con pendiente que depende del %S (ángulos de 2 a 6 % para porcentajes de sólidos de 50 - 65 %).
- Con el desplazamiento del punto de descarga se obtiene un depósito de baja altura, por lo que es apropiado para disponer relaves en extensiones relativamente planas.
- El secado rápido de la pasta permite que permanezca estable aun cuando esté varias horas sin moverse.
- El relave espesado contiene una gran variabilidad de elementos como silicatos, feldespatos, arcillas, micas y sales.

## 2.2.14. FLOCULACIÓN

Este mecanismo, involucra la formación de aglomerados más grandes y más abiertos que aquellos resultantes de la coagulación, y se fundamenta en la acción de los reactivos actuando como amarre a puente entre partículas suspendidas separadas. El mecanismo de floculación es bastante similar al de coagulación. Ver figura 17.

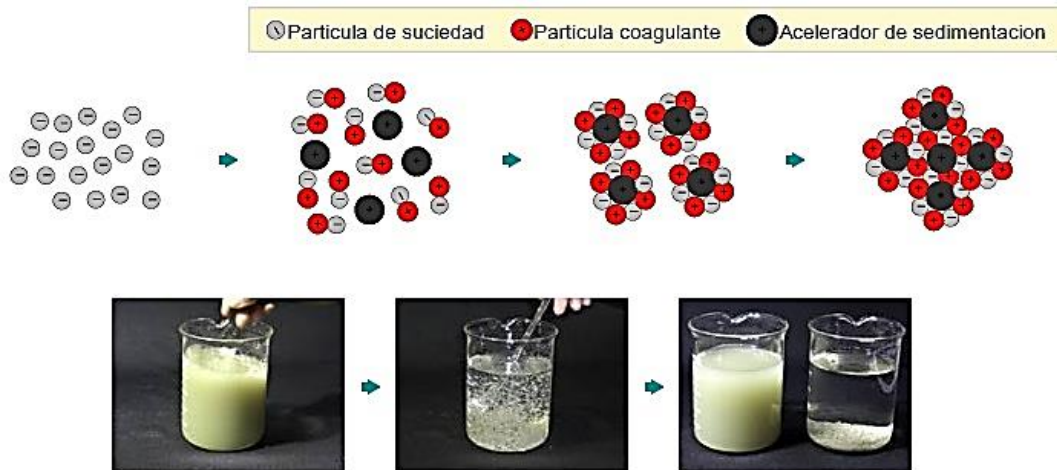


Figura 17: Mecanismo de floculación (Fuente: Nihon Kasettsu)

Según (Castillo Juversay, 2011) “Consiste en la homogenización de la masa coagulada que permite el incremento y aglomeración de los flóculos recién formados, que tiene como fin aumentar el tamaño e incrementar el peso para precipitar con facilidad. Además, menciona “La floculación es beneficiada por la homogenización lenta que permite acumular poco a poco los flóculos; una agitación intensa rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerzas óptimas”

"Partículas flocculentas" son aquellas producidas por la unión de partículas coloidales por medio de agentes químicos. Se denomina "sedimentación flocculenta" o "decantación", al proceso unitario de depósito de partículas flocculentas, las cuales cambian de características (forma, tamaño, densidad, resistencia) durante el proceso (Ros Moreno, 2014, pág. 16).

En el caso de la separación sólido-líquido el método más utilizado es la floculación con reactivos poliméricos, los que son solubles en agua y, por consiguiente, son hidrofílicos (Ros Moreno, 2014, pág. 24).

Floculación significa coagular formando copos ó estructuras fibrosas sueltas. Es decir, la floculación, es una parte de la coagulación, que se determina por la formación de una malla tridimensional suelta y porosa, generalmente promovida por la acción de una macromolécula que actúa de puente entre las partículas. Generalmente, el flóculo tiene mayor volumen que su correspondiente coagulo (Ros Moreno, 2014, pág. 226)

Los floculantes son polímeros orgánicos de cadena larga y alta masa molecular, solubles en agua, que al establecer puentes entre partículas forman una partícula con un mayor tamaño aparente. (Torres 2016 p, 30-31)

### **A. Tipos de Floculación**

#### a) Floculación Pericinética

Movimiento natural de las moléculas de agua y esta inducida por la energía térmica.

#### b) Floculación Ortocinética

Se basa en los choques de partículas de mineral debido a la agitación del agua, el que es provocado por una energía exterior mecánica a la masa de agua o hidráulico.

### **B. Parámetros de la Floculación**

#### - Floculación Ortocinética

- Pendiente de velocidad
- Numero de choques
- Tiempo de retención
- Densidad y tamaño de floculación
- Volumen de lodos

### C. Floculantes

#### a) Floculantes Minerales

Sílice activada que es el primer floculante empleado, que debe ser preparado antes de ser utilizado.

#### b) Floculantes Orgánicos Naturales

Polímeros de origen naturales que se obtienen de sustancias animales y vegetales

#### c) Floculantes Orgánicos de Síntesis

Macromoléculas de una gran serie, alcanzados por monómeros sintéticos.

### D. Floculación usando polímeros

Cuando se emplean polímeros como agentes floculantes, puede considerarse que existe la hetero floculación. En este estudio, la rapidez de adsorción del polímero, suponiendo que cada colisión entre polímero y partícula conduce a adherencia, se obtiene mediante la ecuación.

$$\frac{dC_{Nf}}{dt} = -kC_{Np}C_{Nf}$$

Donde:

$C_{Nf}$  = Número de moléculas del polímero por unidad de volumen

$k$  = constante de rapidez para las colisiones entre moléculas de polímero y partículas.

En la floculación con polímeros, el flóculo que se forma inicialmente es suelto y voluminoso. Al aplicar las fuerzas fluctuantes locales y desiguales sobre la superficie del flóculo, ocurre una densificación del medio de dispersión. Este mecanismo adicional de la floculación tiene el nombre de sinéresis mecánica.

#### **E. Factores que afectan la floculación**

De la experiencia se ha podido observar que los siguientes factores afectan en los resultados al realizar una floculación en un medio acuoso (Quispe Ordoñez, 2011).

**Porcentaje de sólido en una pulpa:** Conforme se incrementa el porcentaje de sólido en una pulpa, se incrementa la edición de floculante ya que hay que mantener los g/Tn del floculante para no afectar.

**Carga superficial de las partículas:** Dependiendo de esta carga superficial en medio acuoso dependerá el tipo de carga del floculante (aniónico, no iónico o catiónico).

**Estabilidad de los coágulos:** A veces cuando los coágulos no son lo suficientemente estables, una ligera agitación ocasiona que se rompan impidiendo que el floculante pueda atraparlos.

**Tamaño de partícula:** Los floculantes tienen la limitación de perder eficiencia conforme se reduzca el tamaño de partícula, cuando estas partículas son menores a 1 micrón es preferible coagular y luego flocular.

**pH:** a pH bajo se obtendrá mejores resultados con floculantes de baja densidad de carga, a pH alto se obtendrá mejores resultados con floculantes con alta densidad de carga; esto independientemente de si son aniónicos o catiónicos.

## 2.2.15. CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Con respecto a la contaminación ambiental de la página web (Significados.com, 2018) concluye: “Se entiende por contaminación ambiental a la adición en el medio natural de agentes de tipo físico, químico y biológico, que alteran las condiciones del ambiente, ocasionando alteraciones de la salud, el bienestar y la habitabilidad de la vida animal y vegetal en general”. Además, menciona “Agentes contaminantes pueden ser sustancias químicas (plaguicidas, herbicidas, cianuro, etc.), petróleo, radiaciones, gases contaminantes, relaves mineros, botaderos de desmontes, residuos urbanos, entre otras cosas. Todos ellos, pueden provocar graves daños en los ecosistemas”.

En este sentido menciona, la contaminación está asociada al impulso económico y social de las naciones, especialmente cuando este desarrollo se produce sin considerar las consecuencias que tiene en el ambiente. De lo mencionado el desarrollo sostenible viene a ser la forma idónea para que puedan ir juntas el desarrollo, con el cuidado del medio ambiente. La contaminación ambiental se ha globalizado afectando a todos los seres vivos y que debe ser tratado con mucha responsabilidad. (Significados.com, 2018)

(García Saldaña, 2014), manifiesta. La actividad minera genera impactos que los a clasificados de la siguiente manera:

### A. Impacto Ambiental de la Actividad Minera

**Impactos ambientales:** Son las consecuencias de los relaves que ocasionan en el radio de acción donde se disponen y confinan, que, al realizarse sin ningún cuidado y manejo técnico recomendado, puede ocasionar daños en cuerpos acuíferos (ríos, fuentes de agua, napa freática, lagunas), suelos y atmósfera.

**Contaminación del aire:** El aire se altera por la introducción de contaminantes de material particulado, que están presentes en los polvos, combustibles tanto tóxicos como inertes, que son capaces de ingresar hasta los pulmones, procedentes de las diversas etapas del proceso.

**Afectación de las aguas superficiales:** el material particulado de las operaciones de explotación minera ocasiona una elevada capa de sedimentos en los cauces de los ríos cercanos a las operaciones mineras.

**Afectación de las aguas subterráneas o freáticas:** Estas son ocasionadas por la introducción de residuos de aceite, reactivos, metales pesados provenientes de la lixiviación de pilas o botaderos de desmontes mineros.

#### **2.2.16. DESARROLLO SOSTENIBLE**

El desarrollo sostenible es la capacidad de satisfacer las necesidades del presente, sin afectar la capacidad de las generaciones futuras, manteniendo el equilibrio del desarrollo económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social. (ONU, 2017)

En una de sus hojas de ruta las Naciones Unidas aprobaron la Agenda 2030, que contiene los propósitos del Desarrollo Sostenible, una serie de medidas para desterrar la pobreza, resguardar el planeta y garantizar el bienestar global de las personas. (ONU, 2017)

Esta hoja busca:

- Fortalecer la innovación e infraestructuras resilientes creando comunidades y ciudades capaces de producir y consumir de forma sostenible.
- Vigilar el medio ambiente lidiando con el cambio climático y protegiendo los océanos y ambientes terrestres.

- Favorecer la asistencia de los diferentes agentes sociales para estimular un ambiente de paz y desarrollo sostenible.

#### **A. Minería y desarrollo sostenible**

“Se podrá realizar una minería sostenible, cómo relacionar la minería con el desarrollo sostenible, si la minería es extracción y agotamiento de los recursos mineros que no benefician a la población y con grandes impactos negativos al medio ambiente.”. (Ruiz Soto, 2010)

¿La minería es sostenible? Por definición es la extracción de recursos mineros no renovables y esto niega la posibilidad de una minería sostenible. Esto no representa que no se pueda realizar diversas formas de hacer minería, que tenga un gran impacto, por su secuela destructiva sobre el ambiente social y natural, y otra de bajo impacto. Cosa diferente a la contaminación ambiental por el proceso de extracción que se hace con los recursos económicos que brotan de la actividad minera y cómo éstos se relacionan o no con actividades de desarrollo humano sostenible. (Ruiz Soto, 2010)

### **2.2.17. MARCO FILOSOFICO**

Se relaciona con el estudio del hombre-naturaleza que despierta el interés de filósofos y científicos en el mundo. A esto se adiciona el aumento de las alteraciones que vienen originando las actividades del hombre sobre la naturaleza.

#### **A. La filosofía de las ciencias naturales**

(Mauri, 2018) Al respecto manifiesta, “Tiene por esencia el estudio de la naturaleza siguiendo la particularidad del método científico referenciado como método



experimental, experimenta los aspectos físicos, y no los aspectos humanos del mundo.

Las ciencias naturales, se fundamenta en el razonamiento lógico y en la metodología de las ciencias formales, particularmente en las matemáticas, que no tiene relación directa con la naturaleza (o incluso inexistente)”.

Toma en cuenta que el objetivo de toda ciencia es explicar y predecir en base a la ley del conocimiento; para tal fin es necesario descubrir las leyes naturales y construir las teorías, que tienen que ser validadas aplicando un método de comprobación empírica. (Gutierrez Asqui, 2012), p 10-12).

(Tomas de Aquino, 1936), manifiesta, que la naturaleza es la que proporciona todos los elementos indispensables y indaga sobre los niveles de existencia de inicios del ser humano y la relación hombre – Dios, (pág. 87).

Con el Renacimiento se ocasiona el apogeo de las ciencias y del interés del hombre por conocer la naturaleza, ahí comienza una relación hombre naturaleza vista como un antagonismo en la medida que esta es concebida como objeto de transformación y dominación en vínculo directo con el nivel de conocimiento.

La doctora (Columbié Puig), plantea un estudio relacionando hombre-naturaleza teniendo en cuenta la cultura ambiental del hombre en el contexto complicado de la actividad minera de Moa dentro de la comunidad “El Pesquero” donde valora la

intervención de diferentes instancias en la solución de las problemáticas de ese contexto donde conocimiento y comportamiento son importantes (págs. 5-6).

El estudio del desarrollo filosófico sobre la naturaleza y el hombre, se conserva como continuidad un hombre que interactúa con la naturaleza, que progresa de una forma espontánea hasta lo más complicado de los planes y programas que contienen su transformación. El hombre visto como idóneo de someter la naturaleza se comporta como un rasgo general. Sin embargo, dicha relación no constituye un proceso lineal, sino que, por el contrario, varía en función de las interpretaciones que se hacen los filósofos de esta problemática y la incorporación de conceptos y categorías acordes al contexto histórico-social en el que se efectúan los análisis. Lo mencionado nos admite presentar algunas directrices en el análisis de la relación hombre - naturaleza internamente de un contexto amplio:

**a) Reflexión del trato hombre-naturaleza tomando como base aspectos del conocimiento.**

El hombre valora sus limitaciones en la utilización de determinados recursos naturales y el riesgo que pueda ocasionar algunas tecnologías contaminantes, entre las que se encuentran: el trabajo con metales y la producción de cemento, entre otras. Para ello se debe valorar y orientar una correcta cosmovisión hacia la naturaleza con la responsabilidad moral ante ésta.

La importancia ética del trato del hombre consigo mismo y el entendimiento de la naturaleza, del compromiso ante ésta, precisar del dónde, a quién y cómo hacer el bien, por lo que se requiere de la responsabilidad colectiva, la cual atribuye al sujeto un lugar importante no sólo por lo que se propone realizar,

sino también por los resultados y consecuencias de su acción en el objeto – naturaleza.

**b) Tendencia a la caracterización de la situación del deterioro de la naturaleza.**

Las últimas investigaciones ejecutadas en el área de la filosofía en Cuba de 1997 a 2012 nos dan a entender que el hombre trata de conocer determinadas situaciones en que la naturaleza genera diversos fenómenos catastróficos que han puesto en peligro la vida del hombre. Se trata de desplegar acciones con responsabilidad ante el ámbito natural donde se integren aspectos educativos, culturales y sociales a partir de la indiscutible relación que hay entre el hombre y la naturaleza, dada a la dependencia y correspondencia de causas y efectos que tiene el ser humano sobre la naturaleza (Ortiz, 2012).

**Las teorías científicas y las leyes sirven para realizar explicaciones y predicciones de hechos de la naturaleza.**

Según: Popper de las recientes teorías penden el desarrollo del mundo y estas deben ser: escuetos, unificadoras (en la razón de que tengan un gran dominio de explicar), contrastables independientemente, empíricamente refutables. Es más, una buena teoría debe involucrar, sin rodeos, nuevos pronosticas sobre la naturaleza.

*Demócrito (aprox. 460-370 a. de C.)* Coincidió con los filósofos jóvenes en que los fenómenos de la naturaleza no se debían a que las cosas realmente “cambiaran”. conjeturaba, consecuentemente, que todo tenía que estar construido por unas partículas pequeñas e invisibles, cada una de ellas eterna e inalterable (Gaarder, 1977).

A estas pequeñas piezas Demócrito las llamó átomos. El vocablo “átomo” simboliza “indivisible”. Para Demócrito era de gran importancia poder aseverar que de eso de lo íntegro del acto no podía fraccionarse en partes más pequeñas.

Coincidía con Heráclito en que el íntegro de la naturaleza “fluye”. Las formas van y vienen. Pero detrás de todo lo que fluye, se hallan algunos entes eternos e inalterables que no fluyen. A estos entes es la que Demócrito llamó átomos. (Gaarder, 1977)

(Martí, 1975), Desarrolla un análisis de la naturaleza y el hombre inicializándose de una conceptualización general de la naturaleza y de la necesidad del hombre de cuidarla y protegerla. Con un razonamiento científico formuló además la utilización de la hulla y el carbón como combustibles, su probable desabastecimiento, y con ello declara la responsabilidad que tiene el hombre de estudiar y prever su agotamiento (pág. 278)

En conclusión, la relación hombre – naturaleza, tiene su origen desde la existencia del ser humano sobre la tierra, esta como proveedora a alimentos, posteriormente ante la falta de estos, se llega al uso de la tierra mediante la agricultura transformándola. Hasta ese momento no se incluía los compuestos químicos, solo se utilizaba el abono natural para fertilizar las tierras. Ya en el siglo XVI a XVII se introdujo la tecnología, la necesidad del hombre se incrementó, por tener cierta comodidad en su vida diaria, y comenzó la explotación de la tierra y la necesidad del metal para transformarla sin el pleno conocimiento del impacto que generaba en la naturaleza por los desechos ocasionados por los residuos metálicos que

ocasionaban. Hoy en pleno siglo XXI ante el deterioro de la naturaleza lo que se indaga es concientizar al hombre en temas determinadas contexto en las que la naturaleza emprende a ser utilizada para desencadenar contextos que han puesto en peligro la vida del ser humano. Se trata de desplegar acciones con responsabilidad ante el ámbito natural donde se integren aspectos educativos, culturales y sociales a partir de la indiscutible relación existente entre el hombre y la naturaleza, transmitida la dependencia y correspondencia de causas y efectos que tiene el hombre sobre la naturaleza (Ortiz, 2012) (págs. 109-110)

#### **2.2.18. MARCO LEGAL**

Basados en leyes, Decretos Supremos, Resoluciones, Reglamentos y Protocolos aprobados por el MINEM, MINAM, MINCU ante INC, DIGESA. La administración por el GORE y la Región de Pasco a través del DREM – Pasco, DREP – Pasco, se considera:

- La Constitución Política del Perú. Capítulo II. Del Ambiente y los Recursos Naturales.
- Reglamento de Protección Ambiental para Actividades Minera aprobado a través del D.S. 016-93-EM modificado por D.S. 059-93-EM
- Reglamento Ambiental para las Actividades de Exploración Minera (D.S. 038-98-EM) derogado por Art. 2 del D.S. 020-2008-EM.
- Modificación del Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades Minero Metalúrgicas aprobado por D.S N° 058-99-EM.
- Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM, aprueba los Niveles Máximos Permisibles de Emisión de Efluentes Líquidos para la actividad minero metalúrgicas.

- Resolución Ministerial N° 315-96 EM/VMM, aprueba los Niveles Máximos permisibles de Emisiones de gases y partículas para las actividades minero metalúrgicas.
- Ley 29338 Ley de Recursos Hídricos. Marzo 2009
- Ley que regula los Pasivos Ambientales de la Actividad Minera. Ley N° 28271.
- Decreto legislativo 1105. Establecen disposiciones para el proceso de formalización de las actividades mineras. Abril 2012
- Resolución Directoral N° 440-2004-MEM/AAM, Aprobación de formatos de declaración de impacto Ambiental.
- D.S. 046-2004-MEM/AAM, Establecen disposiciones para la prórroga de plazos para el cumplimiento de Proyectos Medioambientales Específicos.
- D.S. 001-2013-MINAM, Adecuan plazos del instrumento de gestión ambiental correctivo a los establecidos en el proceso de formalización. Febrero 2013.
- D.S. N° 033-2005-EM, Reglamento para el cierre de minas, aprobado el 15 de agosto 2005.
- D.S. N° 059-005-EM, Aprueban Reglamento a pasivos ambientales de la actividad minera.
- Ley N° 28526, Ley que modifica los artículos 5,6,7 y 8, la primera disposición complementaria y final de la Ley N° 28271, ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera, y le añade una tercera disposición complementaria y final.
- Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental del aire D.S. N° 074-2001-PCM
- Decreto Supremo N° 014-2007-EM, Modifican Reglamento Ambiental para las Actividades de Exploración Minera, aprobado el 9 de marzo de 2007.

- Resolución Directoral N° 280-2007-EM/AAM Guía para la Evaluación de Impactos en la Calidad del Aire por Actividades Minero-Metalúrgicas
- Resolución Directoral N° 281-2007-EM/AAM Guía para la Evaluación de Impactos en la Calidad de las Aguas Superficiales por Actividades Minero-Metalúrgicas
- Resolución Directoral N° 282-2007-EM/AAM Guía para el Diseño de Coberturas de Depósitos de Residuos Mineros
- D.S N° 028-2008-EM.- Aprueban el Reglamento de Participación Ciudadana en el Subsector Minero R.M. N° 304-2008-MEM/DM.- Norma que regula el proceso de Participación Ciudadana en el Sub Sector Minero.
- Decreto Supremo N° 003-2009-EM, Modificación del Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera aprobado por D.S. N°-059- 2005-EM
- D.S. N° 005-2009-EM - Aprueban Reglamento de la Ley N° 27651 - Ley de Formalización y Promoción de la Pequeña Minería y la Minerva Artesanal
- Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones (MINAM)
- Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua (MINAM)
- Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional y otras medidas complementarias en Minería. (DS-023-2017-EM). Agosto 2017
- Ley General de Residuos Sólidos, Ley N° 27314. Marzo 2010
- DS-057-2004-PCM. Julio 2004. Reglamento de la Ley 27314.
- Ley General del Ambiente. Ley N° 28611. Octubre 2005
- DS-001-2009-AG, Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, Marzo 2010.
- 440-96-EM/DGM, Normas que Garantizan la Estabilidad de Depósitos de Relaves.
- RD-224-97-EM/DGM, Evaluación especial de la estabilidad física.

- RD-19-97-EM/DGAA, Estructura del Reporte de Estabilidad Física de Presas de Relaves.
- Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes del Depósito de Residuos Sólidos Provenientes de Actividades Mineras.
- Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros.
- Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves.
- Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas.
- Guía Ambiental de Manejo de aguas en Operaciones Minero-metalúrgicas.
- Guía Ambiental para el Abandono y Cierre de Minas.
- Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros.



### **III. MÉTODO**

#### **3.1. Tipo de Investigación**

El tipo de investigación es aplicativo; puesto que se realiza soluciones a problemas reales que afecta a la sociedad, en nuestro caso se da solución a la contaminación por relaves mineros por material particulado, recirculación de agua y contaminación de la napa freática al realizar la deposición de presas de relaves. En este sentido, (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014), manifiesta una investigación para ser catalogada como científica debe ser rigurosa, sistemática, estructurada, empírica y debe desarrollarse bajo estrictas normas de protocolo, no necesariamente rígidas, pero sí aceptadas como el norte de la investigación. “La clase de investigación cumple dos objetivos principales: a) generar conocimiento y teorías (investigación básica) y b) solucionar problemas (investigación aplicada)” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, pág. XXIV).

#### **Nivel de Investigación**

El presente estudio de investigación se desarrolla dentro de un nivel de investigación explicativa y correlacional, explicativa en razón a que se plantea como objetivo estudiar la influencia del espesamiento, floculación de relave en la obtención de pasta mineral, en una relación de causa-efecto. Según (Hernández Sampieri, 2014) “su utilidad se concentra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta o por qué se relacionan dos o más variable”. Correlacional en razón en que busca relacionar si la variable independiente tiene vinculación con la variable dependiente, en nuestro caso el Espesamiento, floculación estará relacionado con la obtención de pasta mineral. Según (Hernández Sampieri, 2014) “Este tipo de estudios tiene como finalidad conocer

la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular”. (p. 93)

### **Diseño de Investigación**

Según (Arias, 2012), “la investigación experimental se caracteriza fundamentalmente, por la manipulación y control de las variables o condiciones, que ejerce el investigador durante el experimento”

Según el enfoque de la investigación experimental se fundamenta en el enfoque explicativo. Según (Fernández Collado, 2014) “el enfoque explicativo está dirigido a contestar por las causas de los sucesos y fenómenos físicos o sociales”. Además, manifiesta “como su nombre lo indica, su utilidad se concentra en dar explicaciones por qué sucede un acontecimiento fenomenológico y en qué contexto se muestra o por qué se relaciona dos o más variables”.

El diseño de la investigación según su intención de los objetivos es experimental puro.



Se aplica el diseño factorial con punto central de diseño para investigar el total de las probables combinaciones de los parámetros puntos centrales de los factores en cada ensayo completo. (Babbie, 2014 y Wiersma y Jurs, 2008) afirma, “el diseño factorial consiste en que todos los parámetros o peculiaridades de cada variable independiente son tomados en combinación con todos los parámetros o modalidades de las otras variables independientes”

Para determinar la cantidad de pruebas experimentales se aplicará el diseño Factorial  $2^k$ .

$$N=2^k$$

Donde:

N: número de prueba

k: número de factores

### 3.2. Población y Muestra

#### Población

La población en estudio está constituida por el tonelaje de relave que sale del tratamiento del mineral polimetálico (Cu, Pb y Zn) en un radio de concentración de 9 toneladas de mineral beneficiado en la planta cuya capacidad es de 30 TMD.

#### Muestra

La muestra lo constituye el caudal de relave que ingresa al tanque de acondicionamiento que es un promedio de 2.33 l/min, que es muestreado cada 20 minutos hasta conseguir un volumen de 36 litros. Muestra que sirve para determinar la gravedad específica, análisis granulométrico y pruebas de sedimentación en probetas con y sin floculante.

### 3.3. Operacionalización de variables

Tabla 4

*Operacionalización de variables*

VARIABLES	Dimensión	Indicadores	Tipo
V.I. Espesamiento, floculación de relave	Densidad de pulpa (%S)	- Distribución de tamaño de partícula - % de Sólidos	Cuantitativo
	Dosificación de floculante	- Tipo de floculante - g/T Floculante	Cuantitativo

	Tiempo de espesamiento en formación de nivel de cama	- Altura de cama - Tiempo de residencia - % Sólidos en descarga	Cuantitativo
<b>V.D Obtención de pasta</b>	% S en la Pasta	- % de abatimiento	Cuantitativo
		- $\theta_R$ Angulo de reposo	Cuantitativo

### 3.4. Instrumentos

Según (Fernández Collado, 2014), Se refiere a cualquier tipo de estrategia que utiliza el investigador; para adquirir la indagación y data relacionados con el tema de estudio. Por medio de esta herramienta, el científico obtiene la data resumida que lo utilizará e interpretará en conformidad con el Marco Teórico.

Los instrumentos que se utilizaron para el desarrollo del trabajo de campo se adaptaron de estudios realizados por (Ames Ramírez, 2012) y (Dearaujo C, 2006) (ver anexo 2) a continuación se menciona equipos e instrumentos de laboratorio utilizados:

- El densímetro, tamices de la serie Tyler, equipo espectrofotómetro de absorción, balanza electrónica, probetas, lunas de reloj, cronometro
- Lectura de muestras cuantitativas y cualitativas
- Cuaderno de apuntes

A continuación, presentamos algunas tablas utilizadas en la toma de datos de las pruebas realizadas en campo.

Tabla 5  
Toma de muestra de la alimentación

N° prueba	Flujo	Densidad inicial	% Solidos	Tratamientos solidos
	m <sup>3</sup> /L	Ton/m <sup>3</sup>	%S	Ton/min
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
Promedio				

Esta tabla 5 nos servirá para tomar muestra de la alimentación de pulpa de relave al cono sedimentador y en la tabla 6 registraremos los datos de los factores influyentes en la obtención de pasta

Tabla 6  
Diseño experimental para la obtención de pasta

N° PRUEBAS	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	CALIDAD DE PASTA (% s)
1	-	-	-	+	+	+	-	
2	+	-	-	-	-	+	+	
3	-	+	-	-	+	-	+	
4	+	+	-	+	-	-	-	
5	-	-	+	+	-	-	+	
6	+	-	+	-	+	-	-	
7	-	+	+	-	-	+	-	
8	+	+	+	+	+	+	+	
9	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	

### 3.5. Procedimiento

Se tomó muestras de relave para determinar:

- el flujo de caudal
- densidad
- gravedad específica del mineral
- Características del mineral
- Análisis granulométrico

Todos estos datos obtenidos nos sirven para ver el comportamiento físico y químico del relave.

Seguidamente se realizaron pruebas de sedimentación sin floculante y con diferentes floculantes (PHP 30, MT 4219 y AR 5215) para ver el comportamiento de cada uno de ellos, variando el porcentaje de sólidos y seleccionar el mejor floculante que acelera la sedimentación.

Y con el floculante seleccionado se realiza las pruebas de sedimentación a nivel de pilotaje aplicando el diseño factorial con los factores elegidos como: densidad de pulpa, dosificación de floculante y tiempo de residencia. Los datos obtenidos se alimentan al paquete estadístico Statgraphics Plus versión XVI, y se realiza el análisis de factores influyentes, gráficos de efectos e interacciones, análisis de variancia, modelo matemático del fenómeno investigado y gráficos de superficie respuesta.

Se utilizó herramientas de estadísticas descriptivas tales como la obtención de la media de respuestas del grupo de observaciones sujeto a estudio y el análisis gráfico aplicando el software Microsoft Excel.

### **3.6. Análisis de datos**

En el estudio del trabajo, el análisis se hizo en función de los datos cualitativos y cuantitativos de las tablas de sedimentación, tablas de pruebas de pasta, figuras de sedimentación y figuras de relaciones de variables.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Actividades de Campo

#### Toma de muestra del relave

Se tomaron muestra de relave a intervalos de 20 min en dos baldes, con un muestreador adecuado y seguidamente se pesó la muestra en un densímetro, registrándose la densidad y porcentaje de sólidos y caudal. Ver tabla 5.

Tabla 7  
*Variable de alimentación de pulpa*

<b>N° Prueba</b>	<b>Flujo L/min</b>	<b>Densidad inicial (g/L)</b>	<b>%S</b>	<b>Tratamiento Ton/min</b>
<b>1</b>	2,335	1 070	9,51	237,60
<b>2</b>	2,271	1 090	12,01	235,41
<b>3</b>	2,426	1 090	12,01	251,48
<b>4</b>	2,455	1 110	14,14	256,82
<b>5</b>	2,437	1 080	10,77	250,30
<b>6</b>	2,246	1 070	9,51	228,55
<b>7</b>	2,335	1 100	13,22	244,26
<b>8</b>	2,275	1 120	15,58	242,31
<b>9</b>	2,342	1 090	12,01	242,77
<b>10</b>	2,347	1 090	12,01	243,29
<b>11</b>	2,331	1 070	9,51	237,20
<b>12</b>	2,278	1 130	16,73	244,80
<b>13</b>	2,354	1 090	12,01	244,01
<b>14</b>	2,282	1 100	13,22	238,72
<b>15</b>	2,283	1 120	15,58	243,17
<b>16</b>	2,328	1 070	9,10	236,89
<b>17</b>	2,356	1 120	15,58	250,94
<b>18</b>	2,402	1 080	10,77	246,70
<b>Promedio</b>	<b>2,337</b>	<b>1 093</b>	<b>12,42</b>	<b>243,06</b>

Datos obtenidos en el laboratorio (Elaboración propia)

En la tabla 7 se observa la variación de flujo del relave de 2,271 l/min a 2,437 l/min que no tiene concordancia con la densidad de relave que varía en el rango de 1070 g/l a 1 120 g/l, siendo el promedio de 1 093 g/t que tiene 12,42 % de sólidos. Esto es por la variación de la alimentación al proceso.



## Gravedad Específica

La gravedad específica de la muestra de mineral se determinó por el método de la fiola.

Se utilizó una balanza electrónica, luna de reloj, fiola, pizeta y una espátula. En la tabla siguiente tenemos los datos obtenidos.

Tabla 8  
*Gravedad específica de la muestra*

Muestra	Peso gr	Peso de fiola	Peso F+M	Peso agua F+H <sub>2</sub> O	Peso (F+Agua+M)	G. Esp
Relave	25	82,9	107,9	282,6	300,3	3,28
Relave	15	83,0	98,0	282,6	292,9	3,23
<b>Promedio</b>						<b>3,25</b>

Datos obtenidos en el laboratorio (Elaboración propia)

La tabla 8 evidencia el promedio de la gravedad específica del relave en 3,25 g/cm<sup>3</sup>, que nos da a entender que el relave es pesado.

### 4.1.1. Características del Mineral

Se identificó la composición química de la muestra de relave, que se realizó en el laboratorio químico Quimbol Chemical S.A.C. del distrito de Huariaca, perteneciente a la Región de Pasco. A continuación, presentamos el reporte en la tabla 9.

Tabla 9  
*Resultado del análisis químico*

ENSAYE QUIMICO DEL RELAVE								
	SiO <sub>2</sub>	Ag (Oz/tm)	%Cu	%Zn	%Pb	%Fe	%Mn	%S
<b>M-001</b>	52,98	0,45	0,11	5,58	0,10	23,78	0,39	1,23

Fuente: Laboratorio Quimbol Chemical S.A.C.

La tabla 9 reporta, que el relave está constituido mayormente por, 52,98 % de sílice, 23,78 % de hierro, 5,58 % de zinc y 1,23 % de azufre, siendo, en porcentajes menores el Manganeseo, Cobre, Plomo y plata con 0,45 Oz/t.

#### 4.1.2. Análisis Granulométrico de Relave

El análisis granulométrico determina el contenido de partículas finas que tiene la muestra de mineral, para lo cual no debe contener menos del 15% inferior a 20  $\mu\text{m}$ .

Tabla 10  
Análisis granulométrico del relave

MALLA	ABERTURA (micrones)	PESO (gramos)	% PESO	ACUMULADO (+)	PASANTE (-)
# 70	212	41,8	8,36	8,36	91,64
# 100	149	51,6	10,31	18,67	81,33
# 140	104	10,1	21,03	39,70	60,30
# 200	74	131,0	26,19	65,89	34,11
# 270	53	110,7	22,13	88,02	11,98
# 325	44	29,6	5,92	93,94	6,06
# 400	37	17,9	3,58	97,52	2,48
# - 400	--	12,4	2,48	100,00	0,00
		500,0	100,00	D <sub>50</sub>	90
				D <sub>80</sub>	145

Fuente: Elaboración propia

La tabla 10 evidencia la distribución granulométrica del relave, encontrándose que el 34,11 % se encuentran por debajo de 74  $\mu\text{m}$  y 65,89 % se encuentran por encima de 74  $\mu\text{m}$ , parámetro que nos da a entender que el relave tiene poco contenido de partículas finas, y es favorable para pastas mineras.

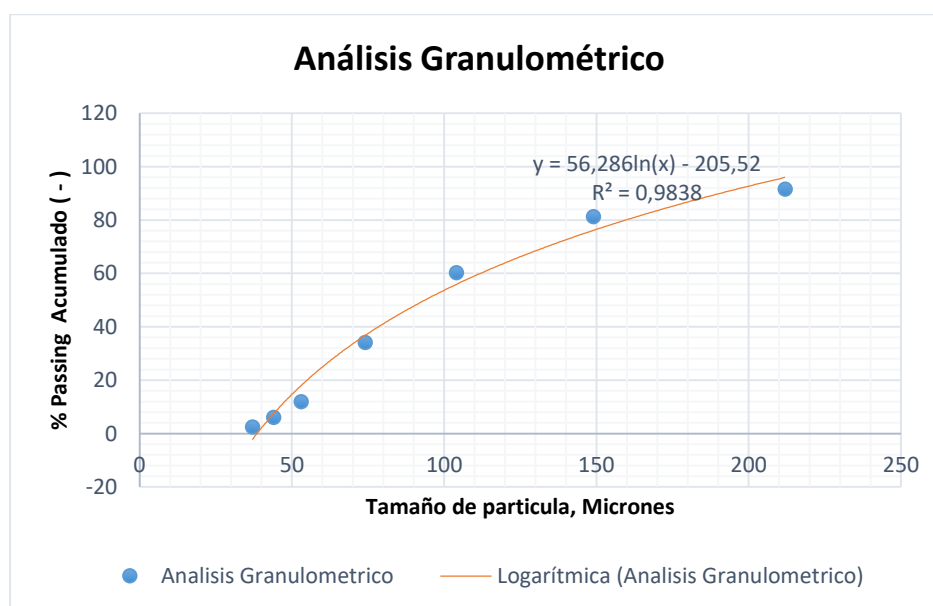


Figura 18: Distribución del tamaño de partículas de la muestra

La figura 18 demuestra la tendencia del comportamiento de la división del tamaño de partículas del relave, durante la prueba experimental, con un coeficiente de determinación de 0,9199.

#### 4.1.3. Prueba de Sedimentación Sin Floculante

Esta prueba consistió en realizar la prueba de sedimentación con pulpa de relave (12 % Sólidos) sin la adición de floculante. Los datos en tabla 11.

Tabla 11  
*Resultado de mediciones de sedimentación*

<b>SIN FLOCULANTE</b>	
<b>Tiempo (min)</b>	<b>Altura (cm)</b>
<b>0</b>	35,70
<b>1</b>	34,00
<b>2</b>	32,80
<b>3</b>	31,30
<b>4</b>	29,60
<b>5</b>	28,00
<b>6</b>	26,45
<b>7</b>	24,91
<b>8</b>	23,23
<b>9</b>	21,63
<b>10</b>	20,10
<b>12</b>	16,56
<b>14</b>	13,32
<b>16</b>	10,25
<b>18</b>	8,80
<b>20</b>	7,65
<b>22</b>	6,87
<b>24</b>	6,37
<b>26</b>	5,91
<b>28</b>	5,53
<b>30</b>	5,30
<b>35</b>	5,10
<b>40</b>	4,96
<b>45</b>	4,77
<b>50</b>	4,59
<b>55</b>	4,40
<b>60</b>	4,21
<b>65</b>	4,15

Fuente: Elaboración propia

La tabla 11 demuestra la velocidad de sedimentación de las partículas, sin la adición de floculante, en los primeros minutos, la velocidad de sedimentación es más rápida variando casi en un centímetro y medio en promedio la altura, hasta el minuto 10, de allí para adelante la sedimentación se realiza en forma más lenta, variando el tiempo cada 2 minutos hasta el minuto 18, punto crítico de compactación donde la sedimentación se realiza de forma más lenta alcanzando una altura de cama de 4,15 cm en 65 minutos.

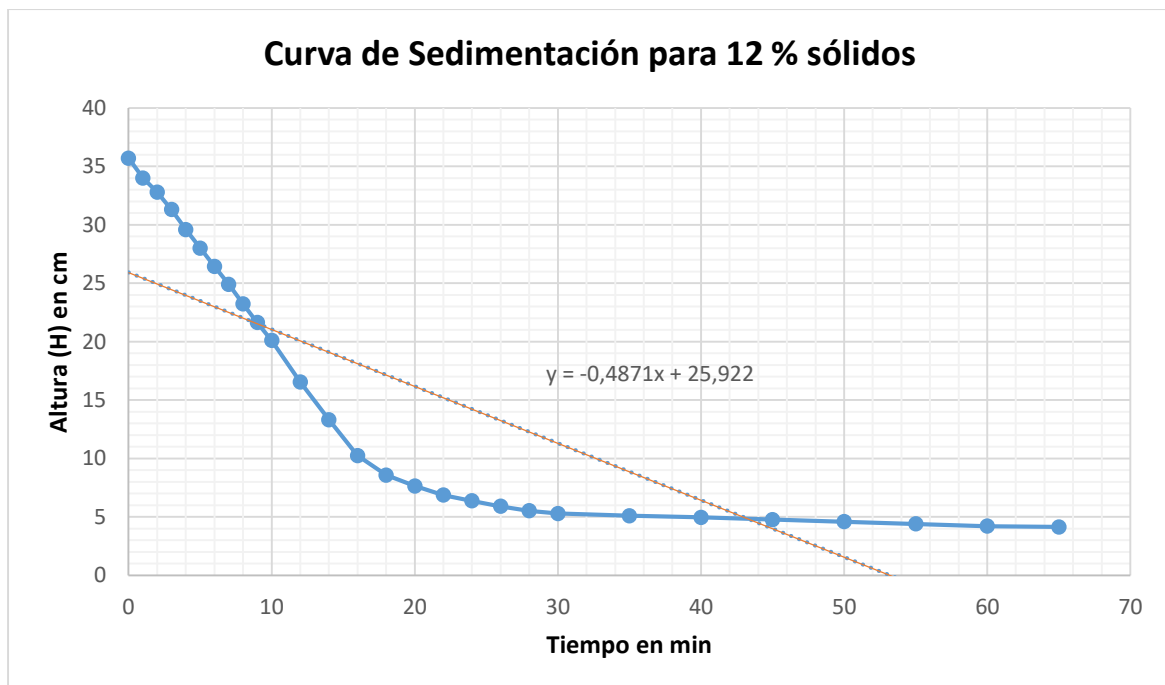


Figura 19: Velocidad de sedimentación de la pulpa de relave, Fuente: Elaboración propia

En la figura 19 se observa el inicio del punto crítico de compactación, a partir de los 18 minutos, hasta alcanzar una altura de 4,15 cm en 65 minutos.

#### 4.1.4. Prueba de Selección de Floculante

Debido a que la predicción teórica es imposible de qué tipo de floculante sintético es el más adecuado para una suspensión en particular, la selección de floculante se realiza por un proceso empírico, hecho en base a la experiencia.

El criterio de selección del floculante óptimo se basa en la determinación de la velocidad de sedimentación de distintos polímeros. Sobre una muestra representativa a sedimentar. Aquel floculante que presente la velocidad más alta y una clarificación limpia es considerada óptimo. (Palli, 2016. p. 65)

A continuación, en la tabla 12 se presenta las características físicas y químicas que se mantuvieron durante las pruebas de sedimentación en la selección de floculante.

Tabla 12

*Condiciones físicas y químicas del relave*

<b>Descripción</b>	
<b>Tonelaje</b>	0,083 TMD
<b>Densidad de pulpa</b>	1 090 g/l
<b>% Solidos</b>	12,0 %
<b>Gravedad específica</b>	3,2
<b>Temperatura</b>	12 °C
<b>pH</b>	11
<b>Dosificación de floculante</b>	20 - 30 g/t
<b>Concentración</b>	0,025 %

Elaboración propia

Se seleccionó los floculantes, que en gran parte se utiliza en la minería peruana para la sedimentación de partículas finas de concentrados metálicos y relaves. Los floculantes seleccionados fueron: PHP30, MT 4219 y AR 5215

Se preparó los floculantes a una concentración de 0.1% y se adicionó 1 cc cada tipo de floculante a todos los volúmenes de relave contenidos en las probetas, seguidamente se agitó cada uno de ellos y se procedió a tomar los datos de sedimentación (t vs h).

La tabla 13 evidencia las velocidades de sedimentación con los floculantes PHP30, MT 4219 y AR 5215, y el punto crítico de compactación inicia a los 7,20 min, alcanzando una altura de nivel cama de 3,43 cm con el floculante PHP30, seguido del

AR 5215 con 3,70 cm y MT 4219 con 3,90 cm. La velocidad de sedimentación con el MT 4219 es más rápida, con un nivel de camas mayor que el AR 5215.

Tabla 13

*Datos de sedimentación de diferentes floculantes*

<b>Tiempo</b>	<b>PHP 30</b>	<b>MT 4219</b>	<b>AR 5215</b>
<b>(min)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>
<b>0</b>	35,70	35,70	35,70
<b>1</b>	28,54	27,12	16,00
<b>2</b>	20,07	18,25	9,30
<b>3</b>	9,06	10,30	7,02
<b>4</b>	7,20	8,7	6,27
<b>5</b>	6,71	6,83	5,81
<b>6</b>	6,31	6,51	5,40
<b>7</b>	6,00	6,24	5,13
<b>8</b>	5,79	6,02	4,91
<b>9</b>	5,58	5,82	4,76
<b>10</b>	5,39	5,60	4,69
<b>12</b>	5,06	5,18	4,57
<b>14</b>	4,79	5,07	4,47
<b>16</b>	4,55	4,89	4,38
<b>18</b>	4,41	4,74	4,29
<b>20</b>	4,31	4,58	4,20
<b>22</b>	4,21	4,45	4,15
<b>24</b>	4,13	4,34	4,10
<b>26</b>	4,01	4,22	4,04
<b>28</b>	3,95	4,14	3,99
<b>30</b>	3,90	4,08	3,93
<b>35</b>	3,77	3,98	3,81
<b>40</b>	3,64	3,96	3,70
<b>45</b>	3,51	3,93	-
<b>50</b>	3,48	3,90	-
<b>55</b>	3,43	3,88	-

Fuente: Datos de laboratorio

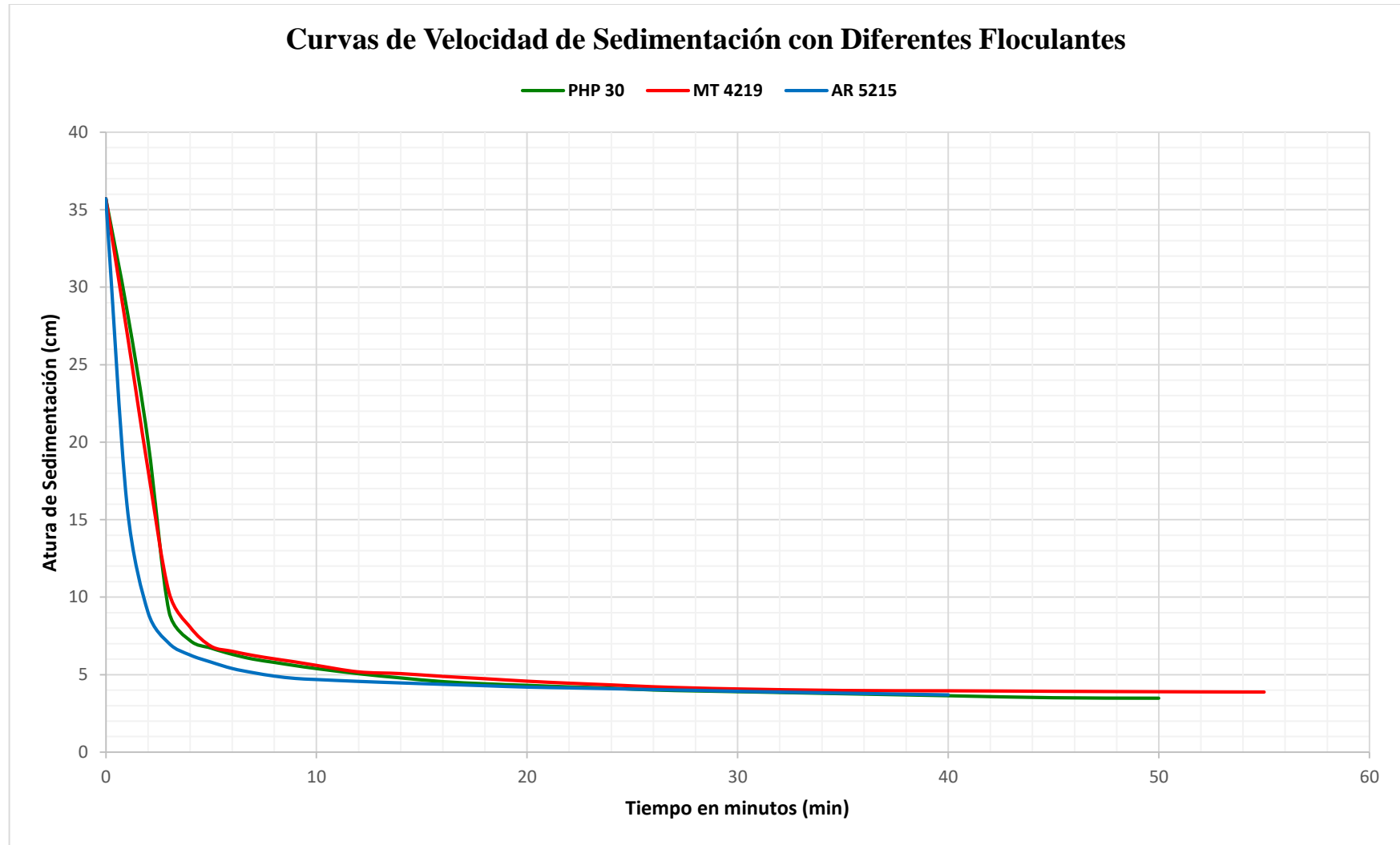


Figura 20: Curva de sedimentación desplazamiento vs tiempo (Elaboración propia)

En la figura 20 se observa las curvas de sedimentación con los floculantes seleccionados (PHP 30, MT 4219 y AR 5215). Se preparó cada tipo de floculante a 0,1 % de concentración y se adicionó 1 cc a cada uno de ellos. El floculante no ionio escogido para el espesamiento del relave fue el PHP 30, por presentar una mejor velocidad de sedimentación y un nivel de compactación más bajo en un tiempo de 50 minutos.

#### 4.1.5. Determinación de la densidad de sedimentación

Para demostrar la hipótesis planteada se realizó pruebas de sedimentación en probetas graduadas de 1000 cc. Estas pruebas consistieron en preparar relave con 12, 18 y 25 % de sólidos para determinar el % de sólidos de trabajo a nivel de planta piloto. En la tabla 14 presentamos las condiciones físicas del relave.

Tabla 14  
*Condiciones Físicas de Relave*

Descripción	Relave para 1000 cc de pulpa		
	Ge=3.2		
Densidad (g/T)	1 090	1 150	1 210
%S	12 %	18 %	25 %
Peso Mineral (g)	130,9	218,18	305.45
Volumen de H <sub>2</sub> O (L)	0,959	0,932	0,904

Elaboración propia

La tabla 14 evidencia las condiciones físicas del relave, que serán sometidos a las pruebas de sedimentación. La primera prueba se realiza a una densidad de 1 090 g/t, siendo su porcentaje de sólidos 12 %, cuyo peso de mineral es 130,9 g, y volumen de agua que se adiciona es de 0,959 L.

Se corrió pruebas con las tres muestras con dosificaciones de floculante 0,025%, la selección consistió en determinar el % de sólidos, que sedimenta a más rápido.



Tabla 15  
*Prueba de la densidad (%S) en la sedimentación*

<b>Dosis de Floculante PHP 30= 0.025%</b>			
<b>Para 25 g/T</b>			
<b>Tiempo min</b>	<b>12 % Sólidos</b>	<b>18 % Sólidos</b>	<b>25 % Sólidos</b>
<b>0</b>	34,00	34,00	34,00
<b>1</b>	20,00	24,40	32,30
<b>2</b>	11,20	18,70	30,40
<b>3</b>	9,60	16,40	28,80
<b>4</b>	8,80	15,00	27,40
<b>5</b>	8,20	14,10	25,80
<b>6</b>	7,70	13,40	24,40
<b>7</b>	7,30	12,80	22,80
<b>8</b>	7,10	12,40	21,50
<b>9</b>	6,80	11,90	20,70
<b>10</b>	6,60	11,60	19,60
<b>11</b>	6,40	11,30	18,70
<b>12</b>	6,20	11,00	18,30
<b>13</b>	6,00	10,75	17,80
<b>14</b>	5,90	10,50	17,40
<b>15</b>	5,80	10,30	17,10
<b>16</b>	5,75	10,10	16,80
<b>17</b>	5,70	9,90	16,55
<b>18</b>	5,50	9,70	16,30
<b>19</b>	5,40	9,60	16,10
<b>20</b>	5,30	9,50	15,90
<b>22</b>	5,15	9,28	15,50
<b>24</b>	5,05	9,06	15,10
<b>26</b>	4,90	8,84	14,90
<b>28</b>	-	8,62	14,60
<b>30</b>	-	8,40	14,40
<b>35</b>	-	8,10	14,00
<b>40</b>	-	7,80	13,50
<b>45</b>	-	7,70	13,20
<b>50</b>	-	-	12,80
<b>55</b>	-	-	12,50
<b>60</b>	-	-	12,30

Fuente: Elaboración propia

La tabla 15 evidencia la velocidad de sedimentación con el floculante seleccionado PHP 30. La velocidad de sedimentación con el 12 % de sólidos es más rápida y alcanza una altura de cama de 4,90 a los 26 minutos, con 18 % de sólidos la

velocidad de sedimentación alcanza un nivel de cama de 7,70 cm en 45 minutos, con 25 % de sólidos la velocidad de sedimentación es más lenta, alcanzando un nivel de cama de 12,30 cm en 60 minutos. Esto se debe a que a menores porcentajes de sólidos en la sedimentación hay mayor movilidad en comparación que altas densidades que no favorecen a la sedimentación libre debido a que hay mayor resistencia de partículas en el asentamiento.

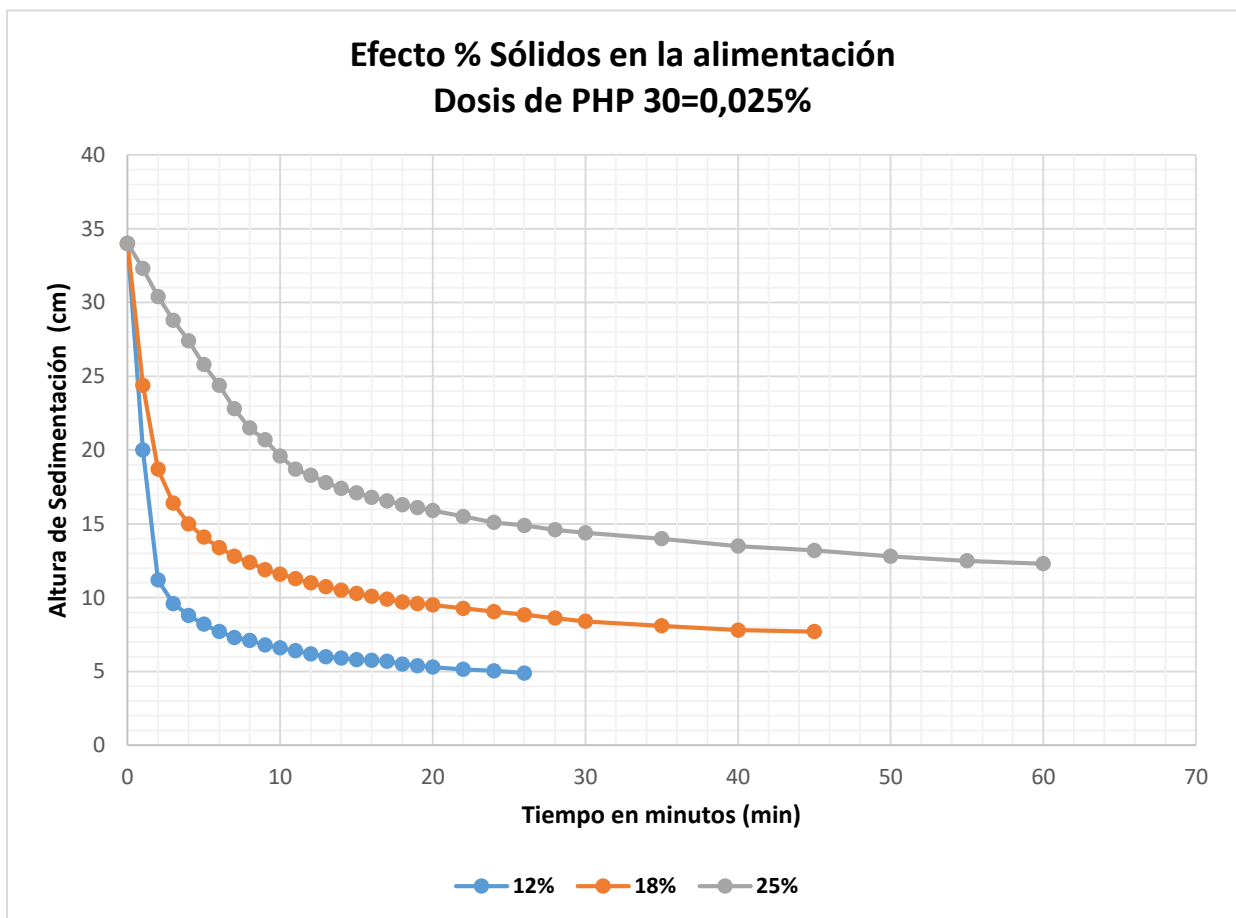


Figura 21: Curvas de sedimentación para 12, 18 y 25 % de sólidos en peso

La figura N° 21 muestra las curvas de sedimentación de los ensayos en la probeta 1000 cc para 12 %, 18 % y 25 % de sólidos con dosificaciones de floculante a 0,025% (2,5 g/T). El punto crítico de compresión para 12 % de sólidos es alcanzado por sobre

los 4 minutos. Al contrario, para 18% y 25% de sólidos el punto crítico de compresión esta sobre los 6 minutos.

Del análisis podemos afirmar que a menores densidades de alimentación y % de sólidos en peso, la sedimentación es más rápido y alcanza el punto crítico de compresión en menor tiempo.

#### 4.1.6. Dosificación de Floculante

Con la selección del floculante PHP 30, se procedió a encontrar la dosificación óptima en función a la velocidad de sedimentación, la prueba consistió en la dosificación de floculante con 20 g/T, 24 g/T y 30 g/T. ver foto 1.



Foto 1: Prueba de sedimentación con de floculantes

En tabla 16 observamos los resultados de las mediciones realizadas en el laboratorio. La que tiene una mayor velocidad de sedimentación es con 30 g/T alcanzando un nivel de cama de 4,90 cm en 10 minutos. Con las dosificaciones de 20 y 24 g/T las velocidades de sedimentación son más lenta, y alcanzan alturas de nivel de cama 5,14 cm y 5 cm en 16 minutos. La dosificación óptima, es el objetivo tal que

entregue los mejores resultados operativos en cuanto a velocidad de sedimentación. Teniendo el criterio que para la determinación de la dosificación óptima de floculante se fundamenta en la determinación de la velocidad de sedimentación de una muestra representativa de pulpa de relave a diferentes adiciones de floculante.

Tabla 16  
*Datos experimentales del PHP 30 a distintas dosificaciones*

<b>FLOCULANTE PHP 30</b>			
<b>Tiempo</b>	<b>0,025 %</b>	<b>0,035 %</b>	<b>0,05 %</b>
<b>min</b>	<b>20 g/T</b>	<b>24 g/T</b>	<b>30 g/T</b>
	<b>Altura</b>	<b>Altura</b>	<b>Altura</b>
	<b>Cm</b>	<b>cm</b>	<b>cm</b>
<b>0</b>	35.70	35.70	35.70
<b>1</b>	31.23	29.90	28.85
<b>2</b>	25.52	21.00	13.00
<b>3</b>	12.50	9.69	8.74
<b>4</b>	8.16	7.26	7.10
<b>5</b>	7.37	6.58	6.30
<b>6</b>	6.86	6.11	5.92
<b>7</b>	6.57	5.79	5.60
<b>8</b>	6.29	5.69	5.40
<b>9</b>	6.04	5.49	5.10
<b>10</b>	5.87	5.45	4.90
<b>12</b>	5.57	5.40	
<b>14</b>	5.34	5.30	
<b>16</b>	5.14	5.00	

En la figura 22 observamos, la curva que presenta un descenso veloz en función de los intervalos de tiempo graficados, es al que se añadió una dosificación de 30 g/T, además presenta un nivel de cama más baja que el resto de dosificaciones. Se asume que esta es el punto óptimo de dosificación de floculante. La dosificación con 30 g/T, se obtuvo una clarificación del rebose limpia con significativa presencia de sólidos y compactación del relave.

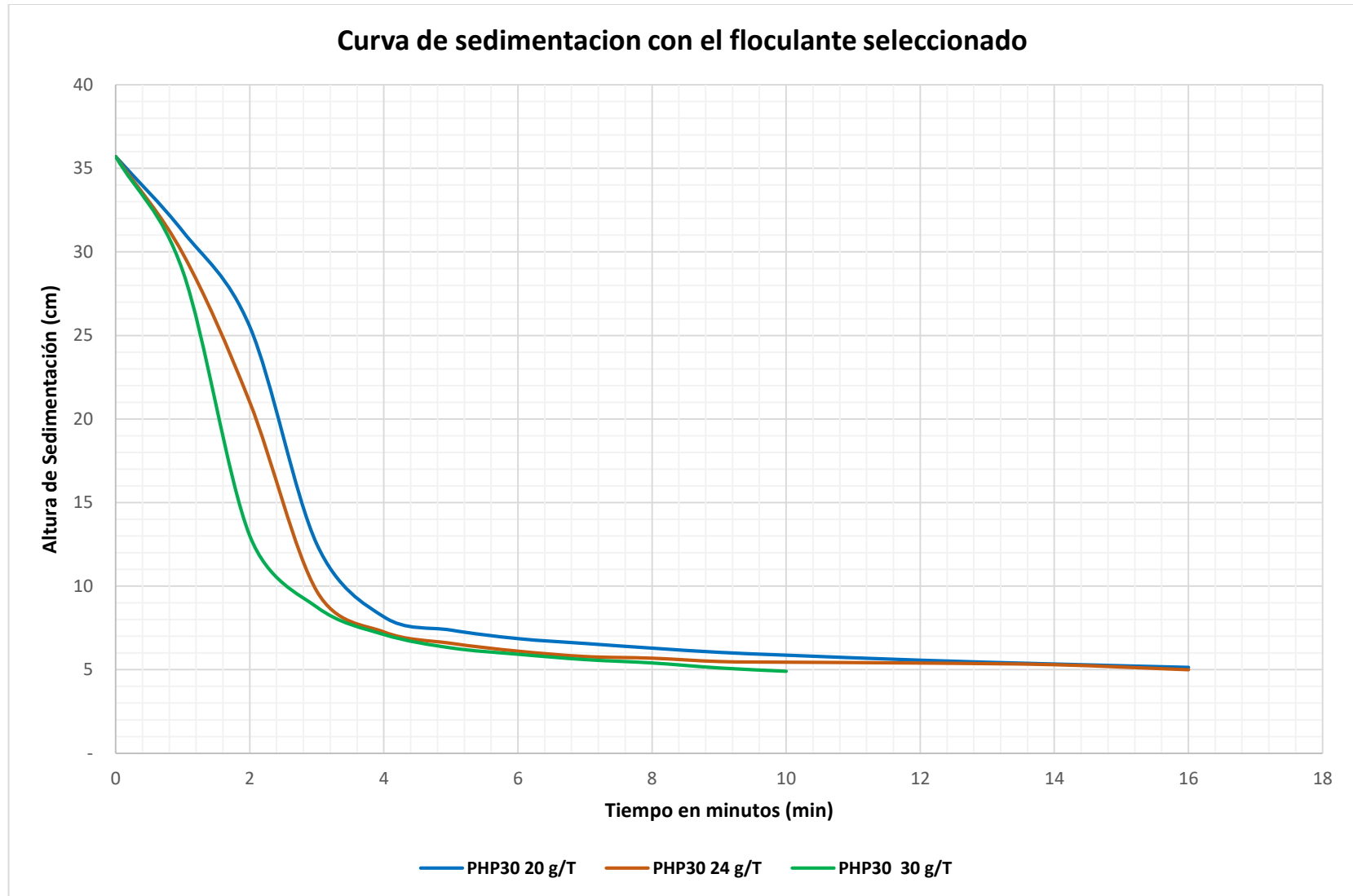


Figura 22: Velocidades de sedimentación con el floculante PHP 30

#### 4.1.7. Tiempo de Sedimentación en la Formación de Nivel de Cama.

El control de nivel de cama en el espesador de cono profundo se realizó con un sensor de nivel, que se puso al sedimentador de pilotaje. A continuación, en la figura 23 podemos ver el nivel de cama en el sedimentador de cono profundo.

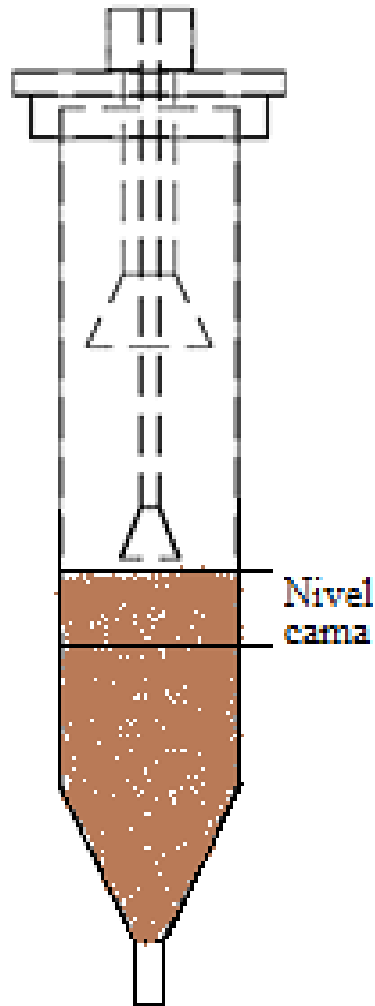


Figura 23: Nivel de cama en el cono de sedimentación

La tabla 17 evidencia los porcentajes de sólidos de las descargas de la pasta minera y el tiempo de residencia para que se produzca la concentración de sólidos en el cono sedimentador. Una buena compactación o concentración de sólidos se alcanza a los 80 minutos, tiempo donde es factible realizar la descarga de la pasta hasta una altura promedio de 57 cm, donde la concentración de sólidos baja a 1 690 g/l.

Tabla 17  
*Tiempo de residencia en el espesamiento*

N°	Densidad	% S	Nivel de Cama	Tiempo residencia
Prueba	Descarga		(cm)	min
1	2 020	73,45	64,00	80,00
2	2 010	73,00	63,77	79,05
3	1 960	71,00	62,76	74,87
4	1 910	69,00	61,84	70,69
6	1 860	67,00	60,92	66,81
7	1 810	65,00	60,00	63,35
8	1 770	63,00	59,23	60,02
9	1 730	61,00	58,46	56,70
10	1 690	59,00	57,72	53,37
12	1 650	57,00	56,99	50,04
13	1 610	55,00	56,35	46,71

Fuente: Elaboración propia

La figura 24 representa el tiempo de residencia en la formación del nivel de cama alcanzado en 45 a 80 minutos y los porcentajes de sólidos que se obtienen en la descarga controlando el nivel de cama.

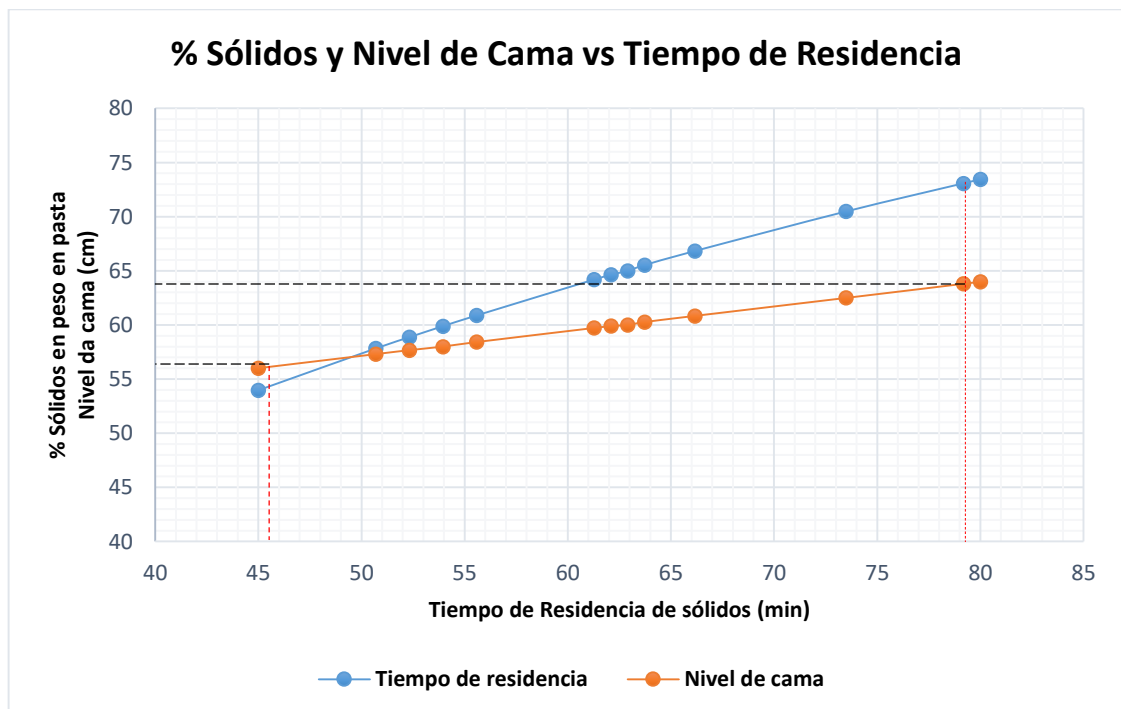


Figura 24: Tiempo de residencia de sólidos vs Atura de cama y % de sólidos

#### 4.1.8. Aplicación del Diseño Factorial con los Parámetros Seleccionados

De las pruebas realizadas en laboratorio, se seleccionó los niveles inferiores, superior y puntos centrales de los parámetros de las variables sometidos a la prueba experimental con el cono sedimentador a nivel de pilotaje.

En tabla 18 se evidencia los niveles de los parámetros de las variables a nivel de pilotaje. Las pruebas se realizan: Densidad de pulpa en la alimentación se prueba de 1 070 g/t a 1 110 g/t, tiempo de residencia de espesamiento de 45 min a 80 minutos y dosificación de floculante de 20 a 25 g/t.

Tabla 18  
Condición del diseño factorial

<b>Variables</b>	<b>(-)</b>	<b>(0)</b>	<b>(+)</b>
<b>X<sub>1</sub>: Densidad de pulpa (g/l)</b>	1 070	1 090	1 110
<b>X<sub>2</sub>: Tiempo Residencia Espesamiento (min)</b>	45	62,5	80
<b>X<sub>3</sub>: Floculante PHP30 g/t</b>	20	25	30

Aplicando el diseño factorial tenemos:

$$N=2^3= 8 \text{ pruebas}$$

A estas 8 pruebas aplicamos 2 pruebas con los puntos centrales de las cuales a continuación tenemos los resultados de las pruebas experimentales en la tabla 19.

Tabla 19  
*Diseño Factorial del relave en pasta*

<b>N°</b>	<b>X<sub>1</sub></b>	<b>X<sub>2</sub></b>	<b>X<sub>3</sub></b>	<b>X<sub>1</sub>X<sub>2</sub></b>	<b>X<sub>1</sub>X<sub>3</sub></b>	<b>X<sub>2</sub>X<sub>3</sub></b>	<b>X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>X<sub>3</sub></b>	<b>Y</b>
<b>PRUEBAS</b>								<b>(%S) PASTA</b>
<b>1</b>	-	-	-	+	+	+	-	53,54
<b>2</b>	+	-	-	-	-	+	+	56,73
<b>3</b>	-	+	-	-	+	-	+	69,87
<b>4</b>	+	+	-	+	-	-	-	64,55
<b>5</b>	-	-	+	+	-	-	+	58,93
<b>6</b>	+	-	+	-	+	-	-	68,45
<b>7</b>	-	+	+	-	-	+	-	73,83
<b>8</b>	+	+	+	+	+	+	+	72,68
<b>9</b>	0	0	0	0	0	0	0	69,57
<b>10</b>	0	0	0	0	0	0	0	69,33



Los datos obtenidos se alimentaron al programa estadístico STATGRAPHICS Centurión de cuyo tratamiento de datos se obtuvo la estimación de los efectos de cada uno de los factores, Análisis de variancia, coeficiente de regresión, resultados estimados y optimización, siendo este el resultado de dicho análisis.

Tabla 20  
*Efectos estimados para Pasta de Relave (%S)*

Efecto	Estimado	Int. Confianza	V.I.F.
Promedio	65,748	+/- 3,43125	
A: Densidad (%S)	1,56	+/- 7,6725	1,0
B: Tiempo de residencia espesamiento	10,82	+/- 7,6725	1,0
C: Dosificación de Floculante	7,30	+/- 7,6725	1,0
AB	-4,795	+/- 7,6725	1,0
AC	2,625	+/- 7,6725	1,0
BC	-1,255	+/- 7,6725	1,0

Intervalos de confianza del 95.0 de confianza (intervalos) basados en el error total con 3 g.l. (t = 3.18245)

La tabla 20 nos muestra el efecto de la densidad de alimentación (A) en 1,56, vemos que este valor es más bajo en comparación con los efectos del tiempo de residencia 10,82 y dosificación de floculante 7,30, lo que nos da a entender, que este factor no tiene influencia en la obtención de pasta en los rangos especificado de 1 070 a 1 110 g/t, por lo que es indiferente trabajar dentro de estos rangos de igual manera se obtiene la pasta. Evaluando dicho factor por el signo positivo podemos llegar a la conclusión, que dicho factor se encuentra trabajando con su nivel mínimo, debiendo ser maximizado hasta llegar al óptimo, con el propósito de tener una buena pasta de relave. También observamos que la dosificación de floculante (C) tiene un valor de 7,30, valor que nos sugiere, que este factor tiene influencia en la formación de pasta mineral, después del tiempo de residencia de espesamiento, por lo que se tiene que realizar un control de este parámetro. Evaluando dicho factor por el signo también es positivo, por lo que también se encuentra trabajando con su nivel mínimo, debiendo ser maximizado hasta llegar al óptimo. En cuanto al tiempo de residencia de espesamiento (B) observamos que tiene

un valor de 10,82, lo que nos da a entender que este factor tiene mayor influencia en la formación de pasta mineral por lo que se tiene que realizar un control minucioso. Evaluando dicho factor vemos que también es positivo y se encuentra trabajando con su nivel mínimo, debiendo ser maximizado hasta llegar al óptimo, para tener una buena pasta. Todo lo manifestado lo podemos corroborar en la figura 26 por la pendiente, la pendiente más pronunciada es tiempo de residencia de sedimentación, seguido de dosificación de floculante y densidad de alimentación.

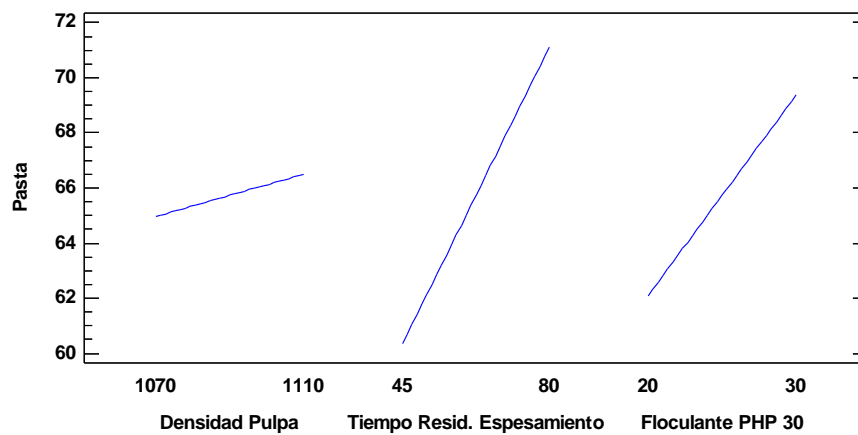


Figura 25: Efectos principales para pasta de relave

En cuanto a las interacciones en tabla 20 observamos que la interacción de densidad de alimentación con tiempo de residencia (AB) tienen un valor de -4,795, por el valor nos da a entender que no hay interacción, interpretando tenemos que la alimentación es indiferente del tiempo de residencia por lo que cada factor es independiente por lo que no están entrelazados ambos factores. Respecto a la interacción tiempo de residencia con dosificación de floculante (BC), también tiene un valor negativo -1,255, valor que nos da a entender que cada factor es independiente. En cuanto a la interacción densidad de alimentación con dosificación de floculante (AC) tiene un valor positivo de 2,625, valor que nos sugiere que la combinación de ambos factores si podría tener mínima influencia en la formación de pasta mineral. Lo manifestado lo podemos corroborar en la figura 26.

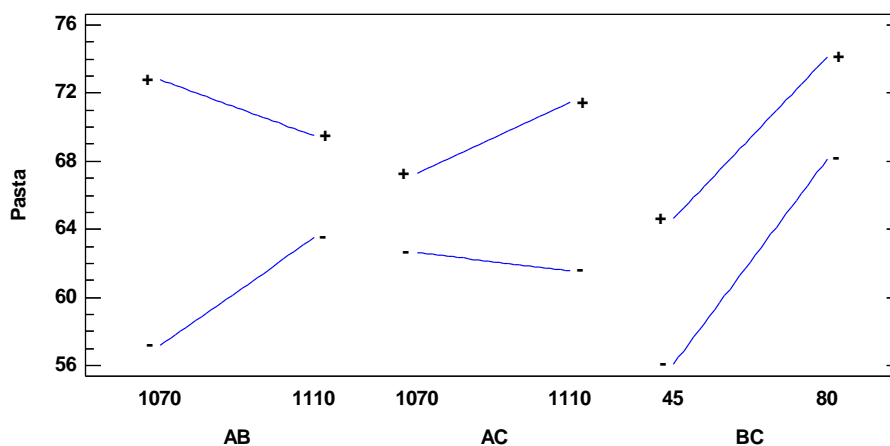


Figura 26: Interacción para pasta de relave

Todo lo manifestado arriba se corrobora estadísticamente significativos (diferentes de cero) mediante el análisis de varianza en tabla 20.

Tabla 21

Análisis de Varianza para Pasta de Relave (%S)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Densidad (%S)	4,8672	1	4,8672	0,42	0,5637
B: Tiempo de residencia espesamiento	234,145	1	234,145	20,14	0,0206
C: Dosificación de Floculante	106,58	1	106,58	9,17	0,0564
AB	45,9841	1	45,9841	3,96	0,1408
AC	13,7813	1	13,7813	1,19	0,3559
BC	3,15005	1	3,15005	0,27	0,6387
Error total	34,874	3	11,6247		
Total (corr.)	443,381	9			

R-cuadrada = 92,1345 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 76,4036 por ciento

Error estándar del est. = 3,4095

Error absoluto medio = 1,4808

Estadístico Durbin-Watson = 1,27116 (P=0,2539)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,0289743

La tabla 21 nos confirma que la que tiene mayor efecto significativo es el tiempo de residencia cuyo valor es 0,0206, seguido por la dosificación de floculante con valor de 0,0564, evaluando a partir del P-value de Pareto, el cual nos indica que el valor que tiende a cero tiene mayor significancia. La densidad de alimentación por el valor de 0,5637 no tiene efecto significativo en la pasta mineral en el parámetro especificado, debido a que se aleja de cero, para un coeficiente de correlación de 92,134 %.

Siendo el modelo matemático:

Tabla 22  
*Coefficiente de regresión para Pasta de Relave (%S)*

<b>Coefficiente</b>	<b>Estimado</b>
Constante	-194,201
A: Densidad (% S)	0,1904
B: Tiempo de residencia de espesamiento	8,7007
C: Dosificación de Floculante PHP30	-13,074
AB	-0,00749
AC	0,01313
BC	-0,00784

$$\text{Pasta Mineral (\%S)} = -194,201 + 0,190375 * \text{Densidad} + 8,7007 * \text{Tiem de resid sólidos} - 13,0743 * \text{Dosif Floculante PHP30} - 0,00749219 * \text{Densidad} * \text{Tiem de resid sólidos} + 0,013125 * \text{Densidad} * \text{Dosif Floculante PHP30} - 0,00784375 * \text{Tiem de resid sólidos} * \text{Dosif Floculante PHP30}$$

En la tabla 22 se observa la constante del modelo matemático tiene un valor negativo de -194,201, lo cual significa que la pasta mineral, depende de los factores tiempo de residencia de espesamiento (8,7007), dosificación de floculante (-13,074) para tener una pasta en los rangos de 74,6 a 77,0 % de sólidos. Esto lo comprobamos, si el tiempo de residencia del espesamiento y la dosificación de floculante son iguales a cero, entonces el modelo será igual a la constante -194,201, lo que es imposible tener % de sólidos en ese valor.

Tabla 23  
*Resultados Estimados para Pasta de Relave (%S)*

	<b>Observados</b>	<b>Ajustados</b>	<b>Inferior 95,0%</b>	<b>Superior 95,0%</b>
<b>Fila</b>	<b>Valores</b>	<b>Valores</b>	<b>para Media</b>	<b>para Media</b>
1	69,57	65,748	62,3168	69,1792
2	53,54	54,1955	44,1918	64,1992
3	56,73	57,9255	47,9218	67,9292
4	69,87	71,0655	61,0618	81,0692
5	64,55	65,2055	55,2018	75,2092
6	58,93	60,1255	50,1218	70,1292
7	68,45	69,1055	59,1018	79,1092
8	73,83	74,4855	64,4818	84,4892
9	72,68	73,8755	63,8718	83,8792
10	69,33	65,748	62,3168	69,1792

Promedio de 2 puntos centrales = 69.45

Promedio de las predicciones del modelo al centro = 65.748

En la tabla 23 se evidencia los valores estimados aplicando el modelo matemático respecto al valor promedio de las predicciones al centro de 65,748, siendo 95 % superior, trabajando con los niveles máximos, la pasta tiene valores de 64,1992 % sólidos y este puede alcanzar hasta 84,4892 % sólidos.

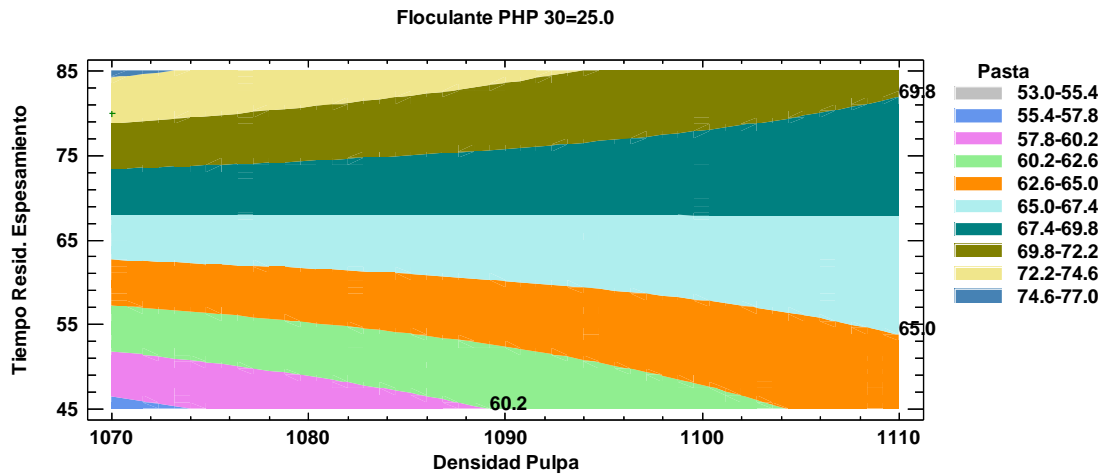


Figura 27: Contorno de la superficie respuesta estimada

En figura 27 se observa la ubicación de los puntos experimentales a nivel superficial y nos sugiere que se puede alcanzar pastas hasta 84,8492 % sólidos. Además, en el gráfico 28 a nivel espacial también se observa cómo se encuentran los puntos experimentales, y la dirección de la pendiente como se orientan en el proceso.

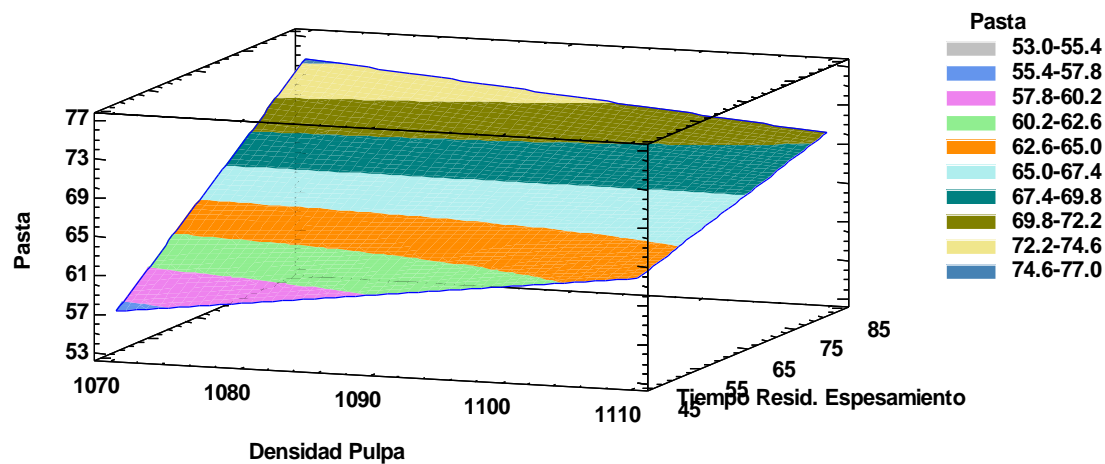


Figura 28: Superficie respuesta estimada para pasta de relave

La tabla 24 consigna los valores óptimos para obtener pasta mineral con 74,4855 % de sólidos, trabajar densidad de alimentación con 1070 g/t, Tiempo de residencia de espesamiento en 80 minutos y dosificación de floculante en 30 g/t.

Tabla 24  
*Optimización de respuesta*

Meta: maximizar Pasta de Relave (%S) Valor óptimo = 74.4855			
<b>Factor</b>	<b>Bajo</b>	<b>Alto</b>	<b>Óptimo</b>
Densidad (%S)	1 070	1 110	1 070
Tiempo de residencia espesamiento	48,0	80,0	80,0
Dosificación de Floculante	20,0	30,0	30,0

## 4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

Una hipótesis en el contexto de la estadística inferencial es una proposición respecto a uno o varios parámetros, y lo que el investigador hace a través de la prueba de hipótesis, es determinar si la hipótesis es consistente con los datos obtenidos de la muestra, para ello a continuación se formula la hipótesis estadística.

Las hipótesis científicas se someten a prueba o escrutinio empírico para determinar si son apoyadas o refutadas de acuerdo a lo que el investigador observa. En consecuencia, se procede a formular la hipótesis de investigación y la correspondiente hipótesis estadística.

### 4.2.1. Hipótesis de Investigación

#### **Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>)**

El espesamiento, floculación de relave no influyen significativamente en la obtención de pasta de la compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco 2018

### Hipótesis alterna (Ha)

El espesamiento, floculación de relave influyen significativamente en la obtención de pasta de la compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco 2018

#### 4.2.2. Hipótesis estadística

**H<sub>0</sub>: r<sub>XY</sub> ≠ 0**

No existe correlación entre la variable independiente (X) (Espesamiento, floculación de relave) y la variable dependiente (Y) (Obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C.)

**H<sub>a</sub>: r<sub>XY</sub> = 0**

Existe correlación entre la variable independiente (X) (Espesamiento, floculación de relave) y la variable dependiente (Y) (Obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C.)

#### Prueba de hipótesis

Se demuestra la hipótesis estadística planteado con los valores obtenidos del % de sólidos en pastas de las pruebas experimentales de la tabla 17.

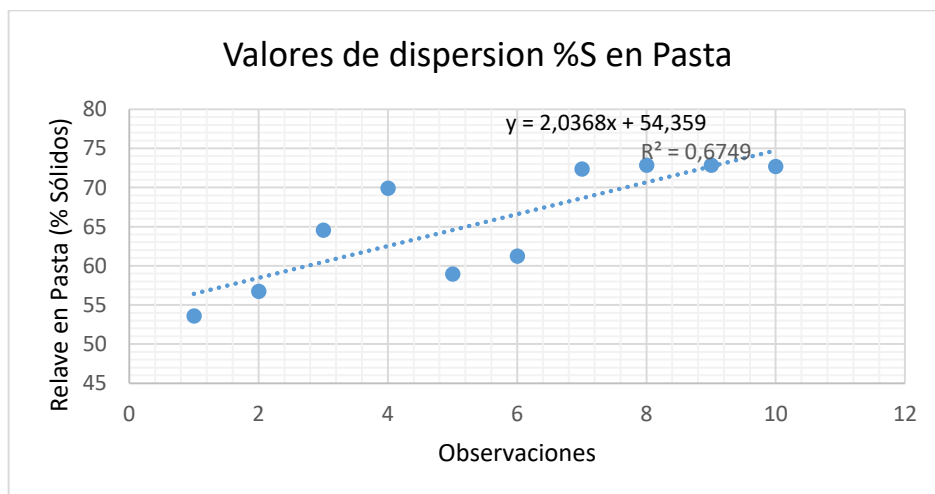


Figura 29. Dispersión de los datos experimentales

**Nivel de significancia**

$\alpha = 0,01$

**Estadístico de prueba**

Tabla 25

*Correlación de Pearson*

		Observaciones	Porc_Pasta
Observaciones	Correlación de Pearson	1	0,822**
	Sig. (bilateral)		0,004
	N	10	10
Porc_Pasta	Correlación de Pearson	0,822**	1
	Sig. (bilateral)	0,004	
	N	10	10
**. La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).			

**Valor de decisión: (Si  $P > \alpha$  se acepta la  $H_0$ ) (Si  $P < \alpha$  se rechaza la  $H_0$ )**

$P=0,004 < \alpha = 0,01$

**Decisión**

Se acepta la Hipótesis Alternativa

**Conclusión**

Existe suficiente evidencia para afirmar que existe correlación entre las variables Espesamiento, floculación de relave (X) y obtención de pasta de la compañía Minera Caolín S.A.C. (Y), al 1 % de significancia. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

**4.3. Contrastación de Hipótesis Específicas**

**4.3.1. Contrastación de Hipótesis Específica 1**

Del cuadro de análisis de varianza del diseño experimental de la tabla 21 tenemos:



### Hipótesis Nula

La densidad de alimentación de relave no influye significativamente en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco

### Hipótesis Alterna

La densidad de alimentación de relave no influye significativamente en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco

### Valor crítico de significación

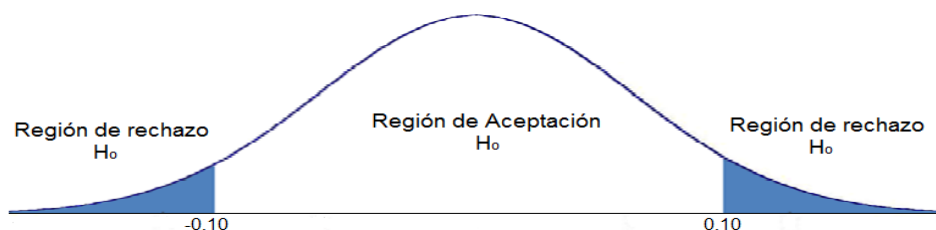
Nivel de confianza 90 %

$$\alpha = 0,10$$

La contrastación de la prueba específica 1 se llevará a cabo mediante la comparación de medias que se realiza mediante el análisis de Varianzas que sirve para contrastar la hipótesis si un factor tiene influencia sobre la respuesta.

Tabla 26  
Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Densidad alimentación	4,8672	1	4,8672	0,42	0,5637



**Valor de decisión ( $P > \alpha$ , Se acepta la  $H_0$ )**

Del análisis de varianza tenemos:  **$P = 0,5637$**

$$P=0,5637 > \alpha=0,10$$

### **Decisión**

No se rechaza la hipótesis nula

### **Conclusión**

Podemos afirmar categóricamente que el efecto de la densidad de alimentación de relave al cono sedimentador no tiene efecto en la calidad de la pasta de relave, trabajando a una densidad de alimentación en el rango especificado de 1 090 g/t a 1 110 g/t, con un nivel de significancia del 0,10%

## **4.3.2. Contratación de Hipótesis Especifica 2**

### **Hipótesis Nula**

La dosificación de floculante en la pulpa de relave no influye significativamente en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco

### **Hipótesis Alterna**

La dosificación de floculante en la pulpa de relave influye significativamente en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco

### **Valor crítico de significación**

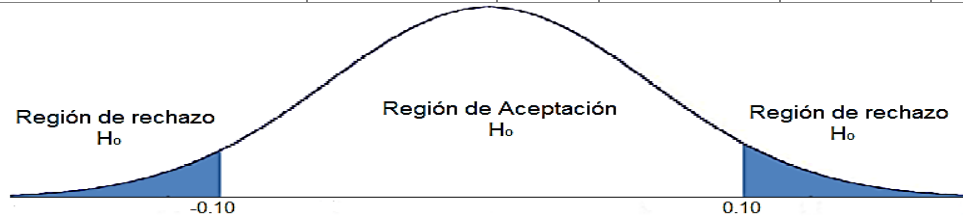
Nivel de confianza 90 %

$$\alpha = 0,10$$

Tabla 27  
Análisis de Varianza ( $P < \alpha$ , se rechaza la  $H_0$ )

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
---------------	--------------------------	-----------	-----------------------	----------------	----------------

C: Dosificación de Floculante	106,58	1	106,58	9,17	0,0564
-------------------------------	--------	---	--------	------	--------



Del análisis de varianza tenemos: **P = 0,0564**

$P=0,0564 < \alpha=0,10$

### Decisión

Se rechaza la hipótesis nula.

### Conclusión

Podemos afirmar que el efecto de adicionar floculante al cono sedimentador si influye significativamente en la calidad de la pasta de relave, con un nivel de significancia del 0,10%

### 4.3.3. Contrastación de Hipótesis Especifica 3

#### Hipótesis Nula

El tiempo de espesamiento en la formación de nivel de cama no influye significativamente en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco

#### Hipótesis Alterna

El tiempo de espesamiento en la formación de nivel de cama influye significativamente en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco

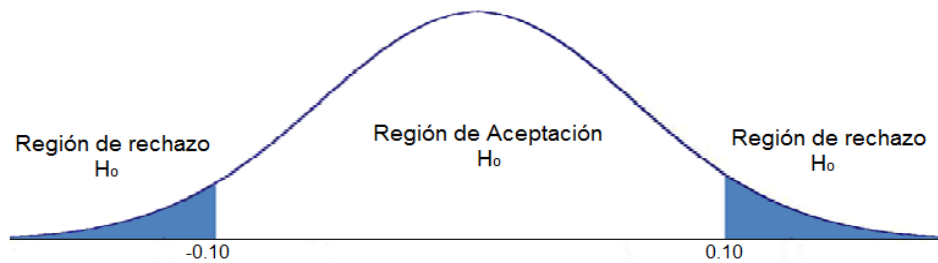
### Valor crítico de significación

Nivel de confianza 90 %

$$\alpha = 0,10$$

Tabla 28  
Análisis de Varianza ( $P < \alpha$ , se rechaza la  $H_0$ )

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
B: Tiempo espesamiento	234,145	1	234,145	20,14	0,0206



Del análisis de varianza tenemos: **P = 0,0206**

$$P=0,0206 < \alpha=0,10$$

### Decisión

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

### Conclusión

Podemos afirmar categóricamente que el efecto del tiempo de residencia en espesamiento para la formación de nivel de cama afecta en la calidad de la pasta de relave, con un nivel de significancia del 0,10%.

#### 4.4. Pruebas de Pasta

La descarga del cono sedimentador es sometido a la prueba de consistencia (Slump) y desplazamiento (Flume), donde se determinó el % Abatimiento y Angulo de reposo  $\theta_R$ .

##### a. Prueba de Abatimiento

Estas pruebas se realizaron a temperatura ambiente (12 °C) en el mismo terreno de la relavera. A continuación, presentamos las medidas tomadas de la consistencia de pasta utilizando el cono cilíndrico de 10 cm de diámetro por 10 cm de alto.

Tabla 29  
*Resultados de altura de abatimiento y ángulo de reposo*

<b>N° de Pruebas</b>	<b>% Sólido en peso</b>	<b>Altura de Slump</b>	<b>% ABT</b>
1	80	8,80	12,00
2	79	8,78	12,20
3	78	7,88	21,20
4	77	7,29	27,10
5	76	6,76	32,40
6	75	5,80	42,00
7	74	5,30	47,00
8	73	4,32	56,80
9	72	3,90	61,00

La tabla 29 evidencia que a medida que se incrementa el % de sólidos en peso de 72 %S a 80 %S la altura de abatimiento es más consistente, variando de 61 % a 12 % de abatimiento.



Foto 2: Toma de medida de la altura en prueba de abatimiento de relave

La foto 2 muestra altura de abatimiento en función a la concentración de sólidos en peso 73 % S.

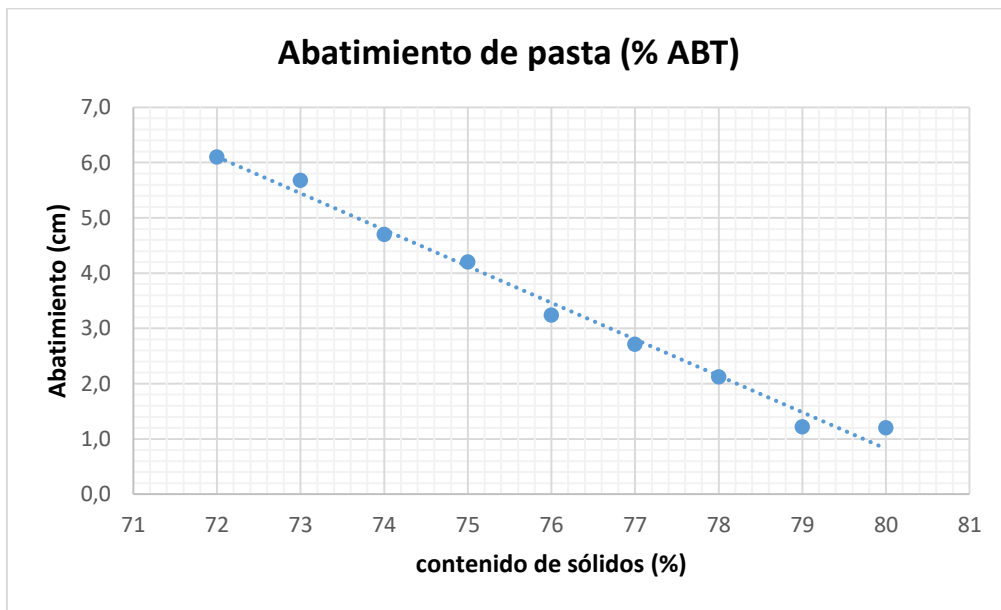


Figura 30: % de sólidos en peso vs altura de abatimiento (Elaboración propia)

La figura 30 muestra que, a partir de 80 % de sólidos en peso no ocurre una deformación significativa de material (1,20 cm), no se extiende por la superficie hasta 72% de sólidos en peso.

## b. PRUEBAS DE CANALETA PARA PASTA DE RELAVE

Esta prueba consistió en medir la altura del talud menos la altura del desplazamiento, en relación al espacio de recorrido de la pasta.

Tabla 30

*Resultados de ángulo de reposo*

N° de pruebas	Inclinación de base %	% Sólidos en peso	Angulo reposo $\theta R$
1	3	78,0	4,06
2	3	77,0	3,95
3	3	76,0	3,74
4	3	75,0	3,83
5	3	74,0	3,62
6	3	73,0	3,61
7	3	72,0	3,35
8	3	71,0	3,19
9	3	70,0	3,18
10	3	69,0	3,07

La tabla 30 muestra los ángulos de reposo de relave alcanzados durante su desplazamiento de 69 % de sólidos en peso a 78 % de sólidos en peso, que han alcanzado de 3,07° a 4,06° respectivamente, teniendo relación con la consistencia de pasta.

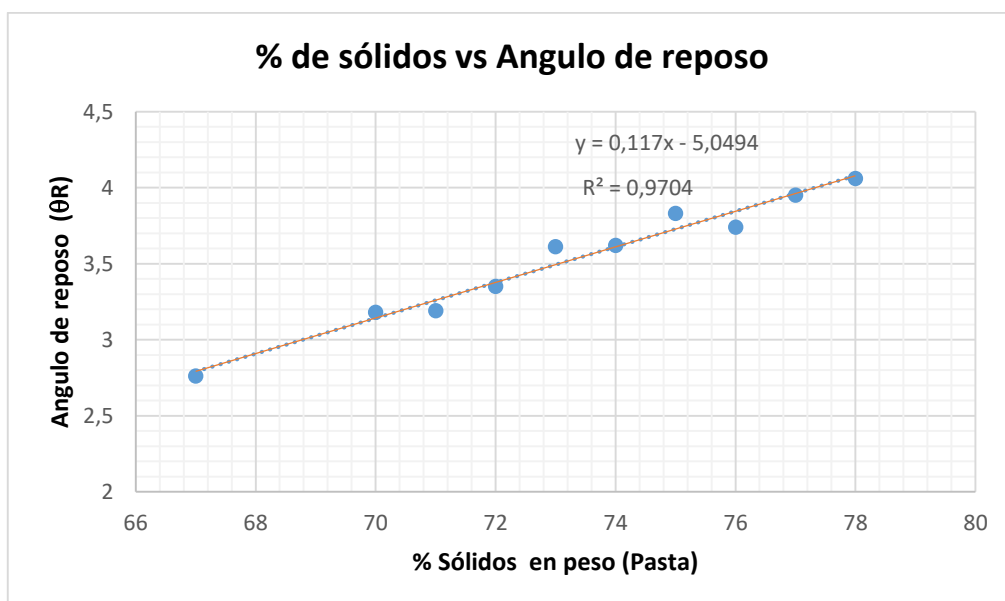


Figura 31: % Sólidos en peso vs Angulo de reposo (Elaboración propia)

La figura 31 evidencia que a medida que se incrementa el porcentaje de sólidos en peso del relave en pasta alcanza mayor ángulo de reposo



Foto 3: Toma de medida de la altura en prueba de abatimiento de relave

La foto 3 muestra el ángulo de reposo alcanzado a 74% de sólidos en peso en la prueba de canales



## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo general de la investigación fue determinar el espesamiento, floculación de relave en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C.

Aplicando la metodología de relación de variables se observó que la sedimentación, floculación de relave si tiene correlación con la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco, esto se comprueba por el valor obtenido de correlación de Pearson que tiene un valor de P-value 0,004 que es menor a 0,01 ( $P=0,004 < \alpha=0,01$ ), por lo que se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula. En conclusión, el espesamiento, floculación es necesario para realizar la aglomeración de partículas finas y provocar la velocidad de sedimentación o espesamiento y seguidamente la compactación al incrementarse la concentración de sólido en el cono de sedimentación que tiene efecto en la obtención de pasta.

Estos resultados guardan relación con lo que sostienen (Ros Moreno, 2014), que las partículas finas al encontrarse dispersas se aglomeran mediante la floculación, que adquieren un mayor tamaño y acelera la velocidad de sedimentación concentrándose en este caso la sedimentación continua más allá del instante crítico a una velocidad reducida que recibe el nombre de consolidación, donde las capas inferiores que soportan el peso del sedimento serán más concentradas que las capas superiores de este. Ello está acorde con lo que en este estudio se halla.

En lo que respecta a la influencia de la densidad de alimentación de relave (%S) en la sedimentación en la obtención de pasta, llegamos a la conclusión que no tiene efecto la

densidad de alimentación en la obtención de pasta, trabajando en el rango de 1 070 g/t a 1110 g/t, por lo que dentro de este rango se va obtener pasta, esto debido a que la concentración de sólidos en el sedimentador compensa esta variación en la alimentación, pero para obtener pastas óptimas con 74,48 % sólidos en peso tenemos que controlar la densidad en 1 070 g/t. Al respecto (Ames Ramírez, 2012), durante las pruebas toma muestras de rebose y descarga con frecuencia para determinar cualquier variación en las características de la alimentación que pueda afectar la floculación, y en consecuencia la claridad del rebose y espesamiento, realizando el control de la distribución granulométrica, tipo de mineral el pH. Según (Donald King), el espesado de relave se realiza conforme entra la alimentación en el espesador, los sólidos van decantando hacia el fondo. Pero no manifiesta en cuanto se debe controlar la densidad alimentación para un flujo continuo. En Cambio (Bravo Gálvez), manifiesta que el control de la alimentación en un determinado rango de porcentaje de sólidos, no perjudica la sedimentación de partículas.

En cuanto a la dosificación del reactivo floculante, y su efecto sobre el relave en pasta, llegamos a la conclusión que, si afecta significativamente en la obtención de pasta trabajando con 30 g/t, esto debido a que el floculante acelera la sedimentación de partículas floculentas y realiza una buena compactación de sólidos en el cono y por ende en la obtención de pasta mineral en la descarga, además tenemos una buena clarificación de agua en el rebose. Al respecto (Quispe Ordoñez, 2011), quien presenta su tesis titulada “Uso y selección de coagulantes y floculantes orgánicos en la industria minero metalúrgica” de la Universidad Nacional de Ingeniería, llega a la siguiente conclusión: las condiciones de floculación permiten la máxima claridad del líquido y máxima densidades de la descarga con el mínimo de dosificación que le permitió seleccionar las condiciones de alimentación para la operación del espesador piloto. Durante las pruebas mantiene el

nivel de sólidos constante y monitorea la densidad del underflow, manteniendo el balance de alimentación descarga. Se debe mencionar que los floculantes seleccionados difieren de una operación a otra, esto debido a la formación geológica del yacimiento.

En cuanto al tiempo de sedimentación de la formación de nivel de cama y su influencia en la obtención de pasta, llegamos a la conclusión que el tiempo de residencia del espesamiento de la concentración de los sólidos si tiene influencia significativa en la formación de nivel de cama. Controlando el tiempo en 80 minutos se alcanza un nivel de cama de 64 cm, altura donde es factible realizar la descarga para obtener pastas con 73,45 % de sólidos en peso. Alturas de nivel de cama sobre 64 cm, ocasiona que la alimentación al cono salga por el rebose. Al respecto (Mular, 1985), quien presenta su libro “Diseño de plantas de Procesos de Minerales” quien manifiesta que el control del nivel de sólidos en el espesador, se realiza mediante un sensor óptico de cristales. Y el incremento de nivel de sólidos o tiempo de residencia de sólidos, incrementa la densidad de descarga, presión en la base del espesador y valores de par torque. La medida de cama es una medida que nos orienta la altura que se está obteniendo. En nuestro caso el nivel de cama lo controlamos mediante una un sensor de nivel, midiendo la altura de cama vs el tiempo que demora en formarse nuevamente la cama para poder descargar y mantener una descarga constante. De la misma manera (Olcay Barreda, 2014) realiza la evaluación del tiempo de residencia requerido para la formación de pulpas de mayor densidad fueron realizados ensayos de sedimentación en probetas con % de sólidos en peso de 10, 15 y 20%. Llegando a concluir el tiempo óptimo de sedimentación es sobre los 33 minutos, esto es trabajando con 15% de sólidos. Se debe mencionar que la prueba no lo realiza a nivel de pilotaje.

## VI. CONCLUSIONES

1. Se determinó que la densidad de alimentación en el rango de 1 070 g/t a 1 110 g/t no tiene efecto en la calidad de pasta de la compañía Minera Caolín – Pasco, debido a que este factor se controló dentro del rango establecido en las pruebas experimentales a nivel de pilotaje. Puesto que el valor de **P-Value** es mayor que  $\alpha=0,10$  (**P= 0,5637 > 0,10**), se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna con un nivel de significancia del 90%.
2. Se determinó el tiempo de residencia de sedimentación de los sólidos en la formación de nivel de cama en el rango de 48 min a 80 min si tiene efecto en la calidad de pasta de la Compañía Minera Caolín - Pasco, este factor se debe controlar con mayor rigurosidad para obtener pastas con 74,48 % sólidos, manteniendo el tiempo de residencia en 80 min para luego descargar la pasta. Puesto que el valor de **P-Value** es menor que  $\alpha=0,10$  (**P= 0,0206 < 0,10**), se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula con un nivel de significancia del 90%.
3. Se determinó que la dosificación de floculante en el rango de 20 g/t a 30 g/t si tienen efecto en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín –Pasco, este factor se debe controlar con mayor severidad para obtener pasta con 74,48 % de sólidos, trabajando con una dosificación de 30 g/t. Puesto que el valor de **P-Value** es menor que  $\alpha=0,10$  (**P= 0,0564 < 0,10**), se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula con un nivel de significancia del 90%.
4. El relave de Caolín presentó pasta en un rango comprendido 73 % y 77 % de sólidos en peso. Por lo tanto, el contenido de agua son 23 a 37 % en peso. Los ángulos de reposo

obtenido en los ensayos de canaleta alcanzaron  $4,19^\circ$  a  $4,82^\circ$  de pendiente para 70 % a 76 % de sólidos en peso, lo que facilita la estabilidad de relave depositado. El espesador de cono profundo fabricado para el pilotaje demostró ser adecuado para trabajar y realizar pruebas a nivel de campo.

## **VII. RECOMENDACIONES**

Realizar un control estricto del caudal de con una válvula en la alimentación y de esta manera se evita la sobre carga del cono sedimentador.

Seleccionar el floculante adecuado en las pruebas de sedimentación, para el tipo de mineral tratado.

Controlar el tiempo de sedimentación en la formación del nivel de cama, parámetro importante, en la calidad de pasta.

## VIII. REFERENCIAS

- Ames Ramírez, C. &. (2012). Control de variables en el espesador de cono profundo en la recuperación de relaves fluibles. (*Tesis de Suficiencia*). Universidad Nacional de San Marcos, Lima.
- Araujo, A. C. (2012). Nuevas alterantivas para disposicion de Relaves. *Grupo de Tratamientos Mineros*, 169- 176.
- Arias, F. (2012). *Proyecto de Investigación*. Caracas - Venezuela: Editirual Episteme.
- Cabrejo Salinas, J. (2011). Estudio de pre factibilidad para la recuperación de agua a partirde relaves de gran minería de cobre mediante la tecnología de relaves espesados. (*Tesis de Grado*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Cabrera Jara, J. (11 de Marzo de 2016). *Sedimentación y espesamiento de minerales*. Obtenido de (monografias): <https://www.monografias.com/trabajos82/sedimentacion-y-espesamiento-minerales/sedimentacion-y-espesamiento-minerales.shtml>
- Campos, M. (2016). Estudio de pastas mineras a partir de espesamiento de lamas de procesamiento fosfatico. (*Tesis de Mestria*). Universidad Federal de Minas Generales, Belohorizonte.
- Carrillo Gil, A. (2012). Accidentes y fallas en presas de relave. *Acingenieros*, 2.
- Castillo Juversay, G. (2011). Procesos de Tratamientos de Aguas Cuagulación y Floculación. (*Tesis de Maestría*). Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Santa Ana de Coro.
- Chia Aquije, J. (1984). *Operaciones Unitarias en Procesamiento de Minerales*. Lima: UNI.
- Clayton, S. G. (2003). Analysis of the Slump Test for on-site Yield Stress Measurement of Mineral Suspensions. *International Journal of Mineral Processing. Elsevier*, 3-21.

- Columbié Puig, N. (s.f.). Propuesta teórica para la formación de una cultura ambiental con un enfoque complejo en el contexto minero de Moa. (*Tesis Doctoral*). Universidad de la Habana, Cuba.
- Concha arcil, F. (2001). *Manual de Filtaración y Separación*. Concepcion-Chile: CETTEM.
- Cuenca, L. (2015). Relaves mineros: los desechos tóxicos de la gran industria que amenazan con sepultarnos. *El Desconcierto*. Obtenido de <https://www.eldesconcierto.cl/2015/06/23/relaves-mineros-los-deshechos-toxicos-de-la-gran-industria-que-amenazan-con-sepultarnos/>
- Dearaujo C, A. &. (2006). Consistencia, Fluidez y Viscosidad de Pastas Minerales de Relaves de Hierro. *Información Tecnológica*, 71-79.
- Falcucci, A. (2007). Estudio de pastas mineras a partir de espesamiento de lamas de procesamiento fosfático. (*Tesis de Maestría*). Universidad Federal de Minas Generales, Belorizonte, Brasil.
- Fernández Collado, C. &. (2014). *Metodología de la investigación*. México: Editorial Mc Graw Hill Education.
- Gaarder, J. (1977). *El Mundo de Sofía - EL Atomismo*. Mexico: Patria.
- Galaz Palma, J. (2011). Estado del arte en la deposición de Relave espesado. *Relpas*, 1-29.
- García Saldaña, C. A. (2014). Los relaves mineros, su efecto en el ambiente y la salud. *IV Conacin*, 1-2. Obtenido de [http://conacin.upeu.edu.pe/wp-content/uploads/2014/10/CIn\\_3415.pdf](http://conacin.upeu.edu.pe/wp-content/uploads/2014/10/CIn_3415.pdf)
- García, C. (2009). GRAN MINERIA Y CRISIS AMBIENTAL. *Ocmal*, 3-4.
- Gómez Paredes, P. (2012). Evaluación pruebas de espesamiento de relaves en la planta piloto. (*Tesis de suficiencia*). Pontificia Universidad Católica de Valparaiso, Valparaiso.
- Gutierrez Asqui, E. y. (2012). *Filosofía de la Ciencias Naturales*. Arequipa: Slide share.



- Gutierrez Pulido, H. &. (2008). *Analisis y diseños de experimentos*. Mexico: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.
- Hernandez Osorio, C. (2007). Efecto de la adición de reactivos agregantes y de ligantes sobre la consistencia en pasta minerales. (*Tesis de doctorado*). Universidad de Minas Generales, Belo Horizonte - Brasil.
- Jewell, R. (2002). Paste & Thickened Tailing (P&TT) in the Australian Mining Industry. In: HIGH DENSITY & PASTE. *Seminar*, 12-15.
- Jung, S. J. (2002). *Review of ocurrent high density paste fill and its tecnology*. Mineral resource engeneering. Idaho.
- Martí, J. (1975). *Obras completas*. Haba-Cuba: Ciencias Socilaes.
- Mauri. (2018). Ciencias naturales. *Enciclopedia libre*, 2.
- Minmineria. (03 de Marzo de 2019). *Relave*. Obtenido de <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-r/relave/>
- Mular, A. &. (1985). *Diseño de plantas de proceso de minerales*. Madrid: Editorial rocas y minerales.
- Olcay Barreda, R. S. (2014). Características principales de pastas minerales de relaves de manganeso preparadas en espesador de escala de laboratorio. *Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 25-34. Obtenido de <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/11381>
- ONU. (13 de Diciembre de 2017). *Objetivos del Desarrollo sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Ortiz, A. (2012). Autoconciencia, ciencia y filosofía en la relación hombre-naturaleza. *Omnia*, 109-110.
- Quiroz Nuñez, I. (1986). *Ingeniería metalurgica operaciones unitarias en procesamiento de minerales*. Lima: UNI.

- Quispe Ordoñez, M. A. (2011). Uso y Selección de Coagulantes y Floculantes Orgánicos en la Industria Minero Metalúrgica. (*Tesis de Suficiencia*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Ros Moreno, A. (2014). *Separación Sólido - Líquido en Hidrometalurgia (Espesadores y Filtros)*. Recuperado el 01 de 03 de 2019, de <https://es.scribd.com/document/207509908/Separacion-Solido-Liquido-en-Hidrometalurgia>
- Ruiz Soto, J. P. (30 de Marzo de 2010). Minería Sostenible. *El espectador*, pág. 5.
- SERNAGEOMIN. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, 38. Obtenido de <http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/12/GuiaTecOperacionDepRelaves.pdf>
- Significados.com. (2 de Agosto de 2018). *Contaminación ambiental*. Obtenido de Significados: Significado de Contaminación ambiental
- SNMPE. (2008). Desmontes y relaves mineros. *Sociedad Nacional de Minería de petróleo y Energía*, 2.
- Sofrá, F. B. (2002). Environmental Rheology for Waste Minimisation in the Minerals Industry. (*Chemical Engineering Journal*). Melbourne-Australiz.
- Tomas de Aquino, S. (1936). *La Ley*. Cuba: Labor S.A.
- Obtenido de [www.fundaciontecnologica.cl/sonami/wp-content/uploads/2017/05/](http://www.fundaciontecnologica.cl/sonami/wp-content/uploads/2017/05/)
- Valenzuela Pratt, F. A. (2011). Estudio experimental de la descarga puntual de una pasta de relaves sobre un plano inclinado. (*Tesis de Suficiencia*). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

## IX. ANEXOS

### ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

ESPEZAMIENTO, FLOCULACIÓN DE RELAVE PARA LA OBTENCIÓN DE PASTA DE LA COMPAÑÍA MINERA CAOLÍN S.A.C. – PASCO 2018

U.N.F.V. – Escuela de Posgrado

Doctorado: Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSION	METODO	TECNICAS	INSTRUMENTO
¿Cómo influye el espesamiento, floculación de relave en la obtención de pasta de la compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco 2018?	Determinar la influencia del espesamiento, floculación de relave en la obtención de pasta de la compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco 2018	El espesamiento, floculación de relave influye significativamente en la obtención de pasta de la compañía Minera Caolín S.A.C. – Pasco 2018	<b>V. Independiente:</b> Espesamiento, Floculación de relave.	<b>V.I.</b> Nivel 1 - Densidad de pulpa (%S)  Nivel 2 - Dosificación de Floculante  Nivel 3 - Tiempo de espesamiento	<b>Tipo de Investigación</b> Aplicado  <b>Nivel</b> Explicativo y Correlacional  <b>Método de investigación</b> Método científico  <b>Diseño investigación</b> Experimental  Diseño Factorial N=2 <sup>K</sup>	- Observación en laboratorio  - Observación de campo  - Procesamiento con Excel  - Estadística herramientas informáticas Statgraphics centurión XVI	- Ficha de recojo de recojo de información en laboratorio.  - Ficha de recojo de información en campo.  - Ficha de observación y cuaderno de notas
- ¿Cómo la densidad de alimentación de relave (%S) influye en la sedimentación para la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018?	- Determinar la influencia de la densidad de alimentación de relave (%S) en la sedimentación para la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018.	- La densidad de alimentación de relave (%S) influye significativamente en la sedimentación para la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018.	<b>V. Dependiente:</b> Obtención de pasta.	<b>V.D.</b> - % ABT (porcentaje de abatimiento)  - Angulo de reposo	<b>Población</b> La población de estudio está conformada por el relave procedente de las operaciones de tratamiento.  <b>Muestra</b> Relave que ingresa al cono sedimentador Control cada 20 min.  Caudal de alimentación		
- ¿Cómo el tiempo de sedimentación en la formación de nivel de cama influye en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018?	- Determinar el tiempo de sedimentación de la formación de nivel de cama que influye en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018	- El tiempo de residencia de sedimentación en la formación de nivel de cama influye significativamente en la obtención de pasta de la Compañía Minera Caolín S.A.C-PASCO 2018.					

## ANEXO 2

### INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

#### Toma de muestra de la alimentación

N° prueba	Flujo	Densidad inicial	% Solidos	Tratamiento solidos
	m <sup>3</sup> /L	Ton/m <sup>3</sup>	%S	Ton/min

#### Gravedad especifica

Muestra	Peso gr	Peso de fiola	Peso F+M	Peso agua F+H <sub>2</sub> O	Peso (F+Agua+M)	G. Esp
<b>Promedio</b>						

#### Análisis Granulométrico

Mallas	Abertura (μ)	Peso gr	% peso	Acum (+)	Acum (-)

#### Pruebas de sedimentación

Tiempo (min)	Altura (cm)





### Diseño experimental para la obtención de pasta

N° PRUEBAS	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	CALIDAD DE PASTA (% s)
1	-	-	-	+	+	+	-	
2	+	-	-	-	-	+	+	
3	-	+	-	-	+	-	+	
4	+	+	-	+	-	-	-	
5	-	-	+	+	-	-	+	
6	+	-	+	-	+	-	-	
7	-	+	+	-	-	+	-	
8	+	+	+	+	+	+	+	
9	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	

### Pruebas de desplazamiento de relave

N° de Pruebas	% Sólidos de pasta	Altura de talud H-h	Longitud de desplazamiento	Angulo reposo ( $\theta_R$ )

### Prueba de abatimiento

N° de Pruebas	% Solido en peso pasta	Altura de abatimiento	% ABT

## ANEXO 3

### DEFINICIÓN DE TERMINOS

#### **Arena Cicloneada**

Son las partículas gruesas del underflow del hidrociclón, provenientes del proceso de clasificación de una pulpa mineral. Con las arenas gruesas de relave se forma el muro de contención de la presa de relave.

#### **Espesadores**

Son equipos de separación sólido-líquido en los que una suspensión de sólidos formando una pulpa, se alimenta a un tanque provisto de un mecanismo interno que mediante la acción de la gravedad permite concentrar los sólidos en el fondo y hace fluir el agua clarificada hacia la superficie para ser recogida en el rebose del tanque. Los espesadores convencionales son de gran diámetro y baja altura. Con el tiempo, los espesadores convencionales han evolucionado hacia los denominados espesadores de alta capacidad (“High Capacity Thickener”=HCT, o también “High Rate Thickener”=HRT), espesadores de alta densidad (High Density Thickener=HDT), y espesadores de cono profundo o de pasta, caracterizados por una gran reducción en el tamaño y área de sedimentación requerida para igual flujo de sólidos.

#### **Floculante**

Los floculantes son polímeros orgánicos de cadena larga y alta masa molecular, solubles en agua, que al establecer puentes entre partículas forman una partícula con un mayor tamaño aparente. La mayoría de los floculantes utilizados en minería son reactivos aniónicos, pero también los hay del tipo catiónicos (se adsorben a las partículas por algún tipo de interacción química), pero también hay del tipo catiónicos y los no iónicos (la adsorción sólo se produce por una reacción química específica, denominada enlaces de hidrógeno).



## **Floculación**

Proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

## **Reología**

Es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos. Dentro de la minería estudia el comportamiento de los fluidos espesados que son utilizados en el relleno hidráulico. En minería las pruebas reológicas determinan el comportamiento del material espesado, en términos de viscosidad y "Yield Stress" del mismo.

## **Sedimentación**

Material sólido transportado por una corriente de agua y se posa en el fondo de un tanque. Según (Concha arcil, 2001), "Es el proceso de asentamiento de un material sólido o líquido desde un fluido, generalmente agua o aire, desde un estado de suspensión".

Según Jara Cabrera ( (Cabrera Jara, 2016), "Es una operación unitaria consistente en la separación por la acción de la gravedad de las fases sólida y líquida de una suspensión diluida para obtener una suspensión concentrada y un líquido claro"

## **Pasta mineral**

Es el relave con mayor concentración de sólidos a quien se le ha quitado el agua en un 25 a 35 %, mediante el uso de espesadores para obtener una concentración de sólidos con valores entre 65 o 75 %.

## **Pulpa**

Es una mezcla de una porción constituida de sólidos (minerales molidos) el cual debe tener un tamaño de grano casi uniforme y la otra constituida por un líquido, que generalmente es el agua.

## **Planta Concentradora**

Es una planta que realiza el procesamiento de minerales en etapas, con la finalidad de concentrar el metal valioso. Parte de mineral que no es concentrada es enviado como relave a la presa de relave.

## **Tiempo de residencia de espesamiento**

Es el tiempo en que se concentra las partículas, formando un colchón para que pueda mantenerse la concentración de sólidos en la descarga del cono sedimentador. A este tiempo de residencia de sólidos se conoce también como nivel de cama. Un incremento de nivel de sólidos o tiempo de residencia incrementa la densidad de descarga, presión en la base del sedimentador y el valor del torque.

## **Licuefacción**

Fenómeno mediante la cual una arena saturada pierde resistencia al esfuerzo cortante, debido a carga monótonica o cíclica y fluye comportándose como un líquido en movimiento

## **Velocidad de sedimentación**

Consiste en medir la velocidad con la que sedimentan (decantan, caen) las partículas aglomeradas o sin aglomerar, provenientes de una muestra.

## ANEXO 4

### FOTOGRAFÍAS DEL TRABAJO EN CAMPO



Foto 1: Vista satelital de la Cía. Minera Caolín



Foto 2: Vista satelital de la relavera de Cía. Minera Caolín



Foto 3: Agitador de Magneto



Foto 4: Muestra de relave seco

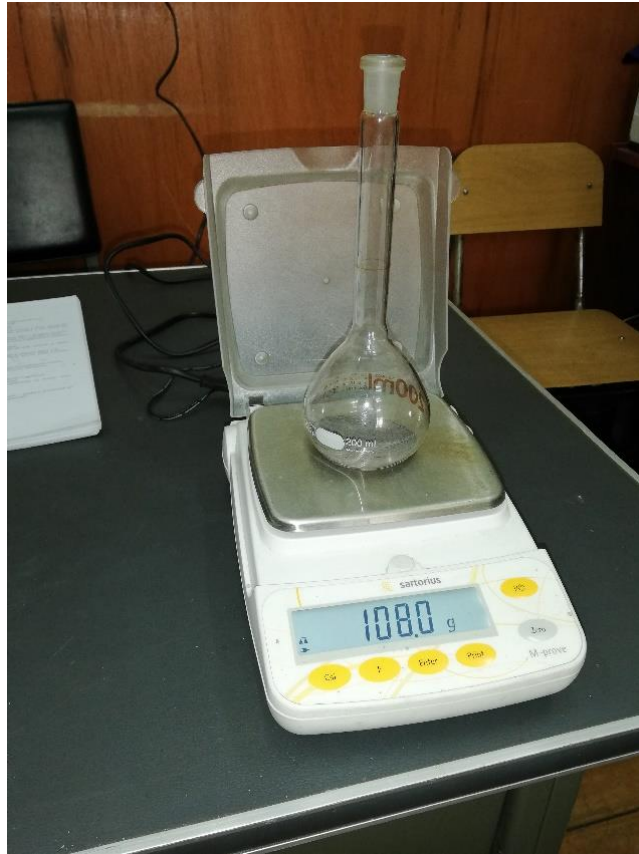


Foto 5: Peso de la Fiola



Foto 6: Homogenizado de Muestra para análisis granulométrico





Foto 7: Tamizaje en el Rot - Tap



Foto 8: Peso de muestra de mallas retenidas



Foto 9: Homogenizando el relave en pulpa



Foto 10: Muestra para prueba de sedimentación



Foto 11: Llenado de relave en la probeta

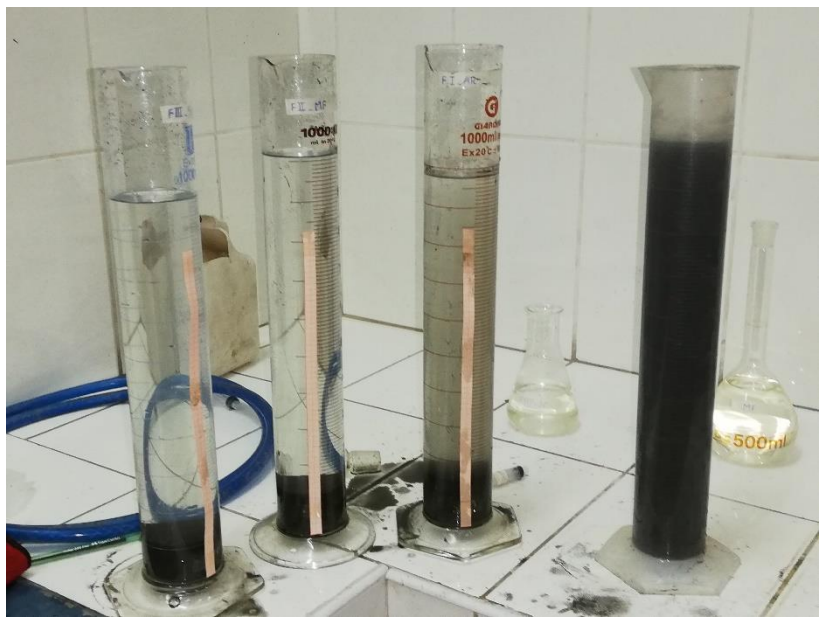


Foto 12: Pruebas de sedimentación





Foto 12: Pesaje de la densidad de pulpa



Foto 12: Cono de sedimentación

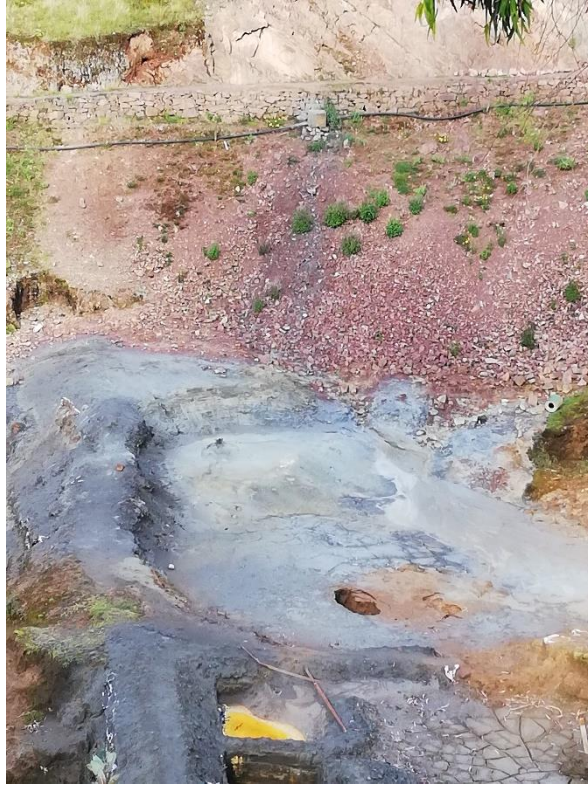


Foto 13: Lugar donde se ubicará el cono de sedimentación



Foto 14: Acondicionador de pulpa





Foto 15: Instalación de la planta de pilotajes de pasta



Foto 16: Rebose de agua clarificada





Foto 17: Instalación de la descarga de agua clarificada



Foto 18: Descarga de agua clarificada





Foto 19: Pasta de relave



Foto 20: llenado del densímetro con pasta de relave



Foto 21: Recepción de la pasta en el recipiente



Foto 22: Pasta de relave





Foto 23: Descarga de la pasta del cono



Foto 24: Secado de relave por evaporización



Foto 25: Pruebas de Consistencia (Slump)



Foto 26: Pruebas de Canaleta (Flume)





Foto 27: Vista de costado de la prueba de canaleta



Foto 28: Medida de desplazamiento de relave