

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



TESIS

**“APLICACIÓN DE PRUEBAS DE SEDIMENTACIÓN PARA
OPTIMIZAR EL ESPESAMIENTO DE CONCENTRADO EN
MINA SAN JOSE, OAXACA - MÉXICO”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA**

ELABORADO POR

PABLO SAMUEL NUÑEZ MELGAR LEON

ASESOR

M.Sc. ING. RICARDO CASTILLO UNGARO

LIMA – PERÚ

2022

*Dedicado a mis padres Jorge
Jesus Núñez Melgar
Cáceres y Clara Rosario
León Timana, por su
paciencia y sabiduría,
quienes me inculcaron de
valores para llegar a ser
quien soy hoy en día.
A mis hermanos Daniel y Patty
que han sido un ejemplo y
apoyo incondicional.*

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por estar presente siempre acompañándome en mis logros y fracasos, por darme un equilibrio en mi vida y una paz espiritual, agradezco a mis padres por su sacrificio, esfuerzo, apoyo y que gracias a sus enseñanzas pude salir adelante y a obrar correctamente. También a mis hermanos por haber mantenido una unión familiar y haberme guiado con sus buenos consejos.

Finalmente agradezco a mi querida alma mater, la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), a mi asesor de tesis el Ing. Castillo y a todos los profesionales que han aparecido a lo largo de mi carrera universitaria y profesional, que por sus enseñanzas y anécdotas han aportado positivamente en mi persona, especialmente a mis maestros de la UNI, y a los ingenieros de Compañía Minera Cuzcatlán (CMC), quienes me brindaron su apoyo y facilidades para sacar adelante este proyecto. Especialmente a la Ing. Patricia Gonzales Pineda, quien se desempeña como Gerente de Planta Concentradora.

RESUMEN

Para optimizar el espesamiento de concentrado en Mina San José, se recurren a aplicar pruebas de sedimentación a nivel de laboratorio. El desarrollo de estas pruebas es una investigación del tipo experimental.

Las pruebas de sedimentación utilizan un reactivo químico llamado floculante, el cual tendrá una determinada concentración y se aplicará distinta dosificación para cada prueba, tanto la concentración como la dosificación de floculante serían los indicadores que se modifica para cada prueba, y de las pruebas se calcula el porcentaje de sólidos finales y la velocidad de sedimentación, estas últimas serían los indicadores que resultan de la investigación.

En la planta concentradora de Mina San José no se cuenta con investigaciones previas en haber realizado pruebas de sedimentación al espesamiento del concentrado, de manera que no se cuenta con información de la concentración y dosificación de floculante adecuada, además de los factores que terminan influyendo en el porcentaje de los sólidos finales, es por ello que surge la necesidad de aplicar pruebas de sedimentación para mejorar el porcentaje de sólidos finales del espesador de concentrado.

Al mejorar el porcentaje de sólidos finales del espesador de concentrado, también se está beneficiando al recurso hídrico en una mayor recuperación de agua, mejor calidad de agua e influir positivamente en las siguientes etapas del proceso. El rango para la dosificación de floculante de 0.5 g/t a 0.9 g/t, una concentración de floculante de 0.055% y porcentaje de sólidos iniciales de alimentación al espesador entre 8 a 9% son los que logran los mejores resultados de porcentaje de sólidos finales.

Palabras Clave: Sedimentación, espesamiento, floculación, porcentaje de sólidos, concentrado, humedad.

ABSTRACT

To optimize the thickening of concentrate in Mina San José, sedimentation tests are applied at the laboratory level. The development of these tests is an experimental type of research.

Sedimentation tests use a chemical reagent called flocculant, which will have a certain concentration and different dosage will be applied for each test, both the concentration and the dosage of flocculant would be the indicators that are modified for each test, and from the tests the percentage of final solids and the sedimentation rate are calculated, the latter would be the indicators resulting from the research.

In the concentrator plant of Mina San José there is no previous research in having carried out sedimentation tests to the thickening of the concentrate, so that there is no information on the concentration and dosage of adequate flocculant, in addition to the factors that end up influencing the percentage of the final solids, that is why the need arises to apply sedimentation tests to improve the percentage of final solids of the thickener of concentrate.

By improving the percentage of final solids of the concentrate thickener, it is also benefiting the water resource in greater water recovery, better water quality and positively influencing the next stages of the process. The range for flocculant dosing from 0.5 g/t to 0.9 g/t, a flocculant concentration of 0.055% and percentage of initial solids fed to the thickener between 8 to 9% are the ones that achieve the best results of percentage of final solids.

Key Words: Sedimentation, thickening, flocculation, percentage of solids, concentrate, moisture.

PROLOGO

La sedimentación ocurre en el espesamiento, y consiste en el asentamiento o precipitación de partículas suspendidas en un medio por acción de la gravedad, en el presente tesis las partículas suspendidas son el concentrado final (sulfuro de plata - acantita), y el medio es el agua, para acelerar la precipitación del concentrado final se utiliza un componente químico llamado floculante, el floculante es un reactivo químico que puede ser de distintos tipos, la función del floculante es aglomerar las partículas, de manera que estas se hagan más pesadas y puedan precipitar más rápido por acción de la gravedad. Es entonces la sedimentación un proceso de separación sólido-liquido, y el floculante hace que la separación sea más rápida.

La sedimentación de concentrado es un proceso fisicoquímico complejo (Henderson et al., 1987) influenciado por varios factores como: tamaño de partícula, porcentaje de sólidos de alimentación al espesador, tipo de floculante, dosis de floculante, química del floculante, ley de concentrado, exceso de lamas y espumas (Bian et al., 2018). Todos estos factores intervienen directamente en los resultados: porcentaje de sólidos finales, velocidad de sedimentación, recuperación de agua, calidad de agua. Cabe resaltar que el porcentaje de humedad no es un resultado directo (pues influye la etapa posterior de la filtración), entonces es un resultado indirecto de la sedimentación. Todos estos factores mencionados anteriormente son importantes y dinámicos (van variando en el tiempo).

La sedimentación tiene como principal indicador clave (KPI – Key Performance Indicator) el porcentaje de sólidos, de manera que se busca aumentar el porcentaje de sólidos del espesador, el cual permite asegurar la sostenibilidad con el medio ambiente, también favorece la siguiente etapa: Filtración cuyo KPI es el porcentaje de humedad, y en la subsiguiente etapa: Embarque y despacho de concentrado.

Debido a la fineza con que generalmente se debe moler para obtener la liberación de las especies mineralógicas útiles en el procesamiento de un mineral, se dificulta tanto

el proceso de concentración como los procesos de separación sólido líquido. Por esta razón en la mayoría de los casos se debe recurrir a la agregación de las partículas, lo que se consigue mediante el uso de floculantes. Estos son productos macromoleculares formados por polímeros iónicos de cadena larga y son utilizados comúnmente en el espesamiento y filtración de relaves del proceso de flotación. (Concha, 2001).

El espesamiento, la filtración y la eliminación de relaves son el factor clave para recuperar el agua de proceso. (Concha, 2014). Los procesos de beneficio usualmente usan agua porque permite una mayor eficiencia, mayor recuperación y menor costo por unidad de producto valioso. Además, elimina la contaminación del aire. (Han K., 2003).

Cada día se hace más necesaria la recuperación de agua en los procesos de concentración de minerales y esta acción se torna crítica en aquellas grandes empresas en que se pretende aumentar en forma significativa la producción y donde el suministro de agua es limitado. Los procesos de separación sólido-líquido que se utilizan actualmente para estos fines tienen sus limitaciones, en algunos casos económicas, como en la filtración que se hace muy costosa para materiales como relaves, o en otras limitaciones técnicas, como en la descarga de espesadores cuyo material debe ser transportado por tuberías o canaletas a su destino, sea este los filtros de concentrado o el depósito de relaves. Aparece como muy pertinente hoy día un estudio para mejorar la recuperación de agua de las plantas rediseñando circuitos de separación sólido-líquido, cambiando los sistemas de transporte y utilizando equipos diferentes a los actuales, como por ejemplo los espesadores de alta densidad. (Concha, 2001).

La operación en la planta concentradora es evaluada constantemente, buscando siempre operar con seguridad, ser amigables con el medio ambiente, reducir costos y mejorar la rentabilidad. En tal sentido, al presentarse exceso de humedad en el concentrado final, se encuentra una oportunidad de mejora en optimizar el

espesamiento de concentrado. Para esto se realizan pruebas de sedimentación batch por el método Coe-Clevenger a nivel de laboratorio.

La tesis está comprendida por los siguientes capítulos:

Capítulo I, abarca la parte introductoria de la investigación y también la reseña histórica de la empresa minera donde se ha realizado el presente estudio. Se explica el planteamiento y descripción del problema, el objetivo e hipótesis general y específicas, la justificación y delimitación del estudio, se explican las variables independientes, dependientes y sus indicadores, además de la ubicación y accesos al lugar donde se realizó la presente tesis.

Capítulo II, se detalla todos los conceptos utilizados en la investigación, temas sobre espesamiento y sedimentación, los tipos de sedimentación, la floculación y sus tipos, del floculante, velocidad de sedimentación y el método aplicado a la tesis, la determinación de la velocidad de sedimentación y por ultimo las variables influyentes en el presente estudio.

Capítulo III, explicaremos la metodología de investigación, como el tipo, nivel y métodos de la investigación, también de cómo fue diseñada la investigación, de la población, muestra y muestreo, profundizaremos en las técnicas de investigación explicando cómo fue la recolección, procesamiento y análisis de los datos, y listaremos los equipos y materiales utilizados en la tesis de investigación experimental.

Capítulo IV, se describe a detalle la metodología de análisis y el procedimiento a seguir desde la toma de muestra hasta llegar al resultado final del análisis de los datos, se presenta también el método de la probeta graduada utilizada en las pruebas de sedimentación, y la preparación de floculante también utilizado para realizar las pruebas de sedimentación, adicionalmente se anexa el cálculo de la concentración de floculante.

Capítulo V, se detallan ya los resultados en base al análisis de los datos obtenidos de todas las pruebas de sedimentación, a manera de correlacionar las variables y

parámetros se utilizan gráficas. Este capítulo comprende la primera parte de sedimentación cuyos datos son experimentales, y la segunda parte de filtración los datos son operacionales.

Capítulo VI, es el último capítulo de investigación donde se presenta el impacto que tendrá el estudio, se divide primero en sostenibilidad enfocado en el recurso hídrico, y segundo en temas económicos de costos.

INDICE GENERAL

| | |
|--|----|
| AGRADECIMIENTO | 3 |
| RESUMEN..... | 4 |
| ABSTRACT..... | 5 |
| PROLOGO..... | 6 |
| CAPÍTULO I..... | 16 |
| INTRODUCCION | 16 |
| 1.1 Reseña Histórica..... | 16 |
| 1.2 Planteamiento del problema..... | 17 |
| 1.3 Descripción del problema | 18 |
| 1.3.1 Descripción del problema General..... | 18 |
| 1.3.2 Descripción del problema Específico..... | 18 |
| 1.4 Objetivos | 18 |
| 1.4.1 Objetivo General | 18 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos..... | 18 |
| 1.5 Hipótesis..... | 19 |
| 1.5.1 Hipótesis General..... | 19 |
| 1.5.2 Hipótesis Específicas | 19 |
| 1.6 Justificación..... | 19 |
| 1.7 Definición de términos:..... | 20 |
| 1.8 Variables de la Investigación | 21 |
| 1.8.1 Variable Independiente | 21 |
| 1.8.2 Variable Dependiente..... | 21 |
| 1.9 Limitaciones..... | 21 |
| 1.10 Ubicación | 22 |
| 1.11 Accesos | 23 |
| CAPÍTULO II..... | 24 |
| MARCO TEORICO | 24 |
| 2.1 Sedimentación..... | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.1 Tipos de sedimentación..... | 26 |
| 2.2 Espesamiento..... | 27 |
| 2.3 Floculación..... | 28 |
| 2.3.1 Tipos de Floculación..... | 29 |
| 2.3.2 Formas de Floculación..... | 29 |
| 2.3.3 Floculante..... | 31 |
| 2.4 Velocidad de sedimentación..... | 32 |
| 2.4.1 Método Coe - Clevenger..... | 33 |
| 2.4.2 Determinación de la velocidad de sedimentación..... | 33 |
| 2.5 Variables de sedimentación..... | 35 |
| 2.5.1 Porcentaje de sólidos de alimentación..... | 35 |
| 2.5.2 Dosis de floculante..... | 36 |
| 2.5.3 Granulometría..... | 36 |
| 2.5.4 Condiciones químicas..... | 36 |
| 2.5.5 Espumas..... | 37 |
| CAPÍTULO III..... | 38 |
| MÉTODOLOGIA DE INVESTIGACION..... | 38 |
| 3.1 Tipo de Investigación..... | 38 |
| 3.2 Nivel de investigación..... | 38 |
| 3.3 Métodos de Investigación..... | 38 |
| 3.3.1 Método experimental..... | 39 |
| 3.4 Diseño de Investigación..... | 39 |
| 3.5 Población, Muestra y Muestreo..... | 40 |
| 3.5.1 Población..... | 40 |
| 3.5.2 Muestra..... | 40 |
| 3.5.3 Muestreo..... | 40 |
| 3.6 Técnicas de investigación..... | 41 |
| 3.6.1 Técnicas de recolección de datos..... | 41 |
| 3.6.2 Técnicas de procesamiento y análisis de datos..... | 41 |
| 3.7 Equipos y Materiales..... | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 3.7.1 Equipos..... | 41 |
| 3.7.2 Materiales..... | 41 |
| CAPÍTULO IV..... | 43 |
| MÉTODOLOGIA DE ANALISIS | 43 |
| 4.1 Método de la prueba graduada | 46 |
| 4.2 Cálculo de Porcentaje de sólidos..... | 47 |
| 4.3 Preparación de floculante | 48 |
| 4.3.1 En planta concentradora..... | 48 |
| 4.3.2 En laboratorio metalúrgico..... | 49 |
| CAPÍTULO V..... | 50 |
| RESULTADOS..... | 50 |
| 5.1 Sedimentación | 50 |
| 5.2 Filtración | 59 |
| CAPÍTULO VI..... | 63 |
| ANALISIS DE RESULTADOS..... | 63 |
| 6.1 Sostenibilidad..... | 63 |
| 6.1.1 Sostenibilidad en espesamiento de concentrado | 63 |
| 6.1.2 Sostenibilidad en espesamiento de relave | 65 |
| 6.1.3 Sostenibilidad en agua recuperada | 65 |
| 6.2 Evaluación Económica..... | 66 |
| CONCLUSIONES | 69 |
| RECOMENDACIONES | 71 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 72 |
| ANEXOS | 75 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Mapa de ubicación de Compañía Minera Cuzcatlán, Mina San José..... | 24 |
| Figura 2.1 Pruebas de sedimentación batch acorde a Coe-Clevenger..... | 26 |
| Figura 2.2 Curva de sedimentación en función del tiempo..... | 26 |
| Figura 2.3 Espesamiento de concentrado en mina San José..... | 29 |
| Figura 2.4 Floculación por puente hidrógeno. | 31 |
| Figura 2.5 Adhesión de partículas al polímero por acción del floculante..... | 32 |
| Figura 2.6 Curva de sedimentación de 03 diferentes concentraciones de floculante..... | 35 |
| Figura 2.7 Velocidades de sedimentación según método Coe-Clevenger..... | 36 |
| Figura 4.1 Esquema del procedimiento seguido para las pruebas de sedimentación..... | 47 |
| Figura 4.2 Balanza Marcy para medición de porcentaje de sólidos..... | 49 |
| Figura 4.3 Preparación floculante en agitador magnético..... | 50 |
| Figura 5.1 Porcentaje sólidos finales versus dosis de floculante..... | 53 |
| Figura 5.2 Dosis de floculante versus sólidos finales de espesamiento..... | 54 |
| Figura 5.3 Dosis de floculante versus sólidos finales de espesamiento..... | 55 |
| Figura 5.4 Porcentaje de sólidos final versus velocidad de sedimentación..... | 56 |
| Figura 5.5 Porcentaje de sólidos inicial versus porcentaje de sólidos final..... | 57 |
| Figura 5.6 Porcentaje de sólidos final versus granulometría | 58 |
| Figura 5.7 Porcentaje de sólidos final versus ley de concentrado..... | 59 |
| Figura 5.8 Velocidad de sedimentación versus dosis floculante – porcentaje sólidos inicial..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.9 Correlación entre sólidos finales de espesamiento y humedad del concentrado..... | 61 |
| Figura 5.10 Correlación entre sólidos de alimentación al espesamiento y humedad del concentrado..... | 62 |
| Figura 5.11 Correlación entre dosis de floculante y humedad del concentrado..... | 63 |
| Figura 6.1 Recuperación de agua en el espesador de concentrado..... | 65 |
| Figura 6.2 Ahorro potencial en US\$/año..... | 69 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 5.1 Datos de dosis de floculante y promedio de sólidos finales de todas las pruebas..... | 56 |
| Tabla 6.1 Datos de sedimentación de concentrado..... | 65 |
| Tabla 6.2 Costo floculante en sedimentación de concentrado..... | 68 |

ANEXOS

ANEXO A: Matriz de consistencia de la tesis de investigación

ANEXO B: Diagrama de flujo de toma de muestras

ANEXO C: Tabla de datos de pruebas de sedimentación

ANEXO D: Cálculo de Dosificación de Floculante

ANEXO E: Pruebas con Agua Recuperada de Floculación

ANEXO F: Pruebas con nuevo floculante al concentrado

ANEXO G: Pruebas con nuevo floculante a jales

ANEXO H: Medición de Porcentaje de Sólidos en la Probeta

ANEXO I: Hoja de datos de sedimentación

ANEXO J: Estimación de recuperación de agua en espesamiento de relave

ANEXO K: Efecto de las espumas en las pruebas de sedimentación

ANEXO L: Método de probeta graduada para pruebas de sedimentación

CAPÍTULO I

INTRODUCCION

1.1 Reseña Histórica

La actividad más temprana registrada en el área de San Jose del Progreso, data de los 1850's, cuando la mina era explotada en una pequeña escala por la hacienda local. Pero a los inicios de 1900's, en las áreas de San Jeronimo Taviche y San Pedro Taviche se estaba explotando una gran cantidad de yacimientos auríferos. La actividad minera en el distrito disminuyó drásticamente con el inicio de la Revolución Mexicana en 1910, solo para reanudarse esporádicamente en la década de 1920. La minería en el área de San José se reactivó a pequeña escala en la década de 1960 y nuevamente en 1980 cuando Minerales de Oaxaca S.A. (MIOXSA) adquirió la mina San José.

La mina fue trabajada de manera intermitente por MIOXSA hasta fines de 2006, cuando la propiedad fue comprada por Cuzcatlán, una compañía registrada en México que entonces era propiedad conjunta de Fortuna y Continuum Resources Ltd. (Continuum) y la propiedad exclusiva se transfirió a Fortuna en marzo de 2009. Desde 1980 hasta el 2006, la producción de MIOXSA fue intermitente y provino principalmente de rebajes existentes y del desarrollo del cuarto, quinto y sexto nivel de la mina San José. El mineral se extrajo principalmente de las vetas Bonanza y Trinidad y se extrajo a tasas de aproximadamente 100 tpd. El principal método de

minería utilizada por MIOXSA fue “Método Shrinkage Stopping”. El mineral se procesó en una pequeña planta de chancado y flotación en San Jerónimo de Taviche, ubicada aproximadamente a 19 km de la mina San José. No se dispone de estimaciones fiables de la producción total durante el mandato de MIOXSA. La producción comercial se inició bajo la administración de Cuzcatlán el 1 de septiembre de 2011. Desde entonces, la minería subterránea se ha enfocado en las vetas Bonanza, Trinidad y Stockwork. La producción total desde septiembre de 2011 hasta el 31 de diciembre de 2018 se estima en 35,9 Moz de plata y 269 koz de oro.

1.2 Planteamiento del problema

Compañía Minera Cuzcatlán (CMC) procesa 3000 toneladas por día (tpd), de los cuales aproximadamente 80 tpd son de concentrado de acantita y pirita (sulfuro de plata y hierro), y regular contenido en oro, por lo que debido a la mineralogía la gravedad específica del concentrado es relativamente alta, esta cantidad se mantiene casi invariable durante cada día en la operación, mientras las dosificaciones de floculante utilizadas en el espesador de concentrado varían hasta en cantidades superiores al doble del valor de la media. Estas fluctuaciones de dosificaciones y otras variables más afectarían a los sólidos finales del espesador de concentrado, y consecuentemente a la etapa de filtración cuyo indicador es el porcentaje de humedad del concentrado final.

El porcentaje de humedad es un indicador clave de rendimiento de la etapa de filtración, es un control que se le da al concentrado final que va a ser despachado y vendido, al estar en valores altos presenta inconvenientes en los procesos operativos consecuentes, además este valor debe encontrarse en un rango ya establecido en un contrato para poder ser comercializado. El porcentaje de humedad está afectado por varias variables y parámetros directamente de la etapa de filtración, pero también indirectamente de etapas previas a la filtración, como son la molienda, flotación y espesamiento, para la tesis se enfoca el estudio en la etapa de espesamiento, cuyo indicador clave de rendimiento de esta etapa son los sólidos finales, se analizan

todas aquellas variables y parámetros que podrían afectar a los sólidos finales, y posteriormente su correlación de como estos afectarán al porcentaje de humedad.

1.3 Descripción del problema

1.3.1 Descripción del problema General

- ¿Es necesario aplicar pruebas de sedimentación para optimizar el espesamiento de concentrado?

1.3.2 Descripción del problema Específico

- ¿De qué manera la dosis de floculante mejorara el porcentaje de sólidos?
- ¿De qué manera la concentración de floculante ayudara a optimizar el espesamiento de concentrado?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

El objetivo general que se plantea es:

- Realizar pruebas de sedimentación para optimizar el espesamiento de concentrado.

1.4.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos que se plantean son:

- Encontrar la dosis adecuada de floculante para mejorar el porcentaje de sólidos.
- Lograr la concentración adecuada de floculante para optimizar el espesamiento de concentrado.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis General

La hipótesis general que se plantea es:

- Las pruebas de sedimentación optimizan el espesamiento de concentrado en mina San José.

1.5.2 Hipótesis Específicas

Las hipótesis específicas que se plantean son:

- La dosis de floculante mejora el porcentaje de sólidos finales del espesamiento de concentrado.
- La concentración de floculante ayuda a optimizar el espesamiento de concentrado.

1.6 Justificación

La presente investigación se considera importante, porque forma parte de una problemática actual en Mina San José, donde no se han realizado investigaciones previas a la etapa de espesamiento de concentrado. Este trabajo permitirá poder comprender el comportamiento que tienen varias variables dentro del proceso del espesamiento de concentrado, y consecuentemente también interpretar como la etapa del espesamiento de concentrado afectará a etapas posteriores. En tal sentido, se busca mejorar la calidad del concentrado de esta etapa, primero con el control operacional de las etapas previas, luego con el control operacional de esta etapa de espesamiento, y finalmente con el monitoreo del KPI de esta etapa.

De esta manera, teniendo una buena calidad del concentrado en el espesamiento, se alimentará a la etapa de filtración un concentrado con buena consistencia, lo cual evidenciaría una mejora del porcentaje de humedad en esta etapa, y un mayor rendimiento de los equipos. Con la aplicación de varias pruebas de sedimentación se logrará determinar adecuadamente el flujo y la concentración de floculante para

mejorar el porcentaje de sólidos finales y optimizar la etapa de espesamiento.

Al realizar esta tesis permitirá beneficiar en temas de desarrollo sostenible, principalmente en mejor manejo del recurso hídrico al poder recuperar una mayor cantidad de este para recircular a la operación, también en temas económicos, al reducir costos de floculante, piezas, refacciones, tiempo vida de equipos, y renta de maquinaria; finalmente, en temas de seguridad por una menor exposición del personal operativo a maquinaria pesada. A su vez, esta investigación también servirá de referencia para otras compañías mineras que deseen optimizar la etapa de espesamiento, o tengan en sus planes algún análisis o investigación en esta etapa.

1.7 Definición de términos:

En la tesis encontraremos los siguientes términos:

- Sedimentación: Es la acción de precipitación por acción de la gravedad de partículas o sólidos suspendidos.
- Velocidad de sedimentación: Es la velocidad de estas partículas o sólidos suspendidos en llegar a alcanzar el reposo.
- Floculante: Es un aditivo que se adiciona como catalizador para aglomerar las partículas o sólidos suspendidos.
- Sólidos Finales: Medido en porcentaje, es la cantidad de sólidos que ya han sido sedimentados o precipitados en el espesador.
- Espesamiento: Operación unitaria en la cual interviene el espesador.
- Espesador: Equipo donde se realiza la sedimentación y la separación sólido-liquido.
- Pruebas de sedimentación: Son pruebas realizadas en probetas calibradas en cm.
- Humedad: Medido en porcentaje, es la cantidad de agua presente en el concentrado filtrado final.
- Pulpa: Fluido constituido de mineral y agua.
- Jales: Sinónimo de relaves.
- Coloides: Partículas muy finas de tamaño menor a 20 micrómetros.

1.8 Variables de la Investigación

Las variables de la investigación son las siguientes:

1.8.1 Variable Independiente

La variable independiente es el floculante (Pruebas de sedimentación). Y los indicadores son los siguientes:

- Dosis de floculante (cc/min).
- Concentración de floculante (%).

1.8.2 Variable Dependiente

La variable dependiente es el sólido final de espesamiento (Espesamiento de concentrado) y velocidad de sedimentación (Pruebas de sedimentación). El indicador es el siguiente:

- Porcentaje de sólidos finales (%)
- Velocidad de sedimentación (cm/min).

1.9 Limitaciones

Entre las principales limitaciones que se pudo evidenciar durante el desarrollo del estudio, encontramos las siguientes:

- La investigación se limita solamente a las pruebas de sedimentación realizadas en el laboratorio metalúrgico de Mina San José, y las muestras son tomadas puntualmente de planta concentradora en la etapa de espesamiento.
- La investigación solamente está enfocada a la etapa de espesamiento; sin embargo, esta es afectada por etapas previas (molienda, flotación), y afectaría etapas posteriores (filtración, despacho de concentrado).
- El porcentaje de humedad está directamente influenciado por la etapa de filtración, para la investigación este valor se interpreta, infiere y correlaciona con los sólidos finales a partir de datos operacionales tomados diariamente.

- Las pruebas de sedimentación se limitan de 3 a 4 pruebas diarias, de acuerdo a la disponibilidad de materiales.

1.10 Ubicación

Mina San José está localizada en la porción central del estado de Oaxaca, México. La mina se encuentra a elevaciones sobre el nivel del mar entre 1540 a 1675m aproximadamente, a 47km por la carretera al sur de la ciudad de Oaxaca, el cual provee acceso a un aeropuerto internacional, y 0.8 km al este de la carretera federal 175, la mayor carretera entre Oaxaca y Puerto Ángel en la costa del Pacífico. La comunidad de San José del Progreso está ubicada a 2 km al sureste de la mina.

La mina subterránea es operada por Compañía Minera Cuzcatlán S.A. de C.V. (CMC), una subsidiaria 100% mexicana propia de Fortuna Silver Mines (FSM). La operación tiene relativamente poca infraestructura en superficie, consistiendo primordialmente la planta concentradora, estación eléctrica, almacenamiento de agua, filtrado de jales, stockpiles, dry stack (depósito de jales secos), instalaciones de almacenes y talleres, todo conectado por carreteras libres. Estructuras adicionales ubicadas en la propiedad incluyen a oficinas, comedor, laboratorio, logeo de núcleos, y almacén de núcleos. Las instalaciones de jales están localizadas aproximadamente 1500 m al suroeste de la planta concentradora.

Las coordenadas del punto central de la mina son 16.69° Norte, 96.71° Oeste 1568 Elevación, Zona UTM Q-14.

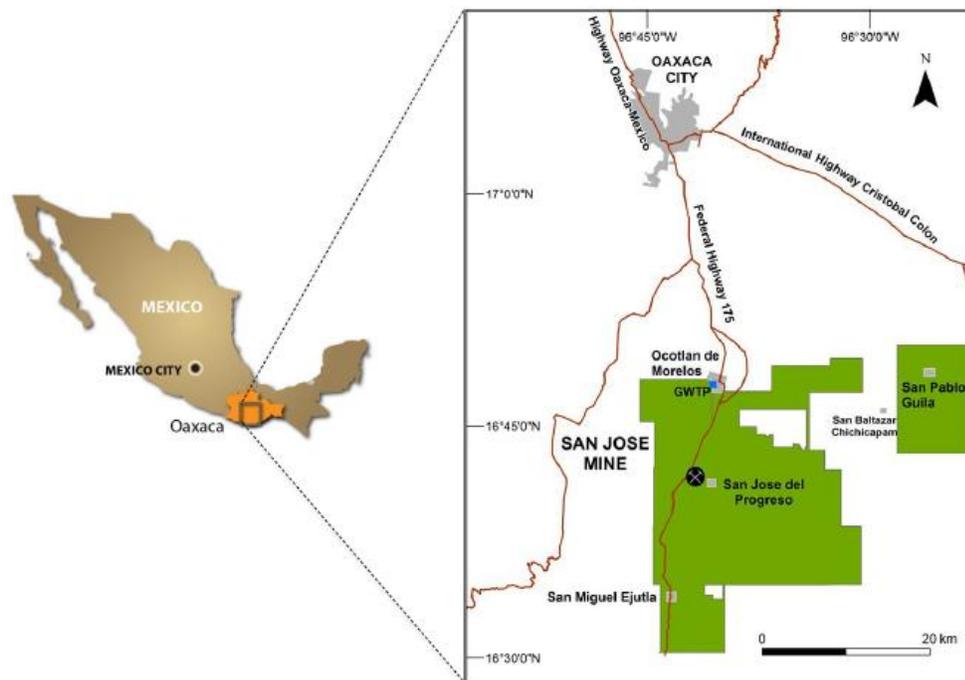


Figura 1.1 Mapa de ubicación de Compañía Minera Cuzcatlán, Mina San José.
Fuente: Elaboración propia, imágenes de internet y Google Earth.

1.11 Accesos

El traslado óptimo para llegar a la mina desde Ciudad de México, capital de México, es de dos maneras:

a) Tomar avión desde Ciudad de México hasta Oaxaca, y desde Oaxaca trasladarse en auto por la carretera federal 175, dirigiéndose luego por un desvío hacia San José del Progreso.

- Tiempo total aproximado: 1 hora con 45 minutos.

b) Tomar bus desde Ciudad de México hacia terminal terrestre de Oaxaca, luego en auto desde Oaxaca por la carretera federal 175, dirigiéndose luego por un desvío hacia San José del Progreso.

- Tiempo total aproximado: 7 horas.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 Sedimentación

La sedimentación es el asentamiento de una partícula o suspensión de partículas en un fluido. debido al efecto de una fuerza externa como la gravedad, la fuerza centrífuga o cualquier otra fuerza corporal. (Concha, 2014).

Coe y Clevenger reconocieron que el asentamiento de una suspensión floculenta inicialmente homogénea da lugar a cuatro zonas de asentamiento. De arriba a abajo, distinguieron (ver Figura 2.1) las siguientes zonas: A es una zona de agua clara, B es una zona de concentración inicial constante, C es una zona de transición de concentración variable y D es una zona de compresión. (Concha, 2003).

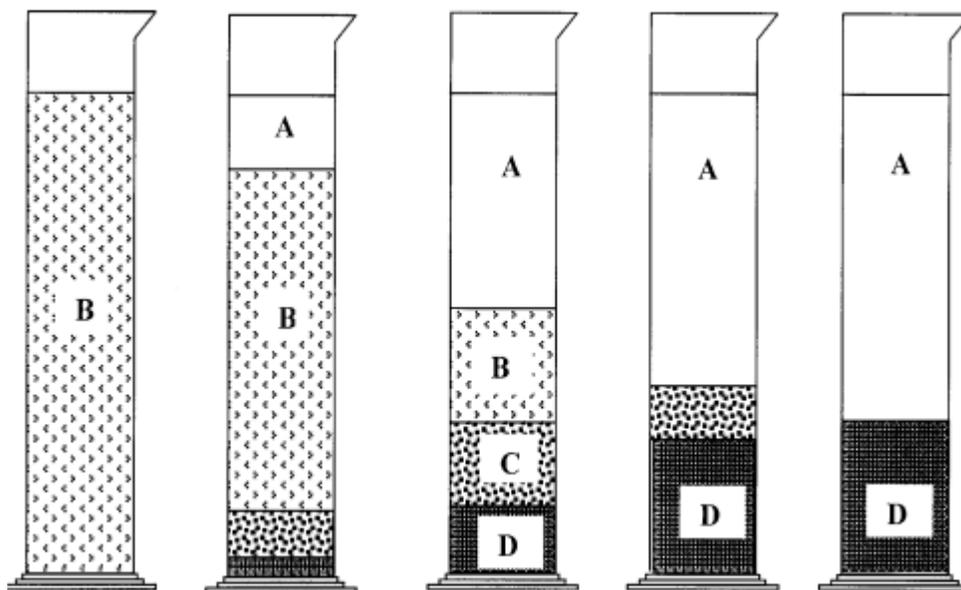


Figura 2.1 Pruebas de sedimentación batch acorde a Coe-Clevenger
Fuente: Manual de filtración.

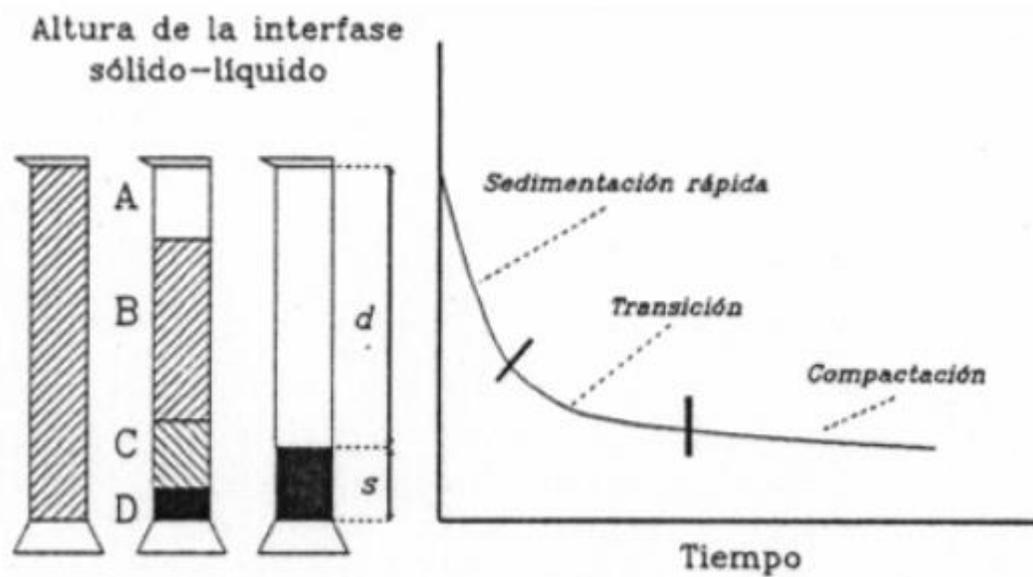


Figura 2.2 Curva de sedimentación en función del tiempo
Fuente: Estudio sanitario del agua.

2.1.1 Tipos de sedimentación

2.1.1.1 Sedimentación de partículas discretas

Según (Maldonado, 2004) se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída.

Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

2.1.1.2 Sedimentación de partículas floculentas

Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas son forma, tamaño, densidad, sí cambian durante la caída.

Se denomina sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación-floculación y la filtración rápida. (Maldonado, 2004).

2.1.1.3 Sedimentación por caída libre e interferida

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito

masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal.

Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una compresión o zona de compresión. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos. (Maldonado, 2004).

2.2 Espesamiento

El espesamiento es una operación unitaria de la planta concentradora, posterior a la flotación de minerales y previo a la filtración, el espesamiento es un subproceso de la sedimentación la cual tiene como finalidad la recuperación del sólido por encima del agua, este subproceso utiliza un espesador, es un tanque circular, de dimensiones de diámetro mayores a la altura, cuenta con un sistema de rastras en la parte inferior para mover el sólido hacia la parte central, y de ahí evacuar el sólido hacia otro tanque. La pulpa es alimentada en la parte central del espesador, y el floculante es adicionado desde la parte superior, las rastras también tienen como función de agitar y mezclar el floculante con la pulpa al interior del tanque espesador.

El espesamiento es un proceso importante para la deshidratación parcial de suspensiones comparativamente densas. Se permite que la lechada se asiente por gravedad, pero las partículas están lo suficientemente cerca como para obstaculizarse entre sí durante la sedimentación y tienden a sedimentarse como una masa en lugar de individualmente. (King, 2012).

Dos de las características más importantes en el funcionamiento de un espesador se expresaron por primera vez. En primer lugar, que la concentración en la zona de sedimentación es casi constante para un espesante en estado estacionario y que su concentración depende de la velocidad a la que el sólido se alimenta al espesante y no en la concentración del alimento. Se verificó que en la mayoría de los casos el alimento

se diluyó a una concentración desconocida al entrar en el espesante. El segundo hallazgo fue que, para la misma velocidad de alimentación, aumentar o disminuir la profundidad del sedimento podría ajustar la concentración de subflujo. (Comings et al., 1954).



Figura 2.3 Espesamiento de concentrado en mina San José
Fuente: Imagen propia

2.3 Floculación

Dado que el objetivo de la floculación es mejorar el proceso de separación de la fase acuosa de la suspensión y asegurar la deshidratación de la fase sólida mediante sedimentación, filtración y flotación, es muy importante que los flóculos tengan dimensiones, porosidad y resistencia óptimas. Estos requisitos se logran mediante la selección correcta de una dosis específica de floculante y el régimen hidrodinámico del tratamiento en suspensión.

La floculación es uno de los métodos más efectivos para mejorar la separación de suspensiones antropogénicas y naturales mediante técnicas de sedimentación y filtración. Cada año, la industria utiliza millones de toneladas de floculantes, que en esencia son polímeros solubles en agua, para aplicaciones tales como tratamiento de agua potable, purificación de aguas residuales municipales, en sistemas de reciclaje de agua en los sectores minero, beneficio de carbón y metalúrgico. (Rulyov et al., 2018).

2.3.1 Tipos de Floculación

Los tipos de floculación son las siguientes:

2.3.1.1 Floculación Pericinética

Esta producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano. (Andía, 2000).

2.3.1.2 Floculación Ortocinética

Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico. Según (Andía, 2000) después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética luego se produce la floculación ortocinética.

2.3.2 Formas de Floculación

Las formas de floculación son las siguientes:

2.3.2.1 Floculación por puente

Se produce por adsorción de una cantidad muy pequeña de polímero de cadena larga sobre varias partículas simultáneamente, produciendo puentes

de hidrógeno entre el polímero y iones de oxígeno presentes en la superficie de partículas contiguas en el flóculo. Este tipo de floculación produce flóculos muy fuertes. A mayores concentraciones que las necesarias para la floculación, el floculante se adsorbe completamente en una partícula dejando poca oportunidad para adsorberse en otras partículas y re-estabilizando la suspensión.

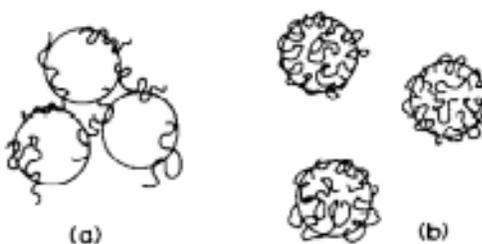


Figura 2.4 Floculación por puente hidrógeno.

Fuente: Manual de Filtración

a) Floculación de varias partículas b) re-estabilización por exceso de floculante.

2.3.2.2 Floculación en red

Si dos o más polímeros lineales se adsorben sobre las partículas, se forma una red de tipo gel con forma de retículo tridimensional.

2.3.2.3 Floculación en pelet

El estricto control en la adición de floculante, lineales o ramificados, puede producir flóculos muy compactos conocidos como pelets.

2.3.2.4 Floculación electrostática

La acción de polímeros catiónicos sobre partículas cargadas negativamente es algo similar al proceso de coagulación, en que la neutralización de las cargas superficiales predomina por sobre la formación de puentes.

2.3.2.5 Floculación por enlace de sal

La industria minera utiliza más frecuentemente los polímeros aniónicos como floculantes que los catiónicos o los neutros. En este caso la adsorción se produce por enlaces covalentes o por reacción química en la superficie de las partículas.

2.3.3 Floculante

El floculante es un reactivo utilizado en el espesamiento, para que al estar en contacto con la pulpa este aglomere a todas las partículas sólidas, y ayude a estas a sedimentar más rápido por misma acción de la gravedad.

Entonces, el papel principal de los floculantes es unir partículas de suspensión separadas con moléculas de polímero en agregados gruesos y fuertes para facilitar su posterior separación de la fase acuosa. (Rulyov et al., 2018).

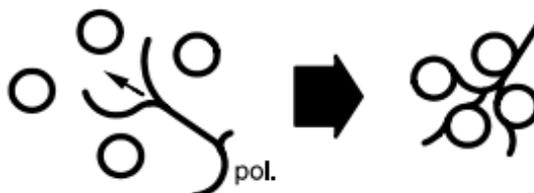


Figura 2.5 Adhesión de partículas al polímero por acción del floculante.

Fuente: Basics in mineral processing

2.3.3.1 Floculante polimérico

Los floculantes poliméricos son reactivos orgánicos con moléculas de cadena larga y pesos moleculares de 106 g o más. Pueden ser naturales o sintéticos. La ventaja de los floculantes sintéticos es que su estructura molecular, en términos de su contenido químico como peso molecular y su grado de hidrólisis, o ionocidad, pueden ser diseñada a voluntad de acuerdo a las necesidades encontradas en la industria. Como son producidos a partir de materias primas químicas, su calidad es más consistente que la de

floculantes naturales. Además, pueden ser diseñados de pesos moleculares mucho mayores que los encontrados en la naturaleza, lo que les da una ventaja técnica y económica.

2.3.3.2 Floculante polimérico natural

Son polímeros naturales extraídos de sustancias animales o vegetales. Como los polisacáridos almidón, dextrina y coloides proteínicos como la cola animal, caseína, gelatina y alginatos.

2.3.3.3 Floculante polimérico sintético

Son los más utilizados y son macromoléculas de una gran cadena, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con masa molecular elevada de 10^6 a 10^7 gr./mol. Están basados en materiales acrílicos provenientes de derivados del petróleo, tales como las poliacrilamidas de alto peso molecular. Estos se clasifican de acuerdo a la ionicidad de los polímeros:

- Neutros o No-Iónicos: óxido de polietileno; polivinil alcohol.
- Aniónicos: poliestireno-sulfonato de sodio
- Catiónicos: polietilenamina; cloruro de dialildimetil-amonio

2.4 Velocidad de sedimentación

Se han realizado muchos trabajos en el campo de la sedimentación y espesamiento de relaves. Sin embargo, no es exacto evaluar los comportamientos de sedimentación sobre la base de la velocidad de sedimentación como el único índice de evaluación en la mayoría de los estudios, y hay pocos estudios de investigación sobre el comportamiento de sedimentación (Bian et al., 2018).

La velocidad de sedimentación depende de la naturaleza de las partículas que componen la pulpa y del grado de floculación que se logre. Para una suspensión floculada en particular, la velocidad de sedimentación está determinada

principalmente por el contenido sólido local de la pulpa y variará de un punto a otro en la pulpa ya que varía el contenido de sólidos locales. (King, 2012).

2.4.1 Método Coe - Clevenger

El procedimiento de diseño de Coe y Clevenger, resume que el único conocimiento cuantitativo en sedimentación logrado durante la primera mitad del siglo XX, se basó en un equilibrio macroscópico del sólido y el fluido en un recipiente de sedimentación y en la observación de las diferentes concentraciones establecidas en el espesante. No existía ninguna teoría de sedimentación subyacente. Coe y Clevenger argumentaron que la capacidad de manipulación de sólidos, hoy llamada densidad de flujo de sólidos, tiene un valor máximo en el espesante a una cierta dilución entre el alimento y la concentración de descarga. (Concha, 2003).

2.4.2 Determinación de la velocidad de sedimentación

La determinación de la velocidad de sedimentación se sigue en dos pasos: El primer paso es recoger toda la información de la prueba de sedimentación batch que se realiza durante 24 horas, tomando de datos la altura y el tiempo, luego se grafica como se muestra en la Fig. 2.6.

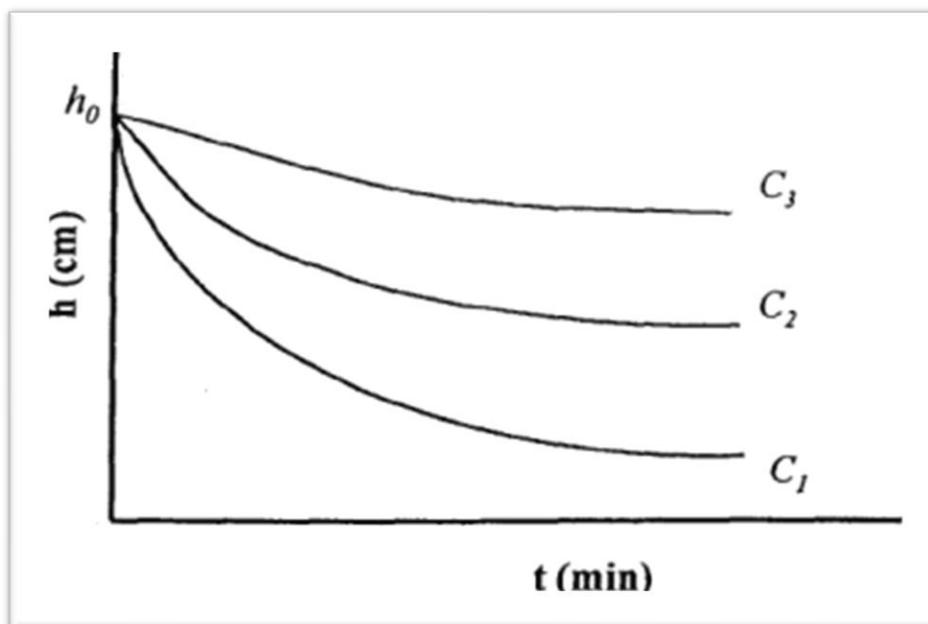


Figura 2.6 Curva de sedimentación de 03 diferentes concentraciones de floculante
Fuente: Extraído de ugr.es

De la curva anterior, las variables que se manejan para cada prueba de sedimentación es la dosis de floculante, y la concentración de floculante. Como segundo paso, se tiene que trazar una recta tangente a las curvas obtenidas C_1 , C_2 y C_3 de la Fig. 2.7, y el valor de la velocidad será el valor de la pendiente de la recta expresado en cm/min.

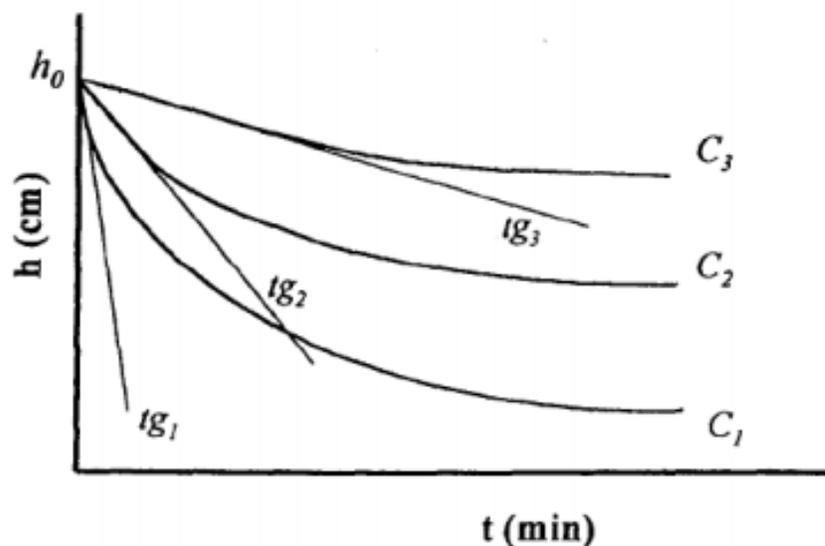


Figura 2.7 Velocidades de sedimentación según método Coe-Clevenger

Fuente: Extraído de ugr.es

2.5 Variables de sedimentación

Muchos factores externos al propio equipo de separación líquido-sólido influyen en su rendimiento y productividad. Los más comunes son los siguientes. (Han K., 2003).

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. (Concha, 2001)

2.5.1 Porcentaje de sólidos de alimentación

La concentración de sólidos también afecta en gran medida la dinámica de las partículas. Por ejemplo, la velocidad de sedimentación disminuye a medida que aumenta la concentración de sólidos. Este fenómeno se debe a dos factores. Primero, aumenta la gravedad específica de la pulpa. En segundo lugar, a medida que aumenta la concentración, las partículas son más abundantes y, por lo tanto, es más probable que choquen o se impidan la caída entre ellas. También aumentará la viscosidad de la suspensión. (Han K., 2003).

2.5.2 Dosis de floculante

La adición de diferentes dosificaciones y tipos de mezcla a que es sometida la suspensión dan como resultado, tamaños de flóculos y velocidades de sedimentación muy diferentes (Keyes & Hogg 1979, Hogg et al 1993).

Los hallazgos han demostrado que la dependencia de la eficacia de la floculación de la dosis de floculante se ve sustancialmente afectada por la concentración de la suspensión, cuanto mayor es la concentración de la suspensión, mayor es la dosis de floculante necesaria para lograr la eficacia de floculación deseada. (Rulyov et al., 2018).

2.5.3 Granulometría

Todas las tecnologías de sedimentación están relacionadas con el tamaño de partícula. Una forma de mejorar la velocidad que coloca generalmente es por lo tanto aumentar el tamaño de las partículas. Las partículas finas se pueden conectar entre sí por coagulación o floculación. La velocidad de sedimentación de las partículas combinadas será mayor que la de cada individuo partícula. Esto también se puede aplicar antes de la deshidratación mecánica. (Metso, 2015)

2.5.4 Condiciones químicas

La acidez o alcalinidad de una solución (pH) puede afectar la separación líquido-sólido de varias formas. Por ejemplo, un pH muy ácido o básico puede reflejar grandes cantidades de sólidos coloidales si la suspensión proviene de una etapa de lixiviación. Los extremos de pH se asocian comúnmente con temperaturas elevadas, agitación mecánica, tiempos de retención medidos en horas y, en algunos casos, elevados presiones, todas las cuales generan sólidos coloidales. (Han K., 2003).

2.5.5 Espumas

El efecto de las espumas presentes en las pruebas de sedimentación hace que en la superficie se forme una capa lo cual dificulta la sedimentación, y además hace que el floculante no haga efecto uniformemente en toda su extensión, sino esta capa absorba parte del floculante y haga resistencia a la sedimentación de las partículas, otro aspecto es la cantidad de finos o lamas que se generan y debido a eso es la formación de las espumas (Véase Anexo K). Hay dos razones que se debe controlar: Primero, el exceso de reactivo (espumante) en la etapa de flotación hace que se formen exceso de espumas en el concentrado, y espumas fuertes que se hace difícil romperse con un rompe espumas; y segundo, está la sobre molienda que genera exceso de finos por debajo de la malla 200, que se evidencia en la flotación y posteriormente en la sedimentación como lamas.

CAPÍTULO III

MÉTODOLOGIA DE INVESTIGACION

3.1 Tipo de Investigación

Es una investigación del tipo experimental-laboratorio, porque se realiza a través de numerosas pruebas a nivel de laboratorio, y tomando muestras en campo simulando entonces diversas condiciones de manera que se pueda reforzar o descartar las hipótesis planteadas, así mismo las variables estudiadas son controladas, alteradas o manipuladas, con el fin de observar y registrar cómo se comportan.

3.2 Nivel de investigación

La presente investigación es experimental-laboratorio-correlacional, porque a partir de las numerosas pruebas se registra la información, y luego se analiza toda la información, mediante graficas que permitan correlacionar las variables con el objeto de estudio y la problemática del estudio. Esta investigación permite modificar algunas variables a nivel de laboratorio, logrando observar los efectos a distintos rangos de esas variables.

3.3 Métodos de Investigación

Los métodos de investigación son una herramienta vital para el avance científico, porque permite comprobar o descartar hipótesis con parámetros fiables, de manera sostenida en el tiempo, y con objetivos claros. De esta manera se garantiza que las

contribuciones al campo del conocimiento investigado puedan ser comprobadas y replicadas.

3.3.1 Método experimental

Se trata de una orientación que, a partir de lo ya descrito y explicado, se centra en predecir de lo que va a pasar en el futuro si, en esa situación de la realidad, se hace un determinado cambio. Sobre la base de las respuestas al “¿cómo?” y al “¿por qué?”, como premisas, se afirma que, si se hace el cambio, sucederá tal cosa.

Se evalúa variar la variable independiente (floculante), en dosificación y en concentración, haciendo esto se tendrán varios resultados de la variable dependiente (sólidos finales de espesamiento) y de la velocidad de sedimentación.

Además, este método hace necesario plantear una hipótesis predictiva (con la estructura: “Si es así, por qué... y si hace tal cambio, entonces va a suceder tal cosa”), y el diseño pasa a ser un diseño experimental.

3.4 Diseño de Investigación

La investigación se realiza de la siguiente manera:

- Primero en el muestreo de la pulpa, la cual será transportada a laboratorio metalúrgico para su tratamiento.
- Segundo: Aplicar las pruebas de sedimentación a la muestra de pulpa.
- Tercero: Análisis de la data y obtener los valores para optimización de la etapa de espesamiento de concentrado.
- Cuarto: Evaluación del beneficio de la investigación.

3.5 Población, Muestra y Muestreo.

3.5.1 Población

La población o universo de la presente investigación, está representada por la pulpa de alimentación hacia el espesamiento de concentrado, esta proviene del concentrado de la etapa de flotación.

3.5.2 Muestra

Se recolecta un total de 104 muestras, siendo una muestra diaria y son entre 3 a 4 pruebas de sedimentación por cada muestra, se realizan en total 376 pruebas de sedimentación. Las pruebas de sedimentación comienzan en Marzo y culminan en Septiembre, garantizando así que la muestra abarque distintas características durante los 07 meses de pruebas de sedimentación.

3.5.3 Muestreo

Para realizar el muestreo se realiza de la siguiente manera:

La muestra tomada es de manera puntual, es decir, cada día entre las 08:15 a 08:45 am se toma la muestra con una copa de capacidad 1L., se toman alrededor de 12 a 14 cortes, de manera que se pueda homogenizar y tomar varias muestras representativas.

Se muestra el diagrama como sigue el circuito de sedimentación de concentrados (Anexo B), tomando como punto de partida flotación que tiene dos productos: concentrado final y cola final. El concentrado final alimenta a un tanque receptor el cual dispone de un muestreador para el muestreo puntual, de este pasa directo a uno de transferencia y es aquí donde se toma las muestras para las pruebas de sedimentación, luego se continua al espesador de concentrado donde se adiciona floculante. En el espesador de concentrado finaliza el proceso de sedimentación de concentrado. El concentrado final obtenido del espesador de concentrado va hacia

un tanque para almacenarlo hasta su disposición en filtración, dicho tanque también conocido como tanque de balance.

3.6 Técnicas de investigación.

3.6.1 Técnicas de recolección de datos

Como técnica de recolección de datos, se realizó manualmente en unas hojas impresas con un formato para las pruebas de sedimentación (Véase Anexo I), así mismo también se utilizó para la recolección de datos el programa de Microsoft Excel 2013 y crear una base de datos.

3.6.2 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Como técnica de procesamiento y análisis de datos se ha utilizado Microsoft Excel 2013, dentro del análisis de datos está comprendido las gráficas, y tendencias lineales para el cálculo de la velocidad de sedimentación

3.7 Equipos y Materiales

3.7.1 Equipos

- 01 Celda de flotación Denver.
- 01 Agitador magnético.
- 01 Balanza microanalítica.

3.7.2 Materiales

- 02 Probetas de vidrio "SIMAX" Czech Republic 2000:20 ln 20°C.
- 02 Probetas de vidrio "PYREX" No. 3022 TC 20°C.
- 03 Probetas de vidrio "KIMAX" Kimble Tol. ± 10.0 .
- 01 Wincha Métrica.
- 01 Cinta Masking Tape.
- 01 Rollo Stretch Film.
- 01 Vaso de precipitado de 250 mL.

- 01 Vaso de precipitado de 500 mL.
- 01 Pastilla magnética.
- 04 Cronómetros.
- 01 Balde de 20L.
- 01 Muestreador en copa de 1L.
- 10 gr. de Floculante Magnafloc BASF 336.
- 02 Jeringas de 1 mL.
- 02 Jeringas de 5 mL.

CAPÍTULO IV

MÉTODOLOGIA DE ANALISIS

Se conocen a nivel de laboratorio dos pruebas de sedimentación: prueba de sedimentación estática, y pruebas de sedimentación dinámicas. La diferencia en estas pruebas radica como lo dice su nombre, en el primero las pruebas son con condiciones fijas, y en el segundo se dan con condiciones dinámicas. En ese sentido las pruebas estáticas están definidas por solo una alimentación fija, y la dinámica por una alimentación continua, simulando así en esta última prueba resultados más reales de como ocurrirían en la planta concentradora.

En la presente tesis se realizó solamente pruebas de sedimentación estáticas, y mediante el método de la probeta graduada. Conforme se fueron avanzando en las pruebas se fueron modificando los parámetros, algunos se quitaron, mientras otros se agregaron y otros se variaron. Se explicará por que tales cambios más adelante.

Todas las pruebas se realizaron en el laboratorio metalúrgico, en primer lugar, era la toma de muestra directamente desde la planta concentradora, todos los días aproximadamente entre las 08:30 a 08:40 horas, las muestras fueron tomadas del concentrado final en la descarga del cajón muestreador, que va dirigido mediante tuberías al espesador de concentrado. En el laboratorio metalúrgico se disponía de dos tipos de cubetas de 10 l y 20 l de capacidad, en principio se tomaba 2 muestras de 7 a 8 cortes del muestreador en la cubeta de 10 l, por temas de seguridad y no acumular muestra en exceso, se cambió a

tomar de 11 a 12 cortes del muestreador en la cubeta de 20 l. El muestreador es de capacidad de 1 l aproximadamente, lo cual daba un volumen de 11 l a 12 l de muestra.

El porcentaje de sólidos inicial (%S) de la muestra se midió en campo en la planta concentradora, este se medía mediante la balanza Marcy al inicio de la toma de muestra y al final, luego se toma el promedio de ambos como referencia. Ya estando la muestra en el laboratorio metalúrgico se procede a homogenizarla, mediante una celda de flotación tipo Denver de la marca Metso, luego de un tiempo de 10 a 15 minutos, con un vaso de precipitado de 500 ml se va llenando probetas de 2 l, que se usará para las pruebas de sedimentación. El porcentaje de humedad se fue monitoreando para cada muestra según la medición que realiza el operador del área cada día a las 08:00 horas.

Las probetas de sedimentación utilizadas son de diferentes marcas: 02 probetas “SIMAX” Czech Republic 2000:20 ln 20°C, 02 probetas “PYREX” No. 3022 TC 20°C, y 03 probetas “KIMAX” Kimble Tol. ± 10.0 . Estas probetas fueron calibradas métricamente, esto es, fue colocada una cinta métrica la cual va desde los 0 cm hasta los 43 a 44 cm, pegada al lado de la escala en ml de la probeta. Esto será útil para al momento de tomar datos será necesario la altura en cm y el tiempo en segundos. Además, se midió el diámetro de cada probeta, para ser preciso se utilizó un vernier y en cada probeta el margen de variación entre una medida y otra era de ± 0.10 cm. Por lo tanto, se asumió un promedio de 7.7 cm de diámetro para las probetas.

La preparación de floculante se realiza en principio diariamente, pesando 0.1 gramos de floculante Magnafloc 336 BASF en una balanza digital, disuelto en 100 ml de agua, y mezclado mediante un agitador magnético. Posteriormente la preparación se realiza de la misma manera, con la variación que se preserva el floculante hasta uno o dos días siguientes, colocándole una luna de reloj que cubra la parte superior del vaso de precipitado. Luego de varios meses siguiendo este procedimiento, se deja de preparar floculante en laboratorio metalúrgico, para utilizar floculante que es adicionado

directamente hacia los espesadores, este floculante a utilizar se renueva diario previo a las tomas de muestras, véase Anexo I el punto de muestreo de floculante.

Adición de floculante se realiza con jeringas hacia la probeta ya homogenizada con la pulpa, dependiendo de la dosis y con esto la cantidad de volumen a utilizar de floculante, se selecciona la capacidad de la jeringa, para volúmenes pequeños se dispone de jeringas de 1 ml y 3 ml, y para volúmenes mayores capacidad de 5 ml y 20 ml. El método usado con jeringas y no con otros mecanismos de medición de volumen más precisos, es por cuestión de rapidez y maniobrabilidad para realizar las pruebas.

Medido la cantidad precisa de floculante, se procede a vaciar el floculante en la probeta de sedimentación, previamente habiendo homogenizado bien la muestra, para homogenizar la muestra dentro de la probeta se sella con stretch film y así evitar derrames, se comienza a mezclar suavemente e inmediatamente luego se vacía el floculante. Una vez que se observe homogéneo la muestra en la probeta, esta se para de mezclar y se coloca en vertical la probeta.

Apenas la probeta se encuentre verticalmente se acciona el cronómetro, habiendo anotado la altura inicial en centímetros (cm) en 0 segundos, se prosigue a anotar la altura a determinados tiempos, por ejemplo, cada 5 segundos, luego cada 1,3, 5 o 10 minutos, y luego cada hora. Los tiempos de sedimentación a determinar no son fijos, pues para alguna muestra tomada podría ser muy corto el tiempo y no se observe desplazamiento debido a la velocidad de sedimentación muy lenta, y para alguna otra muestra podría ser muy largo el tiempo, y no permita tomar la totalidad de datos, debido a la velocidad de sedimentación muy alta, de manera que estos tiempos en la toma de datos, se acomodan de acuerdo a las condiciones dadas al momento de la prueba. Pasadas 24 horas, es en ese momento que se da por finalizada la prueba, y de ahí se obtiene la altura final y con este se calculará el porcentaje de sólidos finales presentes en la probeta. Si es necesario se utiliza una linterna para poder observar la interfase de la zona de clarificación, respecto a la zona de transición.

Finalmente, el análisis de datos, para ello es necesario comprender que tipos de datos se obtienen, para ello se clasifica en tres tipos de datos: Primero, los datos medidos, estos son aquellos que se obtienen directamente por alguna medición, por ejemplo, en la balanza “Marcy” el porcentaje de sólidos iniciales, la altura en la probeta, el tiempo de las pruebas, etc. Segundo, los datos calculados, estos son aquellos que se obtienen a partir de los datos medidos, por ejemplo: el porcentaje de sólidos finales al final de la prueba, la velocidad de sedimentación, etc. Por último, los datos operacionales, estos son aquellos que el operador del área mide en horas específicas, y son usados a manera comparativa, por ejemplo: el porcentaje de sólidos inicial, la dosis de floculante, etc.

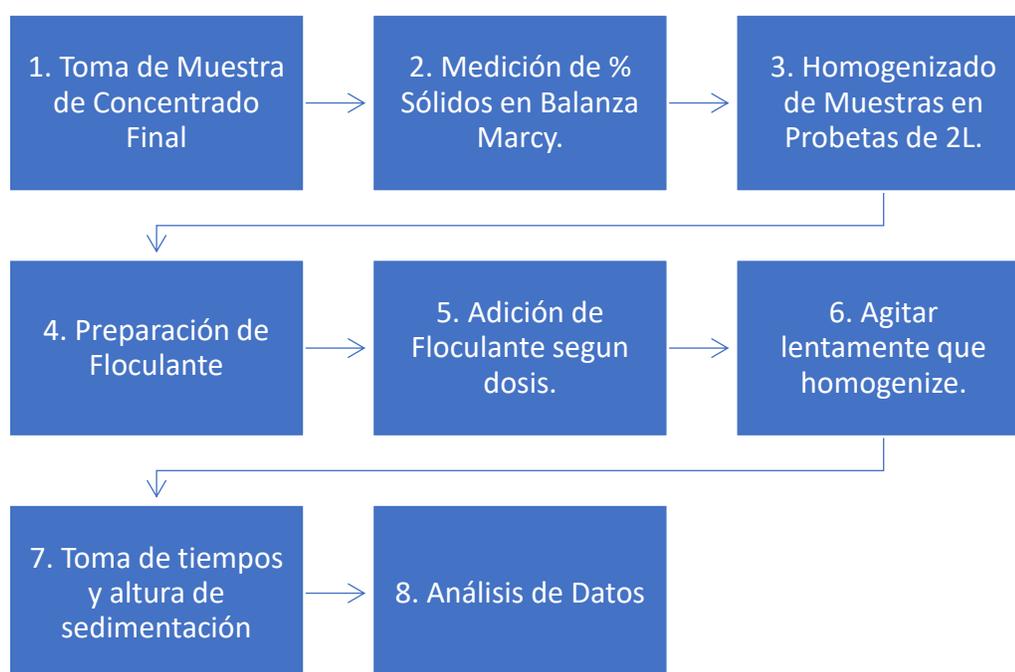


Figura 4.1 Esquema del procedimiento seguido para las pruebas de sedimentación.

Fuente: Elaboración propia

4.1 Método de la prueba graduada

El método convencional de probeta graduada (Andrew and Lenore, 1996) se utiliza para determinar las características de sedimentación de pulpa en aguas residuales. Con la obtención de las características de la pulpa, se puede calcular las áreas requeridas

por los sedimentadores, de tal manera que se facilite el proceso de floculación-sedimentación, sin embargo, se presenta el problema de que los resultados para la sedimentación no son los mismos para una misma muestra de aguas residuales.

El procedimiento para este método consistió en poner una muestra fresca de pulpa en una probeta de 2000 ml y luego, cada 5 segundos durante los primeros 2 minutos y después cada 15 segundos durante otros 2 minutos, luego el tiempo es variable, cada 30, 60, 120 o más segundos de acuerdo con cómo se observe el descenso de la altura de los sólidos, se marcó sobre la probeta la altura que tenía la columna de pulpa que estaba sedimentando. Se consideró como punto de partida para la altura inicial la línea de 2000ml de la probeta.

Posteriormente con los datos de altura y tiempo, se trazó una gráfica empleando el programa de EXCEL, en la que la ordenada es la altura h en centímetros de la columna formada por los sólidos y el eje de las abcisas es el tiempo en minutos. La gráfica que se obtuvo es similar a la presentada en la Fig. 7 curva de sedimentación y ésta, se utilizó para obtener la velocidad de sedimentación de pulpa en cm/min (la velocidad se obtendrá con la pendiente de la recta como se muestra en la Fig. 8 velocidades de sedimentación según método de Coe-Clevenger (Véase anexo L).

4.2 Cálculo de Porcentaje de sólidos

La manera de calcular el porcentaje de sólidos es con la balanza Marcy, la cual se llena una copa hasta un volumen de 1000 cm³ (1L), o en su defecto hasta comience botar pulpa por unos agujeros de la copa. Se muestra en la Figura de el método de la balanza Marcy.

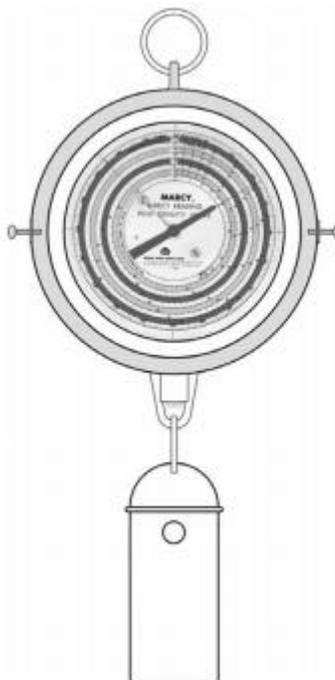


Figura 4.2 Balanza Marcy para medición de porcentaje de sólidos

Fuente: Google Images

Se propone una nueva manera de calcular los porcentajes de sólidos iniciales en la probeta, de manera que sean más reales que los medidos mediante la balanza Marcy. Como se observa en la tabla del Anexo H a manera de ejemplo utilizando Magnafloc en la descripción. Los datos coloreados de azul son datos obtenidos manualmente mediante pesaje, tanto de la probeta vacía como de la probeta con pulpa hasta alcanzar un volumen de 2000 ml (capacidad de la probeta). Se conoce la densidad del agua igual a 1 g/cm^3 y se asume una densidad de concentrado igual a 4 g/cm^3 . Los datos sombreados de rojo son obtenidos mediante cálculos de los datos anteriores.

4.3 Preparación de floculante

4.3.1 En planta concentradora

En la planta concentradora el tanque preparación tiene las dimensiones mostradas en Anexo D, de manera que se calcula el volumen ocupado de este

de floculante. Luego de este tanque pasa a un tanque de distribución. Es de aquí que alimenta a la línea de tubería para la dosificación hacia espesador de concentrado y jales, sumado a otra línea de tubería de agua para diluir la concentración de floculante.

4.3.2 En laboratorio metalúrgico

Se prepara floculante Magnafloc 336 BASF al 0.1%, es decir 0.1g de floculante en 100ml de agua, esto se pesa en una balanza analítica para luego colocar el floculante y agua en un vaso de precipitado de 250ml. Esto se mezcla y disuelve con un agitador magnético durante un tiempo entre 30 minutos a 1 hora. Finalmente, se tiene ya el floculante al 0.1% listo para usar.

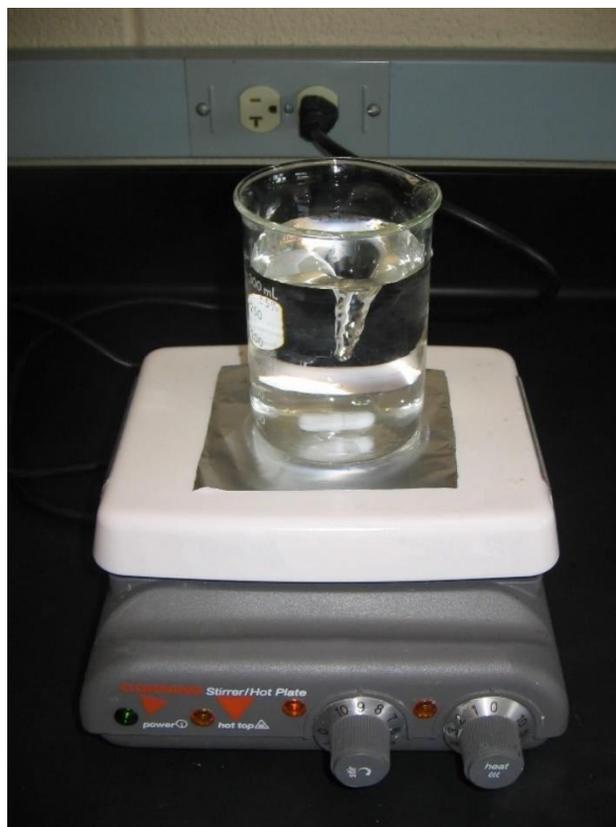


Figura 4.3 Preparación floculante en agitador magnético
Fuente: Google Images

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1 Sedimentación

Se tiene una gran cantidad de información y datos mientras duraron las pruebas de sedimentación (376 datos), todos estos datos se agrupan según la relevancia y correlación mediante graficas. En las pruebas se tienen tres tipos de datos: medidos, calculados y operacional, estos se han detallado en el capítulo anterior Metodología de Análisis. En las gráficas que se muestran en este capítulo, se buscará una relación de aquellos parámetros que lleven a obtener los mejores resultados de porcentaje de sólidos finales. Así mismo como interrelacionar todos aquellos parámetros mediante alguna tabla.

El beneficio de aumentar los sólidos finales en la descarga del espesador, es en primer lugar beneficiar directamente la siguiente etapa del proceso en la planta concentradora (filtración de concentrado), y con ello tener controlado el porcentaje de humedad dentro de un rango aceptable; en segundo lugar es disminuir el consumo de floculante y con ello reducir el costo en operación, y por último aumentar la recuperación de agua la cual se envía a recircular, para compensar la alta demanda de agua dentro de la planta concentradora. Cabe resaltar para los cálculos de la recuperación de agua se considera una producción de 3000 t/d, y producción de concentrado de 80t/d. Esto da un ratio de concentración de 37.5 y alimentación de 125 t/h de mineral fresco.

En la figura 12 se muestran los más de 300 datos obtenidos de las pruebas de sedimentación a diferentes condiciones, observando claramente dos tendencias agrupadas: La primera superior a los 10 g/t y la siguiente inferior a 3 g/t. Lo cual de estos la segunda tendencia da resultados más favorables de % sólidos finales altos, estos se ven reflejado en la figura 13 en la cual los resultados no se observan tan dispersos. Se evalúa la velocidad de sedimentación de la figura 15, la cual no favorece ni valores muy bajos ni tampoco muy altos, una relación de tendencia lineal se encuentra al graficar en porcentaje los sólidos iniciales y los sólidos final como en la figura 16. Se evalúa también la granulometría y ley de concentrado como se grafica en la figura 17 y 18, sin observarse alguna correlación diferenciada entre estos. Finalmente, en la figura 19 se representa los parámetros más relevantes de velocidad vs dosis y velocidad vs sólidos inicial.

La inspección visual al culminar la prueba es muy importante, pues el floculante presenta varias características, una de ellas que se considera importante es el aspecto o consistencia de los sólidos finales compactados, viendo dos casos extremos: el caso menos favorable que en la superficie de los sólidos compactados se observen los flocs con bastantes espacios vacíos, da la impresión de que presentan agujas o formas aciculares, y por otro lado el caso más favorable que se observe bien compacta la superficie de los sólidos compactados, da la impresión de ver arena compactada. Estas características están asociadas a la cantidad de floculante empleado en la prueba; además de la inspección visual, también está el tacto, pues la textura y consistencia del floculante es particularmente viscoso; y al estar presente con el concentrado final genera distintos tipos de texturas. Estas observaciones no se encuentran al detalle en la presente tesis, pero pueden ser considerados en futuras investigaciones.

Además de la inspección visual en la zona de compactación, es necesario observar la zona de espumas, pues esta logra influenciar en la velocidad de sedimentación de la prueba, y con esto logra afectar los resultados finales de porcentaje de sólidos, además la cantidad de dosis de floculante resulta ineficiente, estas espumas se forman debido

a principalmente el exceso de finos, es decir, la granulometría superior a 90%-m200. Y también exceso de espumante en la etapa de flotación. Esto se detalla en Anexo K.

Se hacen las pruebas con nuevo floculante para concentrado, de proveedor “Proveedor Anónimo”, utilizando una dosis de 0.5 g/t y una concentración de 0.55% se hace los cálculos necesarios para la cantidad de floculante a utilizar en ml. Los resultados se muestran en la tabla en el Anexo F.

También se hacen las pruebas con nuevo floculante para jales, de proveedor “Proveedor Anónimo”, utilizando una dosis de 31 g/t y una concentración de 0.1% se hace los cálculos necesarios para la cantidad de floculante a utilizar en ml. Los resultados se muestran en la tabla en el Anexo G.

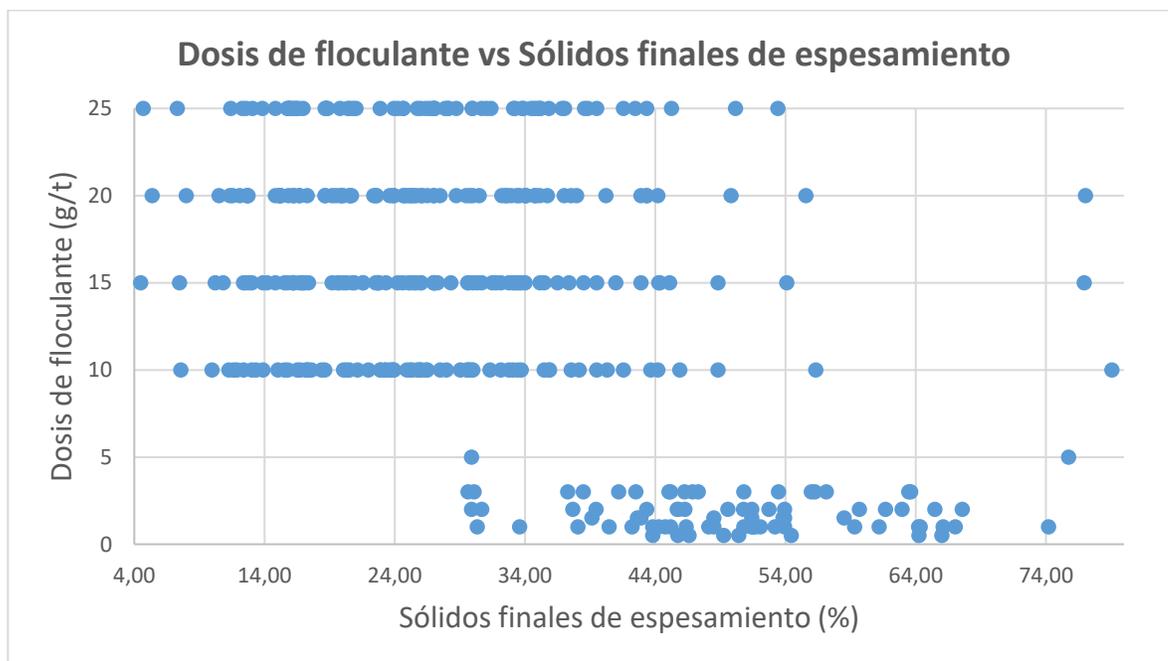


Figura 5.1 Porcentaje sólidos finales versus dosis de floculante

Fuente: Elaboración propia

La figura 5.1 muestra todos los resultados de las 376 pruebas realizadas durante Marzo a Septiembre de 2019, de esto se tiene:

- Con bajas dosis de floculante se obtiene mejores y más altos los resultados de % sólidos final respecto a dosis muy altas por encima de 10 g/t, ya que a esta dosis muchos resultados se encuentran por <30% sólidos final.

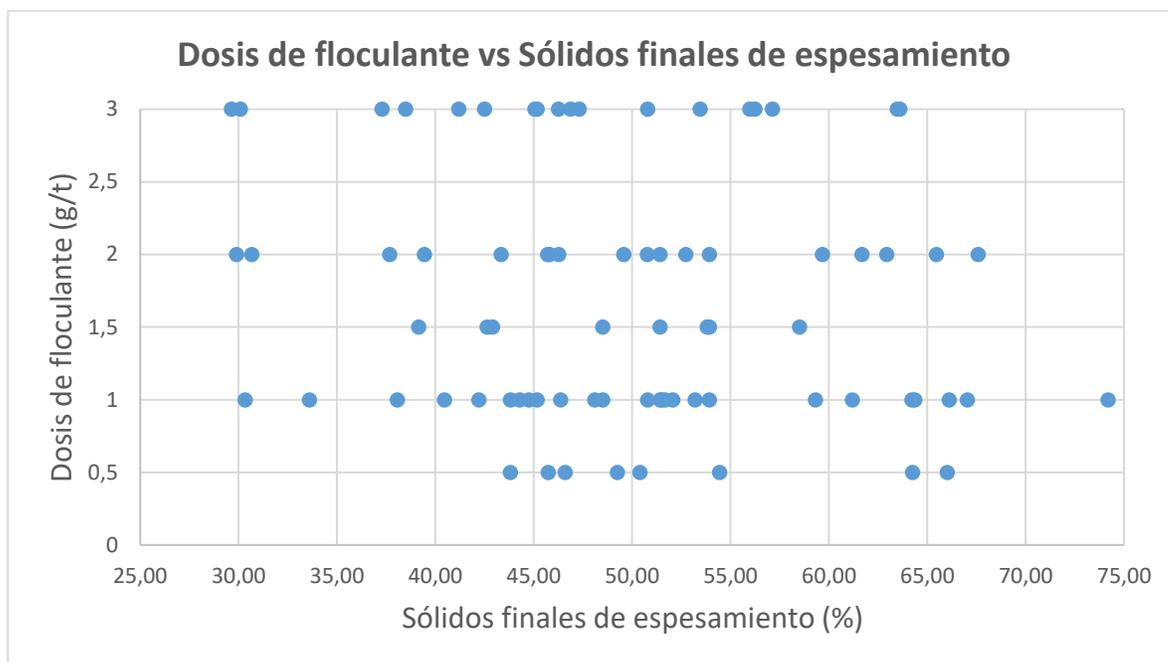


Figura 5.2 Dosis de floculante versus sólidos finales de espesamiento

Fuente: Elaboración propia

La figura 5.2 es el mismo que el de la figura 5.1 con los datos filtrados en porcentaje de sólidos de 25% mínimo a 75% máximo y en dosis de floculante mínimo 0 g/t y máximo 3g/t. El gráfico muestra:

- Usando dosis de 0.5 g/t se tienen resultados por encima de 43% sólidos final y conforme aumentamos la dosis de floculante esta va disminuyendo a cantidades <40% sólidos final.

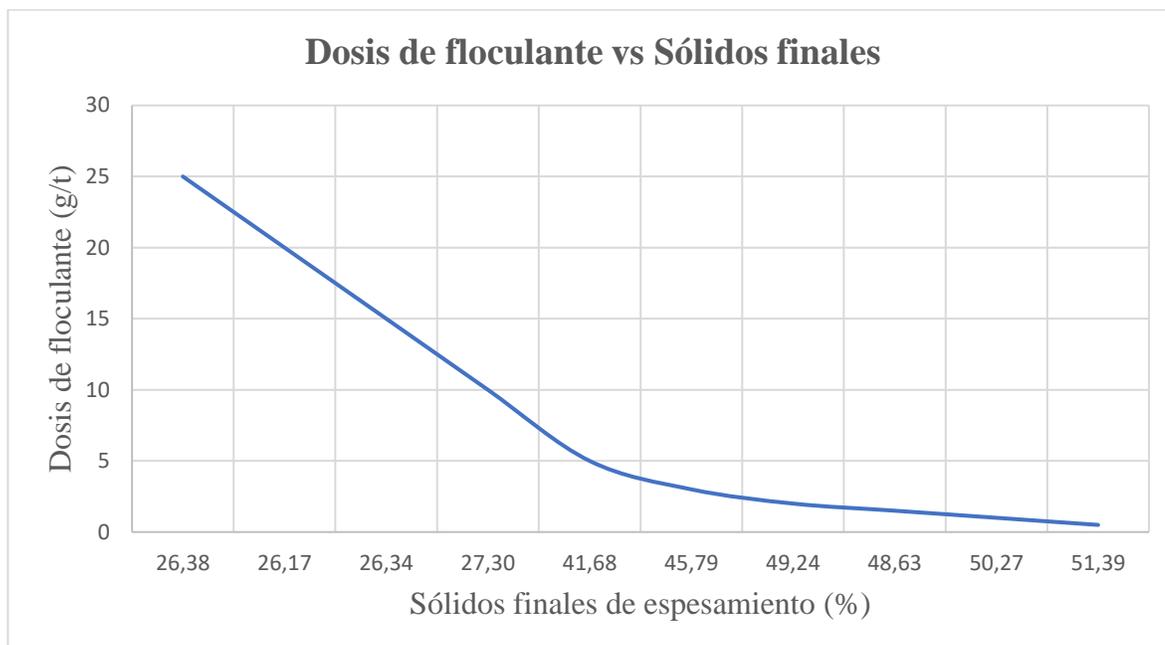


Figura 5.3 Dosis de floculante versus sólidos finales de espesamiento

Fuente: Elaboración propia

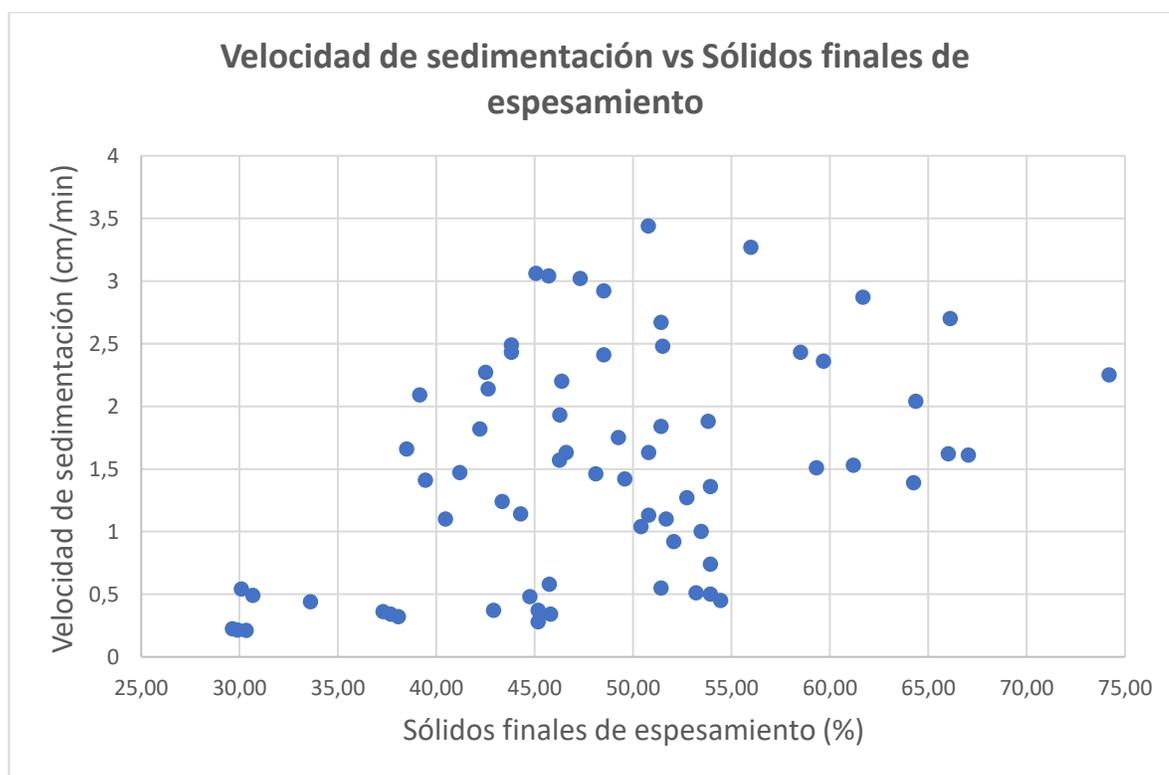
En la figura 5.3 se tiene que la dosis de floculante es un indicador de la variable independiente, por ello en el laboratorio se hacen pruebas con dosis de 25, 20, 15, 10, 5, 3, 2, 1,5, 1 y 0,5 g/t, el gráfico toma como datos el promedio de todos los sólidos finales en porcentaje para cada dosis de floculante mencionada anteriormente. En el Anexo E se muestran pruebas de sedimentación evaluando el exceso de la dosificación de floculante. El gráfico 5.3 muestra:

- Utilizando altas dosis de floculante el porcentaje de sólidos finales es bajo, mientras que conforme va disminuyendo la dosis de floculante en g/t, el porcentaje de sólidos finales de espesamiento va aumentando progresivamente.

Tabla N°5.1 Datos de dosis de floculante y promedio de sólidos finales de todas las pruebas.

| Dosis (g/T) | % Sólidos Finales |
|-------------|-------------------|
| 25 | 26.38 |
| 20 | 26.17 |
| 15 | 26.34 |
| 10 | 27.30 |
| 5 | 41.68 |
| 3 | 45.79 |
| 2 | 49.24 |
| 1.5 | 48.63 |
| 1 | 50.27 |
| 0.5 | 51.39 |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 5.4** Porcentaje de sólidos final versus velocidad de sedimentación

Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.4 filtra los datos para dosis de floculante de 0 a 3 g/t, obteniendo velocidades de sedimentación desde 0.21 hasta 9.08 cm/min, siendo la mayor densidad de datos entre

0.21 a 3.44 cm/min, por ello se coloca el rango de velocidad de 0 a 4 cm/min. El gráfico muestra:

- Cuando los sólidos finales son $>55\%$ dan en el rango de entre 1.5 a 3 cm/min.

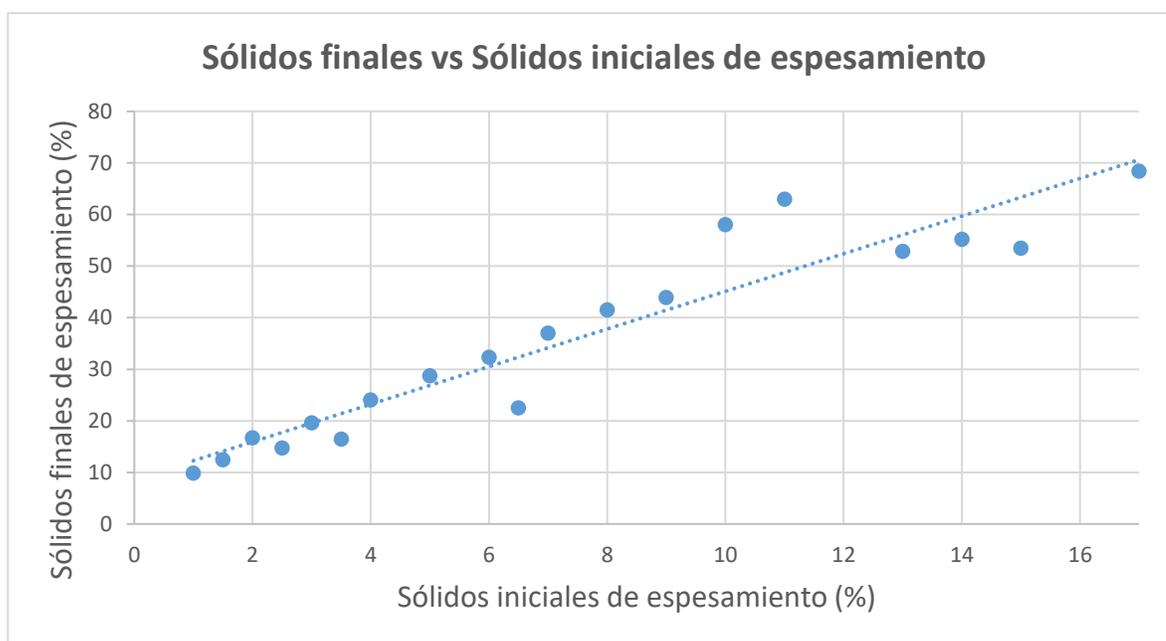


Figura 5.5 Porcentaje de sólidos inicial versus porcentaje de sólidos final
Fuente: Elaboración propia

La figura 5.5 muestra para cada porcentaje de sólido inicial, se promedia todos los valores del porcentaje de sólidos finales obtenido de las pruebas de sedimentación, de esto se tiene:

- Una tendencia lineal del porcentaje de sólidos inicial versus el porcentaje de sólidos final, es decir, una relación directa de a mayor porcentaje de sólidos inicial, mayor el porcentaje de sólidos final al final de la prueba de sedimentación.

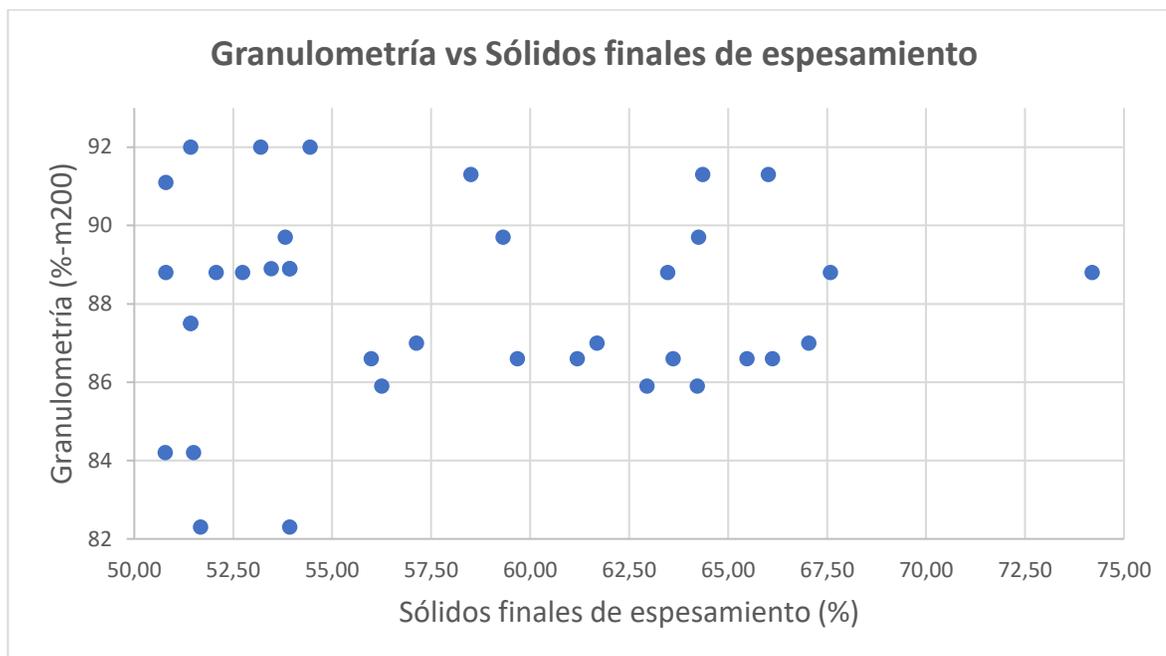


Figura 5.6 Porcentaje de sólidos final versus granulometría

Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.6 se muestra la granulometría correspondiente a cada porcentaje de sólidos final, esta granulometría es dada por laboratorio metalúrgico al final de cada turno, siendo un compósito acumulado durante el turno y no una granulometría puntual, esta granulometría es usada a manera de referencia, siendo más representativo realizarlo de manera puntual. De figura 5.6 se tiene:

- Porcentaje de sólidos final <60% presentan algunas granulometrías finas, sin embargo, en su mayoría también se encuentran en el rango de 86% a 89% en %-m200, inclusive en valores de granulometría muy gruesa 82% a 84% en %-m200.
- Sólidos finales >60% están asociados a granulometrías gruesas entre 86 a 89%-m200.

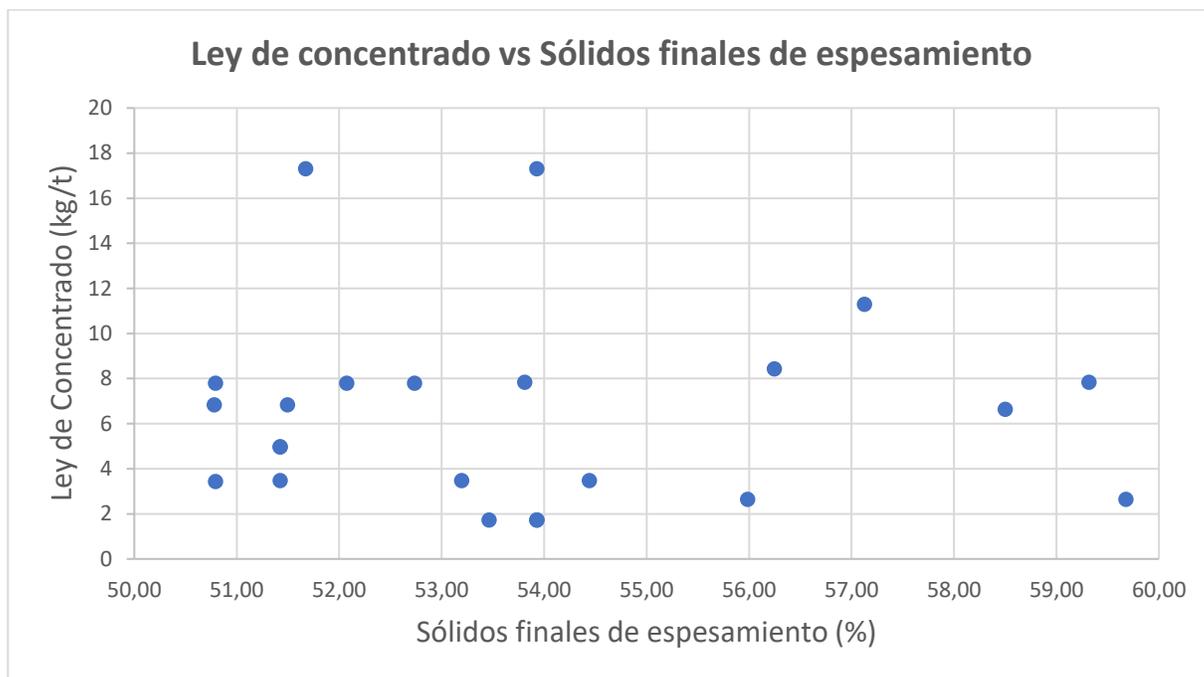


Figura 5.7: Porcentaje de sólidos final versus ley de concentrado

Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.7 se muestra la ley de concentrado correspondiente a cada porcentaje de sólidos final, esta ley es dada por laboratorio químico en muestras puntuales, esta es reportada a las 7:00 y es el dato usado, de esto se tiene:

- La ley de concentrado es muy variable tanto para valores altos como bajos en porcentaje de sólidos final, inclusive para valores <55% presenta picos de alta ley de concentrado (17 kg/t).

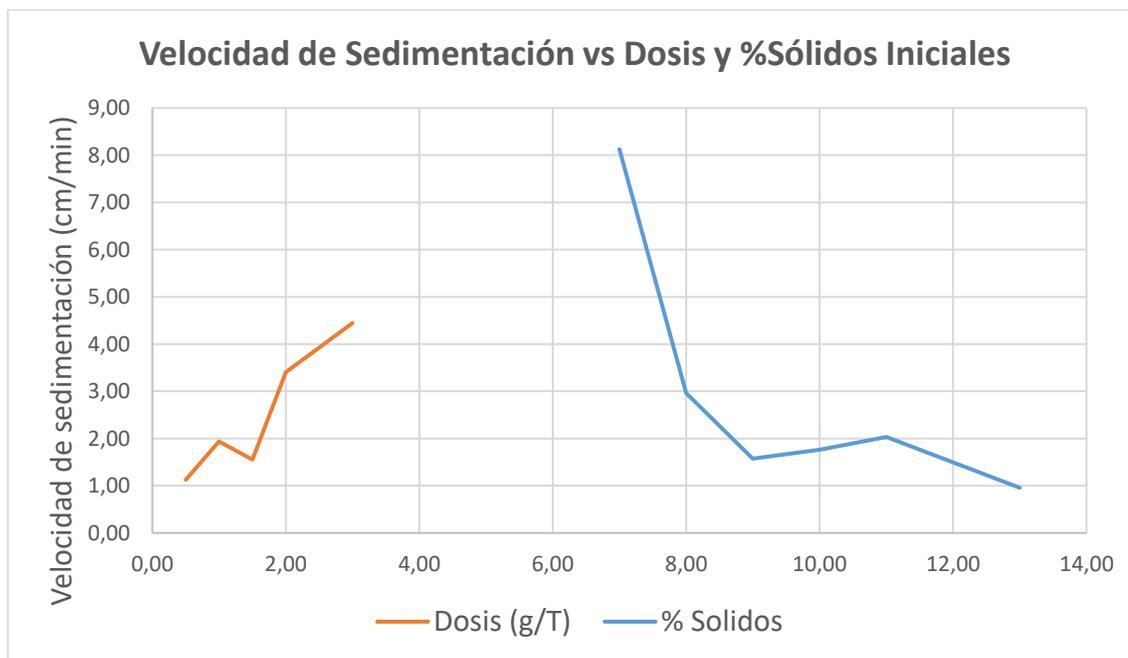


Figura 5.8 Velocidad de sedimentación versus dosis flocculante – porcentaje sólidos inicial
Fuente: Elaboración propia

La figura 5.8 muestra dos curvas, la primera curva roja para cada dosis de flocculante, se promedia todos los valores de la velocidad de sedimentación, y la segunda curva azul, para cada porcentaje de sólidos inicial, se promedia todos los valores de la velocidad de sedimentación, de esto se tiene:

- La curva roja primero incrementa para luego reducirse en 1.5 g/t de dosis de flocculante, y posteriormente incrementa en 2 g/t y 3 g/t. Así mismo en la curva azul, se observa la tendencia de la velocidad va disminuyendo conforme va aumentando el porcentaje de sólidos inicial.

5.2 Filtración

El indicador más importante en la etapa de filtración es el porcentaje de humedad, en tal sentido se buscará correlacionar este indicador con los parámetros más resaltantes del espesamiento, estos parámetros vienen a ser 03: Sólidos finales de espesamiento (%), Sólidos de alimentación al espesamiento (%), y dosis de flocculante (g/t).

Para la correlación de los parámetros se utiliza la base de datos de operación, la cual se registra diariamente en el programa de Microsoft Excel y por turno de 12 horas (Turno A y Turno B), para la investigación se utilizan datos de operación desde el 01 de Enero del 2019 hasta el 30 de Noviembre del 2020.

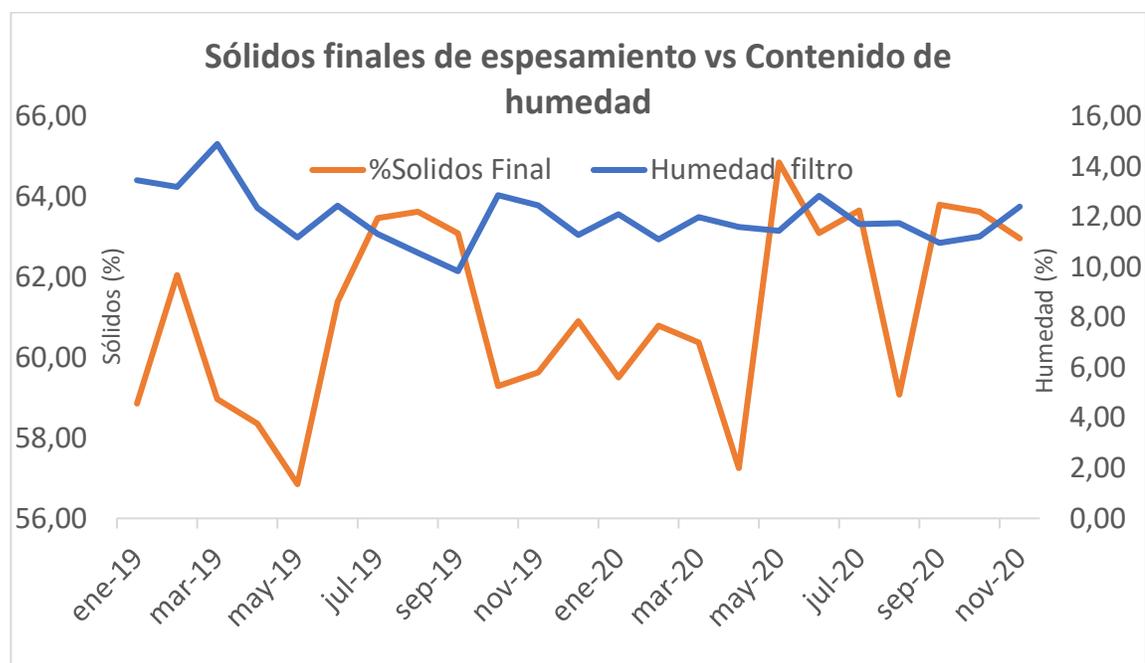


Figura 5.9 Correlación entre sólidos finales de espesamiento y humedad del concentrado
Fuente: Elaboración propia

El anterior gráfico muestra datos desde Enero del 2019 hasta Noviembre del 2020, se muestran dos curvas, una curva roja que corresponde a los sólidos finales de espesamiento (%), y la curva azul a la humedad del concentrado medida en el filtro tipo prensa (%). Del gráfico se tiene:

- De Julio a Septiembre de 2019 porcentaje de sólidos finales mayores a 63% reportan humedades de 11.31%, 10.57% y 9.84%.

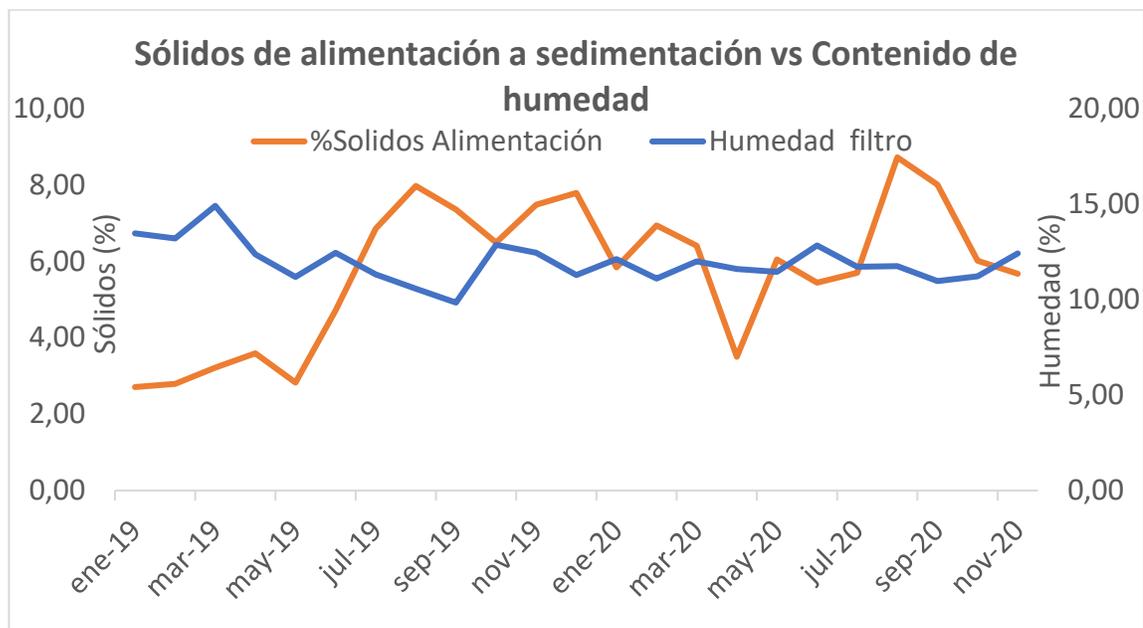


Figura 5.10 Correlación entre sólidos de alimentación al espesamiento y humedad del concentrado

Fuente: Elaboración propia

El anterior gráfico muestra datos desde Enero del 2019 hasta Noviembre del 2020, se muestran dos curvas, una curva roja que corresponde a los sólidos de alimentación al espesamiento (%), y la curva azul a la humedad del concentrado medida en el filtro tipo prensa (%). Del gráfico se tiene:

- De Julio a Diciembre de 2019 porcentaje de sólidos de alimentación mayores a 6% y menores a 8% reportan humedad en promedio de 11.39%.

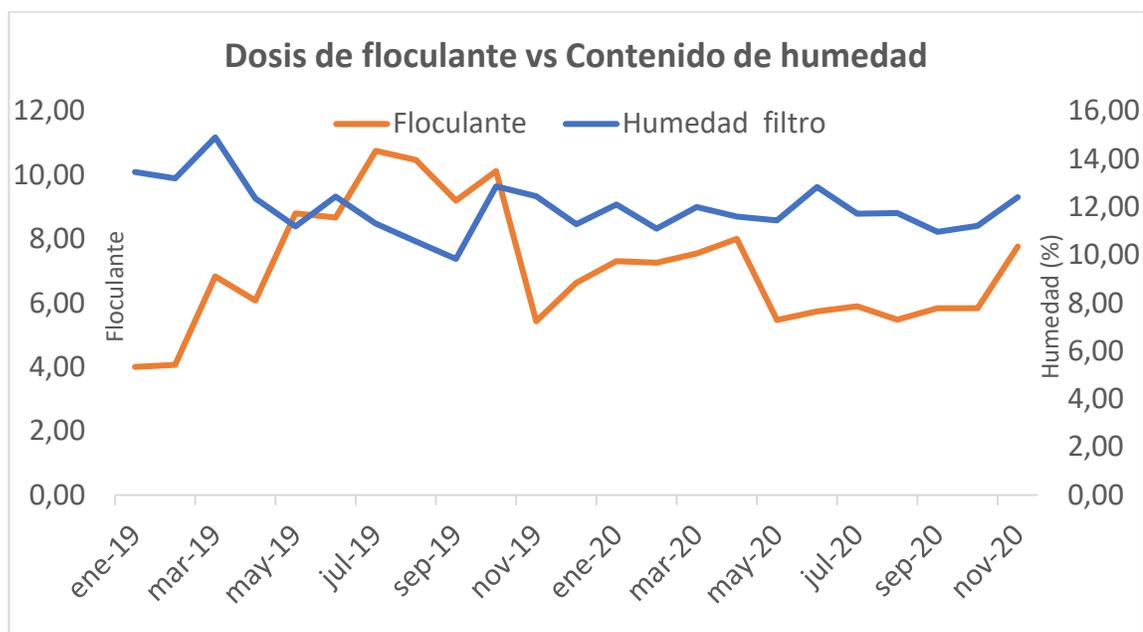


Figura 5.11 Correlación entre dosis de floculante y humedad del concentrado
Fuente: Elaboración propia

El anterior gráfico muestra datos desde Enero del 2019 hasta Noviembre del 2020, se muestran dos curvas, una curva roja que corresponde a la dosis de floculante (g/t), y la curva azul a la humedad del concentrado medida en el filtro tipo prensa (%). Del gráfico se tiene:

- A inicio de año dosificación baja de floculante (4L/min) dan como resultado humedades altas de 13.45% y 13.20%.
- Si se mantuviera una dosificación óptima de 6 L/min a 8 L/min de floculante (0.42 g/t a 0.94g/t), mientras otras veces se dosifica desde los 8 L/min hasta los 14 L/min (0.94 g/t a 2.48 g/t), esto representaría un ahorro desde los 2 L/min hasta los 6 L/min (0.52 a 1.54 g/t), lo cual representa un ahorro desde 1.6 kg de floculante hasta los 4.8 kg de floculante por día, si es expresado en porcentaje se ahorra hasta los casi 30% el consumo de floculante por turno.

CAPÍTULO VI

ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Sostenibilidad

6.1.1 Sostenibilidad en espesamiento de concentrado

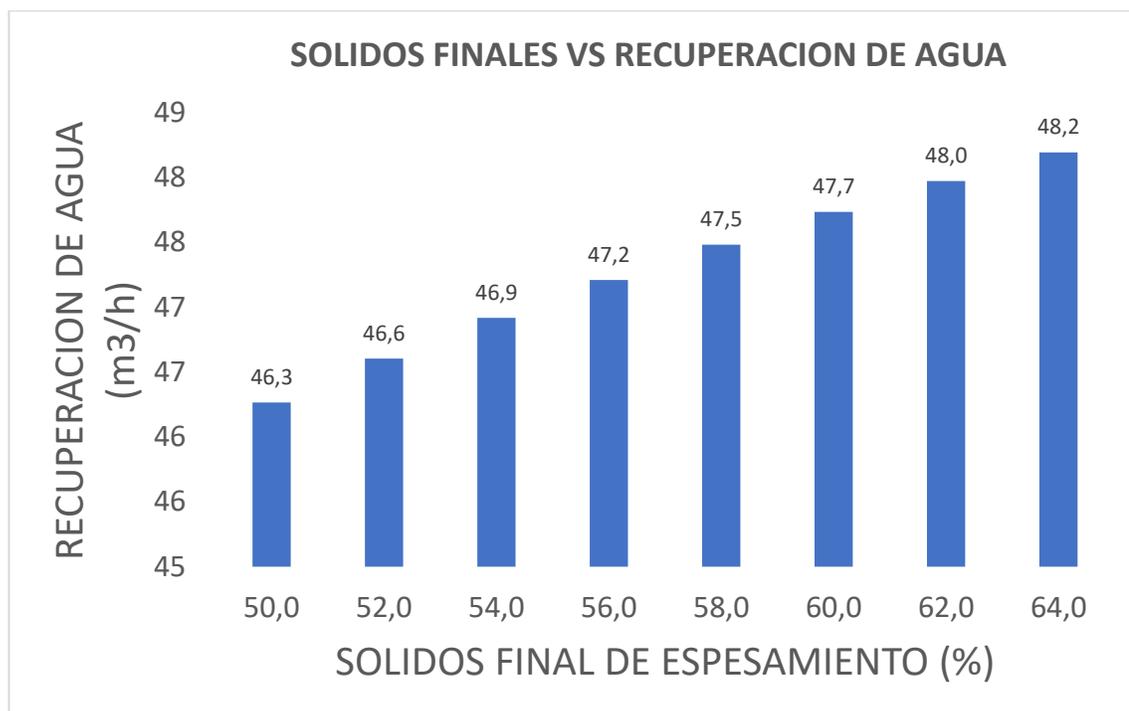
La sostenibilidad va enfocada a recuperar mayor cantidad de agua, y reutilizarlo en el proceso, manteniendo el compromiso de la empresa a ser amigable con el medio ambiente, y poniendo en práctica el desarrollo sostenible.

Para representar la recuperación de agua, se toman los mejores resultados de porcentaje de sólidos finales de las pruebas de sedimentación del concentrado, todos con la dosis de 0.5 g/t de floculante. Para los cálculos se asume un porcentaje de sólidos inicial, el tonelaje por hora producido de concentrado según el balance metalúrgico mensual. Esto según se muestra en la tabla N°6.1 y de ello se gráfica los sólidos finales en porcentaje versus la recuperación de agua en m³/h como se muestra en la figura 6.1.

Tabla N°6.1 Datos de sedimentación de concentrado.

| SEDIMENTACIÓN CONCENTRADO | | | | | | |
|---------------------------|------------|----------|--------------|-----------|------------|-------------------|
| # | %S Inicial | %S Final | m3/h | t/h Jales | m3/h | Recuperación Agua |
| | | | QH2O inicial | | QH2O final | |
| 1 | 8 | 50 | 50.67 | 4.4 | 4.41 | 46.3 |
| 2 | 8 | 52 | 50.67 | 4.4 | 4.07 | 46.6 |
| 3 | 8 | 54 | 50.67 | 4.4 | 3.75 | 46.9 |
| 4 | 8 | 55 | 50.67 | 4.4 | 3.61 | 47.1 |
| 5 | 8 | 56 | 50.67 | 4.4 | 3.46 | 47.2 |
| 6 | 8 | 58 | 50.67 | 4.4 | 3.19 | 47.5 |
| 7 | 8 | 60 | 50.67 | 4.4 | 2.94 | 47.7 |
| 8 | 8 | 62 | 50.67 | 4.4 | 2.70 | 48.0 |
| 9 | 8 | 64 | 50.67 | 4.4 | 2.48 | 48.2 |

Fuente: Elaboración propia

**Figura 6.1** Recuperación de agua en el espesador de concentrado

Fuente: Elaboración propia

Se muestra en la gráfica anterior a distintos porcentajes de sólidos finales de espesamiento, cuanto de agua es posible recuperar. Al aumentar 2% de sólidos finales en el espesamiento

de concentrado se aumenta 0.3 m³ de agua, y la etapa de molienda consume alrededor de 285 m³/h.

6.1.2 Sostenibilidad en espesamiento de relave

Así como se realiza el análisis de sostenibilidad para recuperación de agua en el espesamiento de concentrado, también se realiza una estimación para representar la recuperación de agua en el espesamiento de relave, se toman varios resultados de porcentaje de sólidos finales y un valor fijo como porcentaje de sólidos inicial, todos con la dosis de 0.5 g/t de floculante. Para los cálculos se asume el tonelaje por hora general menos el tonelaje por hora del concentrado y de ello resulta el tonelaje producido por hora de relave. Esto según se muestra en la tabla del anexo J y de ello se calcula en m³/h de recuperación de agua y se gráfica los sólidos finales en porcentaje versus la recuperación de agua en m³/h como se muestra en la gráfica del anexo J. De tal gráfico se observa que al aumentar cada 2% sólidos, se logra recuperar 7 m³/h más de agua.

6.1.3 Sostenibilidad en agua recuperada

Se realizan pruebas para simular la recuperación de agua en dos pruebas de sedimentación: En una prueba con dosis de floculante de 3g/t y en la otra prueba de 1g/t. En ambas pruebas se recupera 1L de agua y se utiliza esta agua en otra prueba con pulpa de 1L.

En el Anexo E se muestra en la primera tabla los resultados para la prueba con dosis de 3g/t, mostrando que se obtiene velocidad de sedimentación de 5.14 cm/min y 64.45 porcentaje de sólidos finales, en cambio al utilizar el agua recuperada de la prueba se aumenta el porcentaje de sólidos finales a 67.58% y la velocidad disminuye a 4.14 cm/min. Esto evidencia presencia de exceso de floculante en la prueba de sedimentación, de manera que al recuperar el

agua todavía queda remanente de floculante, lo cual actúa de manera más eficiente al obtener mejor resultado de porcentaje de sólidos finales.

En la segunda tabla están los resultados para una prueba de sedimentación con 1g/t de dosis de floculante, además se hace una prueba de sedimentación natural sin floculante, esta prueba es la de más bajos resultados en términos de velocidad de sedimentación y sólidos finales, luego con una prueba de sedimentación a 1g/t estos valores mejoran, y al recuperar el agua de la probeta para utilizarlo en otra prueba los resultados disminuyen, siendo la velocidad de sedimentación menor inclusive que la prueba estándar. Esto indica que la dosificación es adecuada y al utilizar el agua recuperada no evidencia remanente de floculante.

6.2 Evaluación Económica

La evaluación económica se realiza con un objetivo de 64% de sólidos finales de espesamiento, y alcanzando un porcentaje de humedad que sea menor a 10%. En la etapa de espesamiento el costo directo es el reactivo floculante (Magnafloc 336), este ahorro resulta de 4,879 US\$/año para un ahorro de 4L/min, principalmente encontrando una dosis de floculante óptima que es menor al consumo diario promedio.

Tabla N°6.2 Costo floculante en sedimentación de concentrado

| COSTO FLOCULANTE CONCENTRADO | | | | | |
|------------------------------|-------------------------|-------------------|------------------|-----------------|----------------|
| Floculante l/min | Precio floculante \$/kg | Concentración g/l | Floculante g/min | Floculante kg/d | Precio USD/año |
| 1 | 4.4 | 0.55 | 0.55 | 0.792 | 1219.7 |
| 2 | 4.4 | 0.55 | 1.10 | 1.584 | 2439.4 |
| 3 | 4.4 | 0.55 | 1.65 | 2.376 | 3659.0 |
| 4 | 4.4 | 0.55 | 2.20 | 3.168 | 4878.7 |
| 5 | 4.4 | 0.55 | 2.75 | 3.96 | 6098.4 |
| 6 | 4.4 | 0.55 | 3.30 | 4.752 | 7318.1 |
| 7 | 4.4 | 0.55 | 3.85 | 5.544 | 8537.8 |
| 8 | 4.4 | 0.55 | 4.40 | 6.336 | 9757.4 |
| 9 | 4.4 | 0.55 | 4.95 | 7.128 | 10977.1 |
| 10 | 4.4 | 0.55 | 5.50 | 7.92 | 12196.8 |
| 11 | 4.4 | 0.55 | 6.05 | 8.712 | 13416.5 |
| 12 | 4.4 | 0.55 | 6.60 | 9.504 | 14636.2 |
| 13 | 4.4 | 0.55 | 7.15 | 10.296 | 15855.8 |
| 14 | 4.4 | 0.55 | 7.70 | 11.088 | 17075.5 |

Fuente: Elaboración propia

Como costos indirectos se encuentran las refacciones, la renta de maquinaria, y el costo de manipulación:

Las refacciones comprenden las etapas de espesamiento y de filtración, siendo el ahorro en la primera por piezas como: rodamientos, sellos, revestimientos de las bombas; y en la etapa de filtración por mayor tiempo de vida de las lonas y placas.

En la maquinaria está comprendido la renta de retroexcavadora, la cual opera de manera fija en el patio de concentrado (el patio de concentrado es una inversión realizada para poder extender el concentrado y se pueda orear al medio ambiente, sin embargo, los resultados dependen mucho de las condiciones climáticas).

La manipulación de concentrado es realizada con un cargador frontal en el mismo puerto en un espacio al aire libre, generalmente se realizan dos planchados y un extendido para una humedad de 12.0% en el concentrado reducirla a 9.0%, el

planchado esta referido a romper los grumos y el extendido a extender el concentrado al sol. El precio por tonelada de esta maniobra resulta de 3.42 US\$.

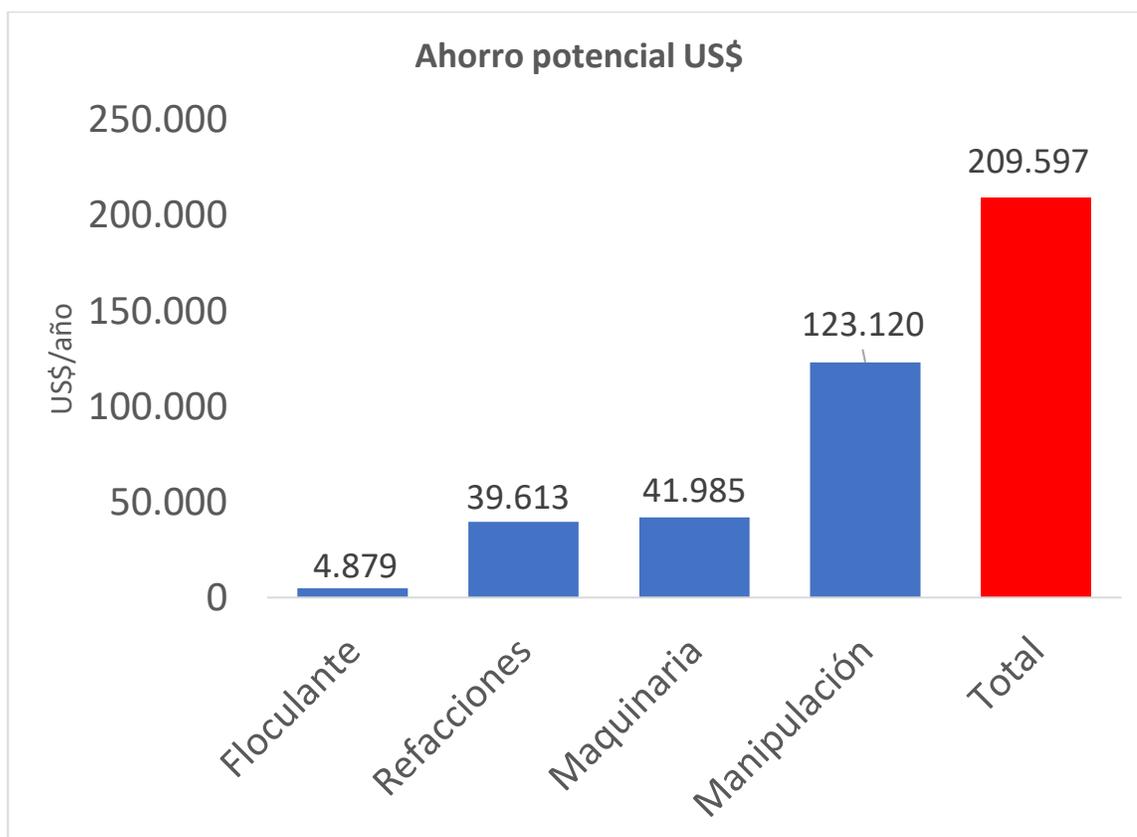


Figura 6.2 Ahorro potencial en US\$/año
Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- Se determinan los parámetros que van mayormente relacionados al porcentaje de sólidos finales de sedimentación: La dosis y concentración de floculante como indicadores independientes, el porcentaje de sólidos finales de espesamiento como indicador dependiente, el porcentaje de sólidos iniciales como indicador alternativo y la velocidad de sedimentación como un indicador de laboratorio.
- El porcentaje de sólidos finales es un indicador para la optimización del espesamiento de concentrado, este porcentaje depende en gran medida de la dosis de floculante que se adicione, mientras más baja es la dosificación de floculante que se utiliza, es mayor el porcentaje de sólidos finales del concentrado (Figura 5.3), con esto al no usar un exceso de floculante, se beneficia la sedimentación y compactación del concentrado.
- Una dosificación de 0.5 g/t a 0.9 g/t de floculante al espesador de concentrado, que es aproximadamente 6 L/min a 8 L/min para 130 t/h a 140 t/h de producción, es donde se obtienen los mejores resultados en las pruebas, con esto se reduciría el consumo de floculante.
- Cuando el porcentaje de sólidos finales de sedimentación son mayores a 55%, las velocidades de sedimentación se encuentran en el rango de 1.5 a 3 cm/min (Figura 5.4).
- Se tiene una relación directa entre el porcentaje de sólidos iniciales de sedimentación y porcentaje de sólidos finales de sedimentación, es decir, a mayor porcentaje de

sólidos iniciales de sedimentación, mayor es el porcentaje de sólidos finales de sedimentación. (Figura 5.5).

- No se encuentra una relación directa entre porcentaje de sólidos finales de espesamiento con la granulometría %-m200 (Figura 5.6), así mismo como el porcentaje de sólidos finales de espesamiento con la ley de concentrado (Figura 5.7), pues no siguen una tendencia, para valores bajos y valores altos de porcentaje de sólidos final, presenta mucha dispersión los valores de granulometría y de ley de concentrado. Por lo tanto, no es representativo tomar como parámetros granulometría y ley de concentrado.
- De la figura 5.8 tomando promedio de las velocidades de sedimentación (cm/min) se tienen 02 gráficas, primero para determinadas dosis de floculante en (g/t), a mayores dosis de floculante se incrementa la velocidad de sedimentación, y segundo para el porcentaje de sólidos iniciales, a mayores valores de porcentaje de sólidos iniciales la velocidad de sedimentación va disminuyendo.
- Por cada 4.0% de sólidos finales de sedimentación de concentrado que se logra aumentar, por ejemplo, de 58% hasta 62% serían 0.5 m³/h de agua que se logra recuperar del proceso (Figura 6.1).
- El porcentaje de sólidos finales de sedimentación de concentrado no logra ser el óptimo cuando intervienen otros factores, uno de estos factores es el contenido de espumas, las cuales son desfavorables y generan un acumulado de lamas en la parte superior de la probeta en las pruebas de sedimentación, estas lamas son partículas finas (coloides) que consumen mayor cantidad de floculante (Anexo K).
- La concentración de floculante en planta es de 0.055% (Anexo D), si se dosifica de manera óptima el floculante, se ahorraría hasta el 30% en consumo de floculante por turno (Figura 5.11).
- Al aumentar los sólidos iniciales de sedimentación (Figura 5.10), y aumentar la dosificación de floculante (Figura 5.11), aumenta el porcentaje de sólidos finales de sedimentación, y se logra reducir el porcentaje de humedad en el concentrado (Figura 5.9).

RECOMENDACIONES

- Considerar manejar los sólidos iniciales (alimentación al espesador) entre 8% y 9%, rango donde se da los mejores resultados.
- Realizar pruebas de sedimentación de relaves, para corroborar si se está dosificando la cantidad adecuada de floculante y optimizar la recuperación de agua en esta etapa.
- Evaluar las dosificaciones adecuadas de floculante cuando haya variaciones de flujo, tanto de alimentación a tratar en la planta concentradora, como el radio concentración de concentrado.
- Actualmente se cuenta con válvulas de control manual en las líneas de floculante hacia el espesador de concentrado, sería una oportunidad de mejora el colocar flujómetro o válvula de control automático para regular el consumo de floculante.
- Sería una oportunidad de mejora la instrumentación en el espesador de concentrado, por ejemplo, con un medidor de densidad nuclear en la línea de descarga del espesador de concentrado. Así como en el espesador de jales se cuenta con densímetro para medición de los sólidos finales.
- Se recomienda calcular la granulometría de manera puntual para cada muestra tomada, así sería más representativo ese dato.
- Se recomienda probar alternativas en cuanto a tipos de floculante y química de floculante con otros proveedores.
- Control operativo a las etapas previas de molienda y flotación, para una operación óptima. La granulometría (generación de finos), y reactivos (exceso de espumante), influyen directamente en la prueba de sedimentación de concentrado.

BIBLIOGRAFIA

- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua: Coagulación y Floculación. Lima: Sedapal.
- Bian J, Wang H, Xiao C & Zhang D. (2018). An experimental study on the flocculating settling of unclassified tailings. PLoS ONE 13(9) Recuperado de: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204230>.
- Chapman E., Sinuhaji A. (2019). Technical Report San Jose, Oaxaca, México. Vancouver: Fortuna Silver Mines.
- Clesceri L., Greenberg A., & Eaton A. (1999). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Comings, E., Pruis, C., & De Bord, C. (1954). Continuous settling and thickening. Industrial & Engineering Chemistry Design Processing Development. Vol. 46, pp. 1164- 1172.
- Concha, F. (2014). Plenary lecture XXVII IMPC Challenges in solid-liquid separation thickening in industry.
- Concha F. (2001). Manual de Filtración & Separación. Chile: Centro de Tecnología Mineral.
- Concha, F. (2014). Sedimentation of Particulate Systems. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/285397454>.
- Concha, F. & Burger R. (2003). Thickening in the 20th century: a historical perspective. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/242532362>.
- Coe, H.S., and Clevenger, G.H., 1916, "Methods for determining the capacity of slimesettling tanks," Trans. AIME, Vol. 55, pp. 356-385.
- Dahlstrom D. (1989), Liquid-Solid Separation – Challenges in the Fast Lane, Challenges in Mineral Processing, SME, pp. 307-362.

- Han K. & Fuerstenau M., (2003). Liquid-Solid Separation. Principles of Mineral Processing (pp. 307-356). Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Henderson J., Wheatley A. (1987). Factors effecting a loss of flocculation activity of polyacrylamide solutions: Shear degradation, cation complexation, and solution aging. *Journal of Applied Polymer Science*. 33: 669–684.
- Hogg, R., Bunnual, P. & Suharyono, H. (1993). Chemical and physical variables in polymer-induced flocculation, *Minerals and Metallurgical Processing*, 10, 81-85
- King, R. (2012). Solid-Liquid Separation. Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems (pp.253-270). Colorado, EEUU: Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Keyes, R. & Hogg, R. (1979). Mixing problems in polymer flocculation, *AIChE Symp. Series N° 190*, 75, 63-72.
- Maldonado, V. (2004). Sedimentación en tratamiento de agua para consumo humano (pp. 1-54). Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Práctica 1: determinación experimental de la velocidad de sedimentación. Recuperado de: <https://www.ugr.es/~mgroman/archivos/BIA/Guiones.pdf>
- Metso. (2015). Upgrading. En *Handbook basics in minerals processing* (pp. 6:1-6:7). Lima: Metso.
- Oliva Uc, J., & Giacoman Vallejos, G., & Pérez Cortés, M. (2008). Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema óptico. *Ingeniería*, 12(2),17-29. ISSN: 1665-529X. Recuperado en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46712202>
- Perez J, & Espigares M. (1995). Separación por gravedad. Sedimentación-Flotación. Estudio sanitario del agua (pp. 1-9). Granada: Universidad de Granada.

- Rulyov N, Kravtchenko O, Concha F (2018) Effects of Suspension Dispersity and Concentration on Flocculation Efficiency in Static and Dynamic Flocculators. Bilingual Publishing CO.

ANEXOS

ANEXO A

Matriz de consistencia de la tesis de investigación

| FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | OBJETIVOS | HIPÓTESIS | VARIABLES | INDICADORES | DISEÑO METODOLÓGICO |
|--|--|--|--|--|--|
| <p>Problemática General:</p> <p>¿La aplicación de pruebas de sedimentación es necesario para optimizar el espesamiento de concentrado?</p> | <p>Objetivo General:</p> <p>Realizar pruebas de sedimentación para optimizar el espesamiento de concentrado.</p> | <p>Hipótesis General:</p> <p>Las pruebas de sedimentación optimizan el espesamiento de concentrado en mina San José.</p> | <p>Variable independiente (X):</p> <p>Pruebas de sedimentación:</p> <p>Floculante</p> | <p>X1: Dosis de Floculante (cc/min)</p> <p>X2: Concentración de Floculante (%)</p> | <p>Tipo de investigación:</p> <p>La investigación realizada es una investigación experimental.</p> |
| <p>Problema Específico:</p> | <p>Objetivos Específicos:</p> | <p>Hipótesis Específicas</p> | | | |
| <p>¿De qué manera la dosis de floculante mejorara el porcentaje de sólidos?</p> <p>¿De qué manera la concentración de floculante ayudara a optimizar el espesamiento de concentrado?</p> | <p>Encontrar la dosis adecuada de floculante para mejorar el porcentaje de sólidos.</p> <p>Lograr concentración adecuada de floculante para optimizar espesamiento de concentrado.</p> | <p>La dosis de floculante mejora el porcentaje de sólidos finales del espesamiento de concentrado.</p> <p>La concentración de floculante ayuda a optimizar el espesamiento de concentrado.</p> | <p>Variable dependiente (Y):</p> <p>Espesamiento de concentrado: Sólidos Finales de espesamiento.</p> <p>Velocidad de sedimentación.</p> | <p>Y1: Porcentaje Sólidos Finales (%)</p> <p>Y2: Velocidad de Sedimentación (cm/min)</p> | <p>Técnicas de recolección:</p> <p>Los datos son anotados manualmente, el almacenamiento y cálculos se realiza en el programa Excel 2013 para Windows.</p> |

Fuente: Elaboración propia

ANEXO B

Diagrama de flujo de toma de muestras

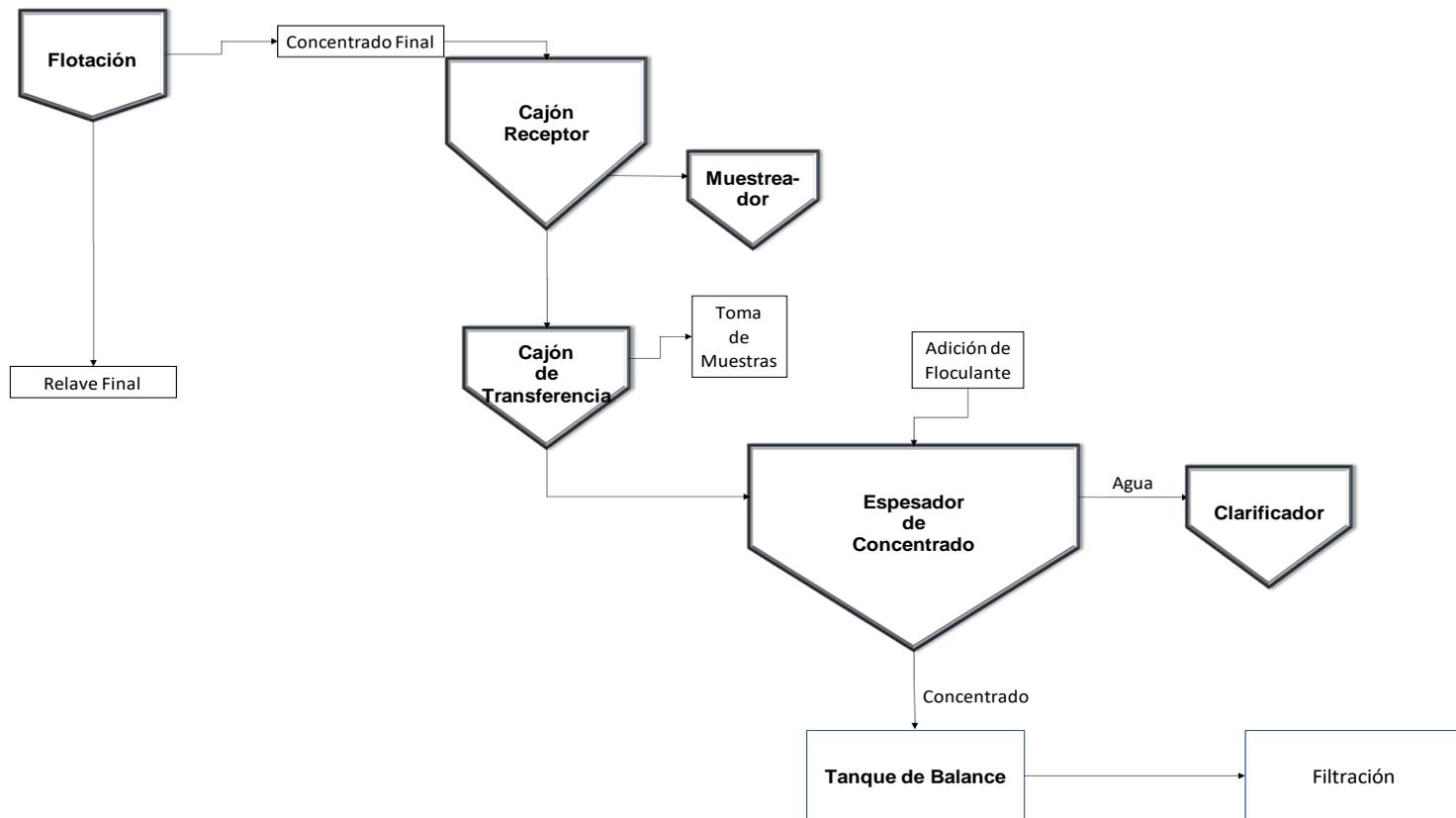


Diagrama de flujo de muestreo en espesamiento de concentrado

Fuente: Elaboración propia

ANEXO C

Tabla de datos de pruebas de sedimentación

| # | Fecha | Solidos iniciales (%) | Dosis (g/T) | Solidos Final (%) | Solidos Espesador (%) | Granulometría (%-m200) | Humedad (%) | Velocidad (cm/min) |
|----|-----------|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|
| 1 | 8/3/2019 | 4 | 10 | 15,02 | 66 | 88,3 | 12,5 | 0,320 |
| 2 | 8/3/2019 | 4 | 20 | 16,67 | 66 | 88,3 | 12,5 | 0,602 |
| 3 | 8/3/2019 | 4 | 15 | 16,86 | 66 | 88,3 | 12,5 | 0,355 |
| 4 | 11/3/2019 | 3 | 20 | 15,22 | 51 | 95,5 | 18,2 | 0,894 |
| 5 | 11/3/2019 | 3 | 15 | 16,21 | 51 | 95,5 | 18,2 | 0,460 |
| 6 | 11/3/2019 | 3 | 10 | 16,74 | 51 | 95,5 | 18,2 | 0,385 |
| 7 | 12/3/2019 | 8,5 | 20 | 22,40 | 58 | 90,8 | 16,7 | 0,209 |
| 8 | 12/3/2019 | 8,5 | 10 | 23,28 | 58 | 90,8 | 16,7 | 0,200 |
| 9 | 12/3/2019 | 8,5 | 15 | 23,33 | 58 | 90,8 | 16,7 | 0,201 |
| 10 | 13/3/2019 | 4 | 10 | 20,51 | 59 | 90,2 | 14,9 | 0,655 |
| 11 | 13/3/2019 | 4 | 15 | 20,90 | 59 | 90,2 | 14,9 | 0,903 |
| 12 | 13/3/2019 | 4 | 20 | 23,60 | 59 | 90,2 | 14,9 | 1,093 |
| 13 | 14/3/2019 | 7 | 20 | 22,58 | 60 | 91,2 | 14,4 | 0,267 |
| 14 | 14/3/2019 | 7 | 15 | 22,75 | 60 | 91,2 | 14,4 | 0,246 |
| 15 | 14/3/2019 | 7 | 10 | 22,91 | 60 | 91,2 | 14,4 | 0,238 |
| 16 | 15/3/2019 | 7,5 | 20 | 19,47 | 60 | 84,9 | 12,7 | 0,156 |
| 17 | 15/3/2019 | 7,5 | 10 | 20,28 | 60 | 84,9 | 12,7 | 0,141 |
| 18 | 15/3/2019 | 7,5 | 15 | 20,28 | 60 | 84,9 | 12,7 | 0,145 |
| 19 | 18/3/2019 | 12,5 | 5 | 29,89 | 56 | 89,4 | 15,6 | 0,149 |
| 20 | 18/3/2019 | 12,5 | 10 | 29,93 | 56 | 89,4 | 15,6 | 0,170 |
| 21 | 18/3/2019 | 12,5 | 15 | 30,02 | 56 | 89,4 | 15,6 | 0,170 |
| 22 | 18/3/2019 | 12,5 | 20 | 30,49 | 56 | 89,4 | 15,6 | 0,184 |
| 23 | 19/3/2019 | 12,5 | 20 | 29,78 | 52 | 91,2 | 17,6 | 0,183 |
| 24 | 19/3/2019 | 12,5 | 10 | 31,31 | 52 | 91,2 | 17,6 | 0,178 |
| 25 | 19/3/2019 | 12,5 | 15 | 31,48 | 52 | 91,2 | 17,6 | 0,189 |
| 26 | 25/3/2019 | 5 | 15 | 16,22 | 59 | 87,8 | 14,2 | 0,211 |
| 27 | 25/3/2019 | 5 | 20 | 16,22 | 59 | 87,8 | 14,2 | 0,217 |
| 28 | 25/3/2019 | 5 | 25 | 16,97 | 59 | 87,8 | 14,2 | 0,228 |
| 29 | 26/3/2019 | 6 | 20 | 27,00 | 53 | 89,2 | 18,3 | 0,786 |
| 30 | 26/3/2019 | 6 | 25 | 27,00 | 53 | 89,2 | 18,3 | 1,405 |
| 31 | 26/3/2019 | 6 | 15 | 27,27 | 53 | 89,2 | 18,3 | 0,620 |
| 32 | 27/3/2019 | 4 | 15 | 12,55 | 59 | 87,8 | 17,3 | 0,156 |
| 33 | 27/3/2019 | 4 | 25 | 12,58 | 59 | 87,8 | 17,3 | 0,167 |
| 34 | 27/3/2019 | 4 | 20 | 12,64 | 59 | 87,8 | 17,3 | 0,159 |
| 35 | 28/3/2019 | 3,5 | 20 | 15,85 | 59 | 89,2 | 16,1 | 0,223 |
| 36 | 28/3/2019 | 3,5 | 25 | 15,85 | 59 | 89,2 | 16,1 | 0,251 |
| 37 | 28/3/2019 | 3,5 | 15 | 16,18 | 59 | 89,2 | 16,1 | 0,210 |
| 38 | 29/3/2019 | 1 | 15 | 4,50 | 60 | 87,8 | 12,5 | 0,546 |
| 39 | 29/3/2019 | 1 | 25 | 4,69 | 60 | 87,8 | 12,5 | 0,632 |
| 40 | 29/3/2019 | 1 | 20 | 5,37 | 60 | 87,8 | 12,5 | 0,674 |
| 41 | 1/4/2019 | 4 | 0 | 27,16 | 62 | 90,7 | 13,2 | 1,744 |
| 42 | 1/4/2019 | 4 | 20 | 29,48 | 62 | 90,7 | 13,2 | 9,700 |

| # | Fecha | Solidos iniciales (%) | Dosis (g/T) | Solidos Final (%) | Solidos Espesador (%) | Granulometría (%-m200) | Humedad (%) | Velocidad (cm/min) |
|----|-----------|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|
| 43 | 1/4/2019 | 4 | 15 | 29,60 | 62 | 90,7 | 13,2 | 9,454 |
| 44 | 1/4/2019 | 4 | 25 | 29,98 | 62 | 90,7 | 13,2 | 15,108 |
| 45 | 2/4/2019 | 5 | 20 | 33,56 | 66 | 87,5 | 12,7 | 8,438 |
| 46 | 2/4/2019 | 5 | 15 | 35,15 | 66 | 87,5 | 12,7 | 6,744 |
| 47 | 2/4/2019 | 5 | 25 | 35,15 | 66 | 87,5 | 12,7 | 19,016 |
| 48 | 2/4/2019 | 5 | 0 | 35,15 | 66 | 87,5 | 12,7 | 1,064 |
| 49 | 3/4/2019 | 11 | 5 | 75,74 | 47 | 86,6 | 13,2 | 71,200 |
| 50 | 3/4/2019 | 11 | 15 | 76,95 | 47 | 86,6 | 13,2 | 307,710 |
| 51 | 3/4/2019 | 11 | 20 | 77,03 | 47 | 86,6 | 13,2 | 210,600 |
| 52 | 3/4/2019 | 11 | 10 | 79,07 | 47 | 86,6 | 13,2 | 73,680 |
| 53 | 4/4/2019 | 3 | 25 | 37,03 | 54 | 86,6 | 17 | 155,100 |
| 54 | 4/4/2019 | 3 | 20 | 37,96 | 54 | 86,6 | 17 | 73,721 |
| 55 | 4/4/2019 | 3 | 10 | 41,55 | 54 | 86,6 | 17 | 75,440 |
| 56 | 4/4/2019 | 3 | 15 | 42,91 | 54 | 86,6 | 17 | 81,579 |
| 57 | 5/4/2019 | 7 | 20 | 22,58 | 55 | 89,7 | 14,1 | 0,630 |
| 58 | 5/4/2019 | 7 | 15 | 22,75 | 55 | 89,7 | 14,1 | 0,515 |
| 59 | 5/4/2019 | 7 | 10 | 22,91 | 55 | 89,7 | 14,1 | 0,401 |
| 60 | 8/4/2019 | 3,5 | 25 | 33,88 | 60 | 87,8 | 13,3 | 151,340 |
| 61 | 8/4/2019 | 3,5 | 15 | 34,01 | 60 | 87,8 | 13,3 | 55,051 |
| 62 | 8/4/2019 | 3,5 | 20 | 34,78 | 60 | 87,8 | 13,3 | 137,580 |
| 63 | 9/4/2019 | 2 | 15 | 21,57 | 57 | 87,6 | 13,1 | 12,929 |
| 64 | 9/4/2019 | 2 | 10 | 23,30 | 57 | 87,6 | 13,1 | 11,702 |
| 65 | 9/4/2019 | 2 | 25 | 24,61 | 57 | 87,6 | 13,1 | 29,181 |
| 66 | 9/4/2019 | 2 | 20 | 24,71 | 57 | 87,6 | 13,1 | 21,880 |
| 67 | 10/4/2019 | 6,5 | 20 | 17,29 | 59 | 87,4 | 12,4 | 0,153 |
| 68 | 10/4/2019 | 6,5 | 15 | 17,39 | 59 | 87,4 | 12,4 | 0,140 |
| 69 | 10/4/2019 | 6,5 | 10 | 17,60 | 59 | 87,4 | 12,4 | 0,143 |
| 70 | 10/4/2019 | 6,5 | 25 | 18,72 | 59 | 87,4 | 12,4 | 0,151 |
| 71 | 11/4/2019 | 2,5 | 10 | 15,54 | 60 | - | 12,3 | 2,954 |
| 72 | 11/4/2019 | 2,5 | 15 | 17,08 | 60 | - | 12,3 | 3,722 |
| 73 | 11/4/2019 | 2,5 | 25 | 18,84 | 60 | - | 12,3 | 6,841 |
| 74 | 11/4/2019 | 2,5 | 20 | 19,87 | 60 | - | 12,3 | 4,511 |
| 75 | 12/4/2019 | 4 | 20 | 16,23 | 56 | 88,4 | 12,5 | 0,522 |
| 76 | 12/4/2019 | 4 | 15 | 16,69 | 56 | 88,4 | 12,5 | 0,443 |
| 77 | 12/4/2019 | 4 | 10 | 17,35 | 56 | 88,4 | 12,5 | 0,352 |
| 78 | 12/4/2019 | 4 | 25 | 19,80 | 56 | 88,4 | 12,5 | 0,958 |
| 79 | 15/4/2019 | 3 | 15 | 33,18 | 35 | 86,9 | 6,9 | 61,286 |
| 80 | 15/4/2019 | 3 | 20 | 34,04 | 35 | 86,9 | 6,9 | 104,320 |
| 81 | 15/4/2019 | 3 | 25 | 34,94 | 35 | 86,9 | 6,9 | 119,350 |
| 82 | 15/4/2019 | 3 | 10 | 35,89 | 35 | 86,9 | 6,9 | 29,010 |
| 83 | 16/4/2019 | 1 | 25 | 7,31 | 53 | 87,6 | 13,4 | 2,166 |
| 84 | 16/4/2019 | 1 | 15 | 7,47 | 53 | 87,6 | 13,4 | 1,540 |
| 85 | 16/4/2019 | 1 | 10 | 7,57 | 53 | 87,6 | 13,4 | 1,477 |
| 86 | 16/4/2019 | 1 | 20 | 7,98 | 53 | 87,6 | 13,4 | 1,726 |
| 87 | 17/4/2019 | 3,5 | 25 | 16,42 | 55 | 88,9 | 15,6 | 0,615 |
| 88 | 17/4/2019 | 3,5 | 20 | 16,70 | 55 | 88,9 | 15,6 | 0,486 |
| 89 | 17/4/2019 | 3,5 | 15 | 16,96 | 55 | 88,9 | 15,6 | 0,417 |
| 90 | 17/4/2019 | 3,5 | 10 | 17,27 | 55 | 88,9 | 15,6 | 0,323 |
| 91 | 18/4/2019 | 2 | 20 | 19,19 | 62 | 87,7 | 8,8 | 5,391 |
| 92 | 18/4/2019 | 2 | 10 | 20,08 | 62 | 87,7 | 8,8 | 3,800 |

| # | Fecha | Solidos iniciales (%) | Dosis (g/T) | Solidos Final (%) | Solidos Espesador (%) | Granulometría (%-m200) | Humedad (%) | Velocidad (cm/min) |
|-----|-----------|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|
| 93 | 18/4/2019 | 2 | 15 | 20,08 | 62 | 87,7 | 8,8 | 5,121 |
| 94 | 18/4/2019 | 2 | 25 | 20,55 | 62 | 87,7 | 8,8 | 7,114 |
| 95 | 19/4/2019 | 2,5 | 20 | 10,51 | 54 | 87 | 14,7 | 0,741 |
| 96 | 19/4/2019 | 2,5 | 15 | 10,82 | 54 | 87 | 14,7 | 0,667 |
| 97 | 19/4/2019 | 2,5 | 10 | 11,27 | 54 | 87 | 14,7 | 0,567 |
| 98 | 19/4/2019 | 2,5 | 25 | 13,84 | 54 | 87 | 14,7 | 0,931 |
| 99 | 22/4/2019 | 2 | 10 | 12,38 | 56 | 89,6 | 13,9 | 7,397 |
| 100 | 22/4/2019 | 2 | 15 | 12,38 | 56 | 89,6 | 13,9 | 9,732 |
| 101 | 22/4/2019 | 2 | 20 | 12,74 | 56 | 89,6 | 13,9 | 11,226 |
| 102 | 22/4/2019 | 2 | 25 | 16,15 | 56 | 89,6 | 13,9 | 16,340 |
| 103 | 23/4/2019 | 2 | 25 | 16,32 | 60 | 86,6 | 9,5 | 18,526 |
| 104 | 23/4/2019 | 2 | 20 | 20,08 | 60 | 86,6 | 9,5 | 10,295 |
| 105 | 23/4/2019 | 2 | 15 | 22,69 | 60 | 86,6 | 9,5 | 8,080 |
| 106 | 23/4/2019 | 2 | 10 | 23,94 | 60 | 86,6 | 9,5 | 6,639 |
| 107 | 24/4/2019 | 6,5 | 20 | 26,51 | 52 | 93 | 13,2 | 0,760 |
| 108 | 24/4/2019 | 6,5 | 15 | 27,00 | 52 | 93 | 13,2 | 0,564 |
| 109 | 24/4/2019 | 6,5 | 10 | 27,50 | 52 | 93 | 13,2 | 0,402 |
| 110 | 24/4/2019 | 6,5 | 25 | 28,14 | 52 | 93 | 13,2 | 1,031 |
| 111 | 25/4/2019 | 5 | 20 | 32,58 | 58 | 87,5 | 14,7 | 10,073 |
| 112 | 25/4/2019 | 5 | 15 | 33,07 | 58 | 87,5 | 14,7 | 8,862 |
| 113 | 25/4/2019 | 5 | 25 | 33,13 | 58 | 87,5 | 14,7 | 16,686 |
| 114 | 25/4/2019 | 5 | 10 | 33,44 | 58 | 87,5 | 14,7 | 6,667 |
| 115 | 26/4/2019 | 5 | 20 | 24,93 | 48 | 89,9 | 13,7 | 1,190 |
| 116 | 26/4/2019 | 5 | 10 | 25,21 | 48 | 89,9 | 13,7 | 0,546 |
| 117 | 26/4/2019 | 5 | 15 | 25,50 | 48 | 89,9 | 13,7 | 1,078 |
| 118 | 26/4/2019 | 5 | 25 | 26,72 | 48 | 89,9 | 13,7 | 1,313 |
| 119 | 29/4/2019 | 5 | 10 | 23,61 | 60 | 86,4 | 12,5 | 1,319 |
| 120 | 29/4/2019 | 5 | 20 | 24,66 | 60 | 86,4 | 12,5 | 2,225 |
| 121 | 29/4/2019 | 5 | 25 | 24,66 | 60 | 86,4 | 12,5 | 3,282 |
| 122 | 29/4/2019 | 5 | 15 | 25,08 | 60 | 86,4 | 12,5 | 1,952 |
| 123 | 30/4/2019 | 2 | 20 | 23,94 | 56 | 87,4 | 9,6 | 27,664 |
| 124 | 30/4/2019 | 2 | 25 | 23,94 | 56 | 87,4 | 9,6 | 36,931 |
| 125 | 30/4/2019 | 2 | 15 | 24,61 | 56 | 87,4 | 9,6 | 20,197 |
| 126 | 30/4/2019 | 2 | 10 | 25,33 | 56 | 87,4 | 9,6 | 15,648 |
| 127 | 2/5/2019 | 1 | 10 | 13,87 | 58 | 89,6 | 10 | 8,903 |
| 128 | 2/5/2019 | 1 | 15 | 14,82 | 58 | 89,6 | 10 | 18,230 |
| 129 | 2/5/2019 | 1 | 20 | 14,82 | 58 | 89,6 | 10 | 21,016 |
| 130 | 2/5/2019 | 1 | 25 | 15,91 | 58 | 89,6 | 10 | 21,410 |
| 131 | 3/5/2019 | 1 | 20 | 18,66 | 60 | 88,2 | - | 40,576 |
| 132 | 3/5/2019 | 1 | 25 | 18,74 | 60 | 88,2 | - | 45,978 |
| 133 | 3/5/2019 | 1 | 15 | 22,55 | 60 | 88,2 | - | 37,569 |
| 134 | 3/5/2019 | 1 | 10 | 23,79 | 60 | 88,2 | - | 24,336 |
| 135 | 6/5/2019 | 1 | 20 | 12,71 | 66 | 86,1 | 9,6 | 12,143 |
| 136 | 6/5/2019 | 1 | 15 | 13,04 | 66 | 86,1 | 9,6 | 9,771 |
| 137 | 6/5/2019 | 1 | 10 | 13,04 | 66 | 86,1 | 9,6 | 5,432 |
| 138 | 6/5/2019 | 1 | 25 | 14,82 | 66 | 86,1 | 9,6 | 13,689 |
| 139 | 7/5/2019 | 1 | 10 | 17,18 | - | 85,8 | - | 15,341 |
| 140 | 7/5/2019 | 1 | 20 | 18,66 | - | 85,8 | - | 23,513 |
| 141 | 7/5/2019 | 1 | 25 | 18,66 | - | 85,8 | - | 33,510 |
| 142 | 7/5/2019 | 1 | 15 | 19,67 | - | 85,8 | - | 19,636 |

| # | Fecha | Solidos iniciales (%) | Dosis (g/T) | Solidos Final (%) | Solidos Espesador (%) | Granulometría (%-m200) | Humedad (%) | Velocidad (cm/min) |
|-----|-----------|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|
| 143 | 8/5/2019 | 3 | 20 | 25,48 | - | 86,1 | - | 8,426 |
| 144 | 8/5/2019 | 3 | 10 | 26,51 | - | 86,1 | - | 4,999 |
| 145 | 8/5/2019 | 3 | 15 | 27,05 | - | 86,1 | - | 6,675 |
| 146 | 8/5/2019 | 3 | 25 | 27,05 | - | 86,1 | - | 11,123 |
| 147 | 9/5/2019 | 2 | 20 | 15,18 | 53 | 89,7 | 6,8 | 3,881 |
| 148 | 9/5/2019 | 2 | 15 | 15,73 | 53 | 89,7 | 6,8 | 3,520 |
| 149 | 9/5/2019 | 2 | 10 | 15,80 | 53 | 89,7 | 6,8 | 2,580 |
| 150 | 9/5/2019 | 2 | 25 | 16,63 | 53 | 89,7 | 6,8 | 4,315 |
| 151 | 10/5/2019 | 1 | 20 | 11,33 | 55 | 89,3 | 10,8 | 17,475 |
| 152 | 10/5/2019 | 1 | 10 | 11,63 | 55 | 89,3 | 10,8 | 9,319 |
| 153 | 10/5/2019 | 1 | 25 | 12,30 | 55 | 89,3 | 10,8 | 17,531 |
| 154 | 10/5/2019 | 1 | 15 | 13,87 | 55 | 89,3 | 10,8 | 12,780 |
| 155 | 13/5/2019 | 1,5 | 10 | 11,89 | 60 | 92,5 | 13,7 | 1,174 |
| 156 | 13/5/2019 | 1,5 | 20 | 12,11 | 60 | 92,5 | 13,7 | 1,845 |
| 157 | 13/5/2019 | 1,5 | 15 | 12,82 | 60 | 92,5 | 13,7 | 1,382 |
| 158 | 13/5/2019 | 1,5 | 25 | 13,08 | 60 | 92,5 | 13,7 | 2,116 |
| 159 | 14/5/2019 | 6 | 10 | 29,67 | 54 | 90,9 | 16,6 | 2,649 |
| 160 | 14/5/2019 | 6 | 20 | 30,00 | 54 | 90,9 | 16,6 | 4,485 |
| 161 | 14/5/2019 | 6 | 15 | 30,34 | 54 | 90,9 | 16,6 | 4,198 |
| 162 | 14/5/2019 | 6 | 25 | 30,68 | 54 | 90,9 | 16,6 | 6,150 |
| 163 | 15/5/2019 | 5 | 20 | 35,71 | 54 | 92,7 | 15,9 | 16,125 |
| 164 | 15/5/2019 | 5 | 25 | 38,82 | 54 | 92,7 | 15,9 | 30,587 |
| 165 | 15/5/2019 | 5 | 10 | 39,51 | 54 | 92,7 | 15,9 | 14,017 |
| 166 | 15/5/2019 | 5 | 15 | 39,51 | 54 | 92,7 | 15,9 | 14,389 |
| 167 | 16/5/2019 | 5 | 25 | 29,96 | 50 | 90,4 | 14,2 | 29,419 |
| 168 | 16/5/2019 | 5 | 10 | 33,07 | 50 | 90,4 | 14,2 | 9,136 |
| 169 | 16/5/2019 | 5 | 15 | 33,56 | 50 | 90,4 | 14,2 | 11,768 |
| 170 | 16/5/2019 | 5 | 20 | 34,10 | 50 | 90,4 | 14,2 | 14,303 |
| 171 | 17/5/2019 | 5 | 20 | 20,56 | 51 | 92,3 | 12,6 | 0,361 |
| 172 | 17/5/2019 | 5 | 15 | 21,56 | 51 | 92,3 | 12,6 | 0,321 |
| 173 | 17/5/2019 | 5 | 10 | 21,98 | 51 | 92,3 | 12,6 | 0,222 |
| 174 | 17/5/2019 | 5 | 25 | 22,88 | 51 | 92,3 | 12,6 | 0,430 |
| 175 | 18/5/2019 | 5 | 25 | 20,38 | 49 | 93,6 | 16,3 | 0,288 |
| 176 | 18/5/2019 | 5 | 20 | 20,56 | 49 | 93,6 | 16,3 | 0,201 |
| 177 | 18/5/2019 | 5 | 15 | 20,75 | 49 | 93,6 | 16,3 | 0,189 |
| 178 | 18/5/2019 | 5 | 10 | 21,15 | 49 | 93,6 | 16,3 | 0,180 |
| 179 | 20/5/2019 | 5 | 10 | 24,93 | 50 | 91,8 | 16,5 | 0,806 |
| 180 | 20/5/2019 | 5 | 15 | 25,21 | 50 | 91,8 | 16,5 | 1,192 |
| 181 | 20/5/2019 | 5 | 20 | 25,21 | 50 | 91,8 | 16,5 | 1,626 |
| 182 | 20/5/2019 | 5 | 25 | 27,05 | 50 | 91,8 | 16,5 | 2,190 |
| 183 | 21/5/2019 | 8 | 25 | 34,48 | 55 | 91,4 | 13,8 | 1,684 |
| 184 | 21/5/2019 | 8 | 20 | 35,14 | 55 | 91,4 | 13,8 | 1,272 |
| 185 | 21/5/2019 | 8 | 10 | 35,48 | 55 | 91,4 | 13,8 | 0,598 |
| 186 | 21/5/2019 | 8 | 15 | 35,48 | 55 | 91,4 | 13,8 | 0,861 |
| 187 | 27/5/2019 | 3 | 10 | 18,37 | 62 | 88,9 | 12,7 | 1,901 |
| 188 | 27/5/2019 | 3 | 15 | 19,18 | 62 | 88,9 | 12,7 | 2,613 |
| 189 | 27/5/2019 | 3 | 20 | 20,68 | 62 | 88,9 | 12,7 | 3,732 |
| 190 | 27/5/2019 | 3 | 25 | 21,01 | 62 | 88,9 | 12,7 | 4,857 |
| 191 | 28/5/2019 | 4 | 10 | 32,16 | 55 | 91 | 7,7 | 3,142 |
| 192 | 28/5/2019 | 4 | 15 | 32,75 | 55 | 91 | 7,7 | 5,828 |
| 193 | 28/5/2019 | 4 | 20 | 33,37 | 55 | 91 | 7,7 | 8,936 |

| # | Fecha | Solidos iniciales (%) | Dosis (g/T) | Solidos Final (%) | Solidos Espesador (%) | Granulometría (%-m200) | Humedad (%) | Velocidad (cm/min) |
|-----|-----------|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|
| 194 | 28/5/2019 | 4 | 25 | 34,68 | 55 | 91 | 7,7 | 14,249 |
| 195 | 29/5/2019 | 5 | 20 | 26,10 | 64 | 97,4 | 10,3 | 2,300 |
| 196 | 29/5/2019 | 5 | 10 | 26,41 | 64 | 97,4 | 10,3 | 1,123 |
| 197 | 29/5/2019 | 5 | 15 | 27,05 | 64 | 97,4 | 10,3 | 1,923 |
| 198 | 29/5/2019 | 5 | 25 | 28,07 | 64 | 97,4 | 10,3 | 3,156 |
| 199 | 30/5/2019 | 3 | 25 | 41,55 | 55 | 95,8 | 13,6 | 45,764 |
| 200 | 30/5/2019 | 3 | 20 | 42,91 | 55 | 95,8 | 13,6 | 42,733 |
| 201 | 30/5/2019 | 3 | 15 | 44,35 | 55 | 95,8 | 13,6 | 21,656 |
| 202 | 30/5/2019 | 3 | 10 | 45,90 | 55 | 95,8 | 13,6 | 17,952 |
| 203 | 31/5/2019 | 6 | 20 | 28,72 | 60 | 90,2 | 14,5 | 1,470 |
| 204 | 31/5/2019 | 6 | 10 | 29,67 | 60 | 90,2 | 14,5 | 0,640 |
| 205 | 31/5/2019 | 6 | 15 | 29,67 | 60 | 90,2 | 14,5 | 1,111 |
| 206 | 31/5/2019 | 6 | 25 | 31,40 | 60 | 90,2 | 14,5 | 1,768 |
| 207 | 1/6/2019 | 6 | 10 | 29,03 | 58 | 94,2 | 12 | 1,662 |
| 208 | 1/6/2019 | 6 | 25 | 31,04 | 58 | 94,2 | 12 | 5,028 |
| 209 | 1/6/2019 | 6 | 15 | 31,77 | 58 | 94,2 | 12 | 2,553 |
| 210 | 1/6/2019 | 6 | 20 | 32,93 | 58 | 94,2 | 12 | 3,552 |
| 211 | 3/6/2019 | 3 | 10 | 13,35 | 63 | 87,7 | 10,4 | 0,517 |
| 212 | 3/6/2019 | 3 | 15 | 14,21 | 63 | 87,7 | 10,4 | 0,555 |
| 213 | 3/6/2019 | 3 | 20 | 15,20 | 63 | 87,7 | 10,4 | 0,736 |
| 214 | 3/6/2019 | 3 | 25 | 15,74 | 63 | 87,7 | 10,4 | 0,997 |
| 215 | 4/6/2019 | 9 | 25 | 53,42 | 62 | 86,7 | 12,9 | 97,773 |
| 216 | 4/6/2019 | 9 | 15 | 54,11 | 62 | 86,7 | 12,9 | 100,080 |
| 217 | 4/6/2019 | 9 | 20 | 55,57 | 62 | 86,7 | 12,9 | 119,400 |
| 218 | 4/6/2019 | 9 | 10 | 56,32 | 62 | 86,7 | 12,9 | 28,547 |
| 219 | 5/6/2019 | 4 | 20 | 23,91 | - | 87,1 | - | 5,463 |
| 220 | 5/6/2019 | 4 | 10 | 23,91 | - | 87,1 | - | 1,536 |
| 221 | 5/6/2019 | 4 | 25 | 24,23 | - | 87,1 | - | 5,905 |
| 222 | 5/6/2019 | 4 | 15 | 24,23 | - | 87,1 | - | 3,135 |
| 223 | 6/6/2019 | 4 | 10 | 18,62 | 61 | 85,7 | 12,5 | 1,592 |
| 224 | 6/6/2019 | 4 | 15 | 19,66 | 61 | 85,7 | 12,5 | 2,211 |
| 225 | 6/6/2019 | 4 | 20 | 19,88 | 61 | 85,7 | 12,5 | 2,390 |
| 226 | 6/6/2019 | 4 | 25 | 20,81 | 61 | 85,7 | 12,5 | 11,596 |
| 227 | 8/6/2019 | 4 | 10 | 26,02 | 61 | 88,6 | 11,9 | 3,910 |
| 228 | 8/6/2019 | 4 | 15 | 26,02 | 61 | 88,6 | 11,9 | 5,313 |
| 229 | 8/6/2019 | 4 | 20 | 26,02 | 61 | 88,6 | 11,9 | 6,310 |
| 230 | 8/6/2019 | 4 | 25 | 26,40 | 61 | 88,6 | 11,9 | 7,093 |
| 231 | 10/6/2019 | 6 | 15 | 36,50 | 68 | 86,4 | 11 | 17,677 |
| 232 | 10/6/2019 | 6 | 20 | 37,00 | 68 | 86,4 | 11 | 27,013 |
| 233 | 10/6/2019 | 6 | 25 | 38,59 | 68 | 86,4 | 11 | 21,687 |
| 234 | 10/6/2019 | 6 | 10 | 40,32 | 68 | 86,4 | 11 | 11,371 |
| 235 | 11/6/2019 | 3 | 20 | 15,20 | 66 | 87,9 | 10,7 | 1,382 |
| 236 | 11/6/2019 | 3 | 15 | 15,55 | 66 | 87,9 | 10,7 | 1,202 |
| 237 | 11/6/2019 | 3 | 25 | 15,93 | 66 | 87,9 | 10,7 | 2,200 |
| 238 | 11/6/2019 | 3 | 10 | 16,53 | 66 | 87,9 | 10,7 | 0,994 |
| 239 | 12/6/2019 | 4 | 10 | 25,85 | 64 | 88,5 | 10,2 | 3,983 |
| 240 | 12/6/2019 | 4 | 20 | 27,02 | 64 | 88,5 | 10,2 | 13,067 |
| 241 | 12/6/2019 | 4 | 25 | 27,86 | 64 | 88,5 | 10,2 | 10,198 |
| 242 | 12/6/2019 | 4 | 15 | 28,30 | 64 | 88,5 | 10,2 | 6,362 |
| 243 | 13/6/2019 | 4 | 10 | 32,75 | 57 | 88,8 | 12,2 | 1,079 |

| # | Fecha | Solidos iniciales (%) | Dosis (g/T) | Solidos Final (%) | Solidos Espesador (%) | Granulometría (%-m200) | Humedad (%) | Velocidad (cm/min) |
|-----|-----------|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|
| 244 | 13/6/2019 | 4 | 15 | 33,37 | 57 | 88,8 | 12,2 | 1,668 |
| 245 | 13/6/2019 | 4 | 20 | 34,01 | 57 | 88,8 | 12,2 | 7,857 |
| 246 | 13/6/2019 | 4 | 25 | 36,85 | 57 | 88,8 | 12,2 | 10,004 |
| 247 | 14/6/2019 | 5 | 25 | 43,35 | 57 | - | 12,8 | 17,691 |
| 248 | 14/6/2019 | 5 | 10 | 44,21 | 57 | - | 12,8 | 7,101 |
| 249 | 14/6/2019 | 5 | 20 | 44,21 | 57 | - | 12,8 | 11,324 |
| 250 | 14/6/2019 | 5 | 15 | 45,11 | 57 | - | 12,8 | 9,255 |
| 251 | 15/6/2019 | 7 | 10 | 29,53 | 60 | 88,4 | 11,3 | 0,449 |
| 252 | 15/6/2019 | 7 | 15 | 30,67 | 60 | 88,4 | 11,3 | 0,538 |
| 253 | 15/6/2019 | 7 | 20 | 32,23 | 60 | 88,4 | 11,3 | 0,732 |
| 254 | 15/6/2019 | 7 | 25 | 33,24 | 60 | 88,4 | 11,3 | 1,139 |
| 255 | 17/6/2019 | 9 | 25 | 42,46 | 59 | 88,9 | 13,3 | 2,818 |
| 256 | 17/6/2019 | 9 | 20 | 43,35 | 59 | 88,9 | 13,3 | 1,937 |
| 257 | 17/6/2019 | 9 | 10 | 43,66 | 59 | 88,9 | 13,3 | 0,589 |
| 258 | 17/6/2019 | 9 | 15 | 44,28 | 59 | 88,9 | 13,3 | 1,014 |
| 259 | 18/6/2019 | 12 | 10 | 33,72 | 66 | 90 | 11 | 0,086 |
| 260 | 18/6/2019 | 12 | 15 | 33,72 | 66 | 90 | 11 | 0,113 |
| 261 | 18/6/2019 | 12 | 20 | 34,76 | 66 | 90 | 11 | 0,187 |
| 262 | 18/6/2019 | 12 | 25 | 35,19 | 66 | 90 | 11 | 0,194 |
| 263 | 19/6/2019 | 16 | 25 | 35,83 | 62 | 89,7 | 13,1 | 0,137 |
| 264 | 19/6/2019 | 16 | 15 | 37,38 | 62 | 89,7 | 13,1 | 0,118 |
| 265 | 19/6/2019 | 16 | 10 | 37,56 | 62 | 89,7 | 13,1 | 0,094 |
| 266 | 19/6/2019 | 16 | 20 | 37,56 | 62 | 89,7 | 13,1 | 0,125 |
| 267 | 20/6/2019 | 7 | 15 | 27,01 | 57 | 90,8 | 13,7 | 0,478 |
| 268 | 20/6/2019 | 7 | 20 | 27,48 | 57 | 90,8 | 13,7 | 0,643 |
| 269 | 20/6/2019 | 7 | 10 | 27,96 | 57 | 90,8 | 13,7 | 0,302 |
| 270 | 20/6/2019 | 7 | 25 | 28,72 | 57 | 90,8 | 13,7 | 0,876 |
| 271 | 21/6/2019 | 5 | 10 | 38,16 | 58 | 92,3 | 13,9 | 4,248 |
| 272 | 21/6/2019 | 5 | 25 | 39,51 | 58 | 92,3 | 13,9 | 9,898 |
| 273 | 21/6/2019 | 5 | 20 | 40,22 | 58 | 92,3 | 13,9 | 7,502 |
| 274 | 21/6/2019 | 5 | 15 | 40,96 | 58 | 92,3 | 13,9 | 5,810 |
| 275 | 24/6/2019 | 12 | 20 | 25,28 | 56 | 88 | 13,9 | 0,094 |
| 276 | 24/6/2019 | 12 | 15 | 25,62 | 56 | 88 | 13,9 | 0,089 |
| 277 | 24/6/2019 | 12 | 10 | 25,74 | 56 | 88 | 13,9 | 0,084 |
| 278 | 24/6/2019 | 12 | 25 | 25,74 | 56 | 88 | 13,9 | 0,096 |
| 279 | 25/6/2019 | 4 | 20 | 25,64 | 59 | 90,9 | 13,2 | 4,519 |
| 280 | 25/6/2019 | 4 | 10 | 26,02 | 59 | 90,9 | 13,2 | 1,872 |
| 281 | 25/6/2019 | 4 | 15 | 26,02 | 59 | 90,9 | 13,2 | 3,388 |
| 282 | 25/6/2019 | 4 | 25 | 26,02 | 59 | 90,9 | 13,2 | 5,138 |
| 283 | 26/6/2019 | 2 | 10 | 9,97 | 60 | 86,4 | 13,7 | 0,666 |
| 284 | 26/6/2019 | 2 | 15 | 10,21 | 60 | 86,4 | 13,7 | 0,755 |
| 285 | 26/6/2019 | 2 | 25 | 11,41 | 60 | 86,4 | 13,7 | 0,938 |
| 286 | 26/6/2019 | 2 | 20 | 11,56 | 60 | 86,4 | 13,7 | 0,898 |
| 287 | 27/6/2019 | 6 | 10 | 30,00 | 59 | - | - | 2,375 |
| 288 | 27/6/2019 | 6 | 15 | 32,15 | 59 | - | - | 3,261 |
| 289 | 27/6/2019 | 6 | 20 | 32,54 | 59 | - | - | 4,355 |
| 290 | 27/6/2019 | 6 | 25 | 33,76 | 59 | - | - | 7,319 |
| 291 | 28/6/2019 | 9 | 10 | 35,84 | 63 | 86,9 | 12,7 | 2,422 |
| 292 | 28/6/2019 | 9 | 15 | 38,51 | 63 | 86,9 | 12,7 | 4,364 |
| 293 | 28/6/2019 | 9 | 20 | 43,35 | 63 | 86,9 | 12,7 | 6,768 |

| # | Fecha | Solidos iniciales (%) | Dosis (g/T) | Solidos Final (%) | Solidos Espesador (%) | Granulometría (%-m200) | Humedad (%) | Velocidad (cm/min) |
|-----|-----------|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|
| 294 | 28/6/2019 | 9 | 25 | 45,24 | 63 | 86,9 | 12,7 | 8,065 |
| 295 | 1/7/2019 | 15 | 10 | 48,82 | 62 | 88,9 | 12,6 | 0,650 |
| 296 | 1/7/2019 | 15 | 15 | 48,82 | 62 | 88,9 | 12,6 | 1,626 |
| 297 | 1/7/2019 | 15 | 20 | 49,82 | 62 | 88,9 | 12,6 | 2,277 |
| 298 | 1/7/2019 | 15 | 25 | 50,17 | 62 | 88,9 | 12,6 | 2,633 |
| 299 | 29/7/2019 | 7 | 3 | 56,25 | 67 | 85,9 | 12,4 | 9,080 |
| 300 | 29/7/2019 | 7 | 2 | 62,95 | 67 | 85,9 | 12,4 | 8,320 |
| 301 | 29/7/2019 | 7 | 1 | 64,22 | 67 | 85,9 | 12,4 | 6,980 |
| 302 | 30/7/2019 | 7 | 3 | 45,06 | 69 | 89,2 | 12,5 | 3,060 |
| 303 | 30/7/2019 | 7 | 2 | 45,70 | 69 | 89,2 | 12,5 | 3,040 |
| 304 | 30/7/2019 | 7 | 1 | 46,37 | 69 | 89,2 | 12,5 | 2,200 |
| 305 | 31/7/2019 | 7 | 3 | 38,49 | 69 | 89,2 | 13,1 | 1,660 |
| 306 | 31/7/2019 | 7 | 2 | 39,45 | 69 | 89,2 | 13,1 | 1,410 |
| 307 | 31/7/2019 | 7 | 1 | 40,46 | 69 | 89,2 | 13,1 | 1,100 |
| 308 | 1/8/2019 | 8 | 3 | 46,87 | 71 | 84,2 | 11,2 | 4,250 |
| 309 | 1/8/2019 | 8 | 2 | 50,78 | 71 | 84,2 | 11,2 | 3,440 |
| 310 | 1/8/2019 | 8 | 1 | 51,50 | 71 | 84,2 | 11,2 | 2,480 |
| 311 | 2/8/2019 | 14 | 3 | 63,61 | 70 | 86,6 | 9,8 | 5,930 |
| 312 | 2/8/2019 | 14 | 2 | 65,47 | 70 | 86,6 | 9,8 | 4,860 |
| 313 | 2/8/2019 | 14 | 1 | 66,12 | 70 | 86,6 | 9,8 | 2,700 |
| 314 | 15/8/2019 | 9 | 3 | 46,25 | 65 | 91,1 | 10,3 | 1,570 |
| 315 | 15/8/2019 | 9 | 2 | 49,58 | 65 | 91,1 | 10,3 | 1,420 |
| 316 | 15/8/2019 | 9 | 1 | 50,79 | 65 | 91,1 | 10,3 | 1,130 |
| 317 | 16/8/2019 | 8 | 3 | 42,50 | 69 | 86,1 | 8,6 | 2,270 |
| 318 | 16/8/2019 | 8 | 2 | 46,27 | 69 | 86,1 | 8,6 | 1,930 |
| 319 | 16/8/2019 | 8 | 1 | 48,10 | 69 | 86,1 | 8,6 | 1,460 |
| 320 | 20/8/2019 | 7 | 3 | 30,09 | 67 | 81,1 | 11 | 0,540 |
| 321 | 20/8/2019 | 7 | 2 | 30,67 | 67 | 81,1 | 11 | 0,490 |
| 322 | 20/8/2019 | 7 | 1 | 33,60 | 67 | 81,1 | 11 | 0,440 |
| 323 | 21/8/2019 | 17 | 3 | 63,47 | 68 | 88,8 | 7,6 | 5,140 |
| 324 | 21/8/2019 | 17 | 2 | 67,58 | 68 | 88,8 | 7,6 | 4,140 |
| 325 | 21/8/2019 | 17 | 1 | 74,19 | 68 | 88,8 | 7,6 | 2,250 |
| 326 | 22/8/2019 | 14 | 3 | 45,18 | 58 | 89,4 | 11,1 | 0,370 |
| 327 | 22/8/2019 | 14 | 2 | 45,80 | 58 | 89,4 | 11,1 | 0,340 |
| 328 | 22/8/2019 | 14 | 1 | 45,18 | 58 | 89,4 | 11,1 | 0,280 |
| 329 | 23/8/2019 | 9 | 3 | 41,19 | 65 | 85,6 | 11 | 1,470 |
| 330 | 23/8/2019 | 9 | 2 | 43,35 | 65 | 85,6 | 11 | 1,240 |
| 331 | 23/8/2019 | 9 | 1 | 44,28 | 65 | 85,6 | 11 | 1,140 |
| 332 | 26/8/2019 | 9 | 3 | 29,64 | 59 | 85,6 | 12,7 | 0,224 |
| 333 | 26/8/2019 | 9 | 2 | 29,89 | 59 | 85,6 | 12,7 | 0,214 |
| 334 | 26/8/2019 | 9 | 1 | 30,33 | 59 | 85,6 | 12,7 | 0,212 |
| 335 | 27/8/2019 | 9 | 3 | 47,31 | 57 | 87,5 | 10,5 | 3,020 |
| 336 | 27/8/2019 | 9 | 2 | 51,43 | 57 | 87,5 | 10,5 | 2,670 |
| 337 | 27/8/2019 | 9 | 1 | 51,43 | 57 | 87,5 | 10,5 | 1,840 |
| 338 | 28/8/2019 | 9 | 3 | 50,79 | 60 | 88,8 | 11,70% | 1,630 |
| 339 | 28/8/2019 | 9 | 2 | 52,74 | 60 | 88,8 | 11,70% | 1,270 |
| 340 | 28/8/2019 | 9 | 1 | 52,07 | 60 | 88,8 | 11,70% | 0,920 |
| 341 | 29/8/2019 | 8 | 3 | 37,29 | 64 | 86,3 | 9,70% | 0,360 |
| 342 | 29/8/2019 | 8 | 2 | 37,68 | 64 | 86,3 | 9,70% | 0,340 |
| 343 | 29/8/2019 | 8 | 1 | 38,07 | 64 | 86,3 | 9,70% | 0,320 |

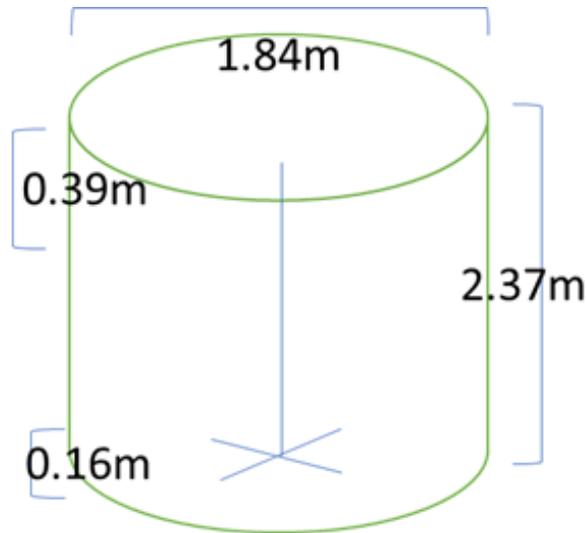
| # | Fecha | Solidos iniciales (%) | Dosis (g/T) | Solidos Final (%) | Solidos Espesador (%) | Granulometría (%-m200) | Humedad (%) | Velocidad (cm/min) |
|-----|-----------|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------|
| 344 | 30/8/2019 | 15 | 3 | 55,99 | 65 | 86,6 | 9,1 | 3,270 |
| 345 | 30/8/2019 | 15 | 2 | 59,68 | 65 | 86,6 | 9,1 | 2,360 |
| 346 | 30/8/2019 | 15 | 1 | 61,19 | 65 | 86,6 | 9,1 | 1,530 |
| 347 | 2/9/2019 | 10 | 3 | 57,13 | 61 | 87 | 10,5 | 5,070 |
| 348 | 2/9/2019 | 10 | 2 | 61,69 | 61 | 87 | 10,5 | 2,870 |
| 349 | 2/9/2019 | 10 | 1 | 67,04 | 61 | 87 | 10,5 | 1,610 |
| 350 | 3/9/2019 | 13 | 3 | 53,46 | 63 | 88,9 | 13,6 | 1,000 |
| 351 | 3/9/2019 | 13 | 2 | 53,93 | 63 | 88,9 | 13,6 | 0,740 |
| 352 | 3/9/2019 | 13 | 1 | 53,93 | 63 | 88,9 | 13,6 | 0,500 |
| 353 | 5/9/2019 | 7 | 1,5 | 48,50 | 61 | 87,6 | 8,8 | 2,920 |
| 354 | 5/9/2019 | 7 | 1 | 48,50 | 61 | 87,6 | 8,8 | 2,410 |
| 355 | 5/9/2019 | 7 | 0,5 | 49,26 | 61 | 87,6 | 8,8 | 1,750 |
| 356 | 6/9/2019 | 11 | 1,5 | 58,50 | 60 | 91,3 | 8,9 | 2,430 |
| 357 | 6/9/2019 | 11 | 1 | 64,36 | 60 | 91,3 | 8,9 | 2,040 |
| 358 | 6/9/2019 | 11 | 0,5 | 66,01 | 60 | 91,3 | 8,9 | 1,620 |
| 359 | 9/9/2019 | 10 | 1,5 | 53,81 | 66 | 89,7 | 8,5 | 1,880 |
| 360 | 9/9/2019 | 10 | 1 | 59,32 | 66 | 89,7 | 8,5 | 1,510 |
| 361 | 9/9/2019 | 10 | 0,5 | 64,25 | 66 | 89,7 | 8,5 | 1,390 |
| 362 | 10/9/2019 | 10 | 1,5 | 51,42 | 65 | 92 | 10,6 | 0,550 |
| 363 | 10/9/2019 | 10 | 1 | 53,19 | 65 | 92 | 10,6 | 0,510 |
| 364 | 10/9/2019 | 10 | 0,5 | 54,44 | 65 | 92 | 10,6 | 0,450 |
| 365 | 11/9/2019 | 13 | 1,5 | 53,93 | 60 | 82,3 | 12,5 | 1,360 |
| 366 | 11/9/2019 | 13 | 1 | 51,67 | 60 | 82,3 | 12,5 | 1,100 |
| 367 | 11/9/2019 | 13 | 0,5 | 50,41 | 60 | 82,3 | 12,5 | 1,040 |
| 368 | 12/9/2019 | 6 | 1,5 | 39,15 | 61 | 88,9 | 8,4 | 2,090 |
| 369 | 12/9/2019 | 6 | 1 | 42,22 | 61 | 88,9 | 8,4 | 1,820 |
| 370 | 12/9/2019 | 6 | 0,5 | 46,59 | 61 | 88,9 | 8,4 | 1,630 |
| 371 | 13/9/2019 | 7 | 1,5 | 42,63 | 64 | 87,9 | 9,8 | 2,140 |
| 372 | 13/9/2019 | 7 | 1 | 43,81 | 64 | 87,9 | 9,8 | 2,490 |
| 373 | 13/9/2019 | 7 | 0,5 | 43,81 | 64 | 87,9 | 9,8 | 2,430 |
| 374 | 17/9/2019 | 9 | 1,5 | 42,90 | 59 | 91,1 | 11,6 | 0,370 |
| 375 | 17/9/2019 | 9 | 1 | 44,75 | 59 | 91,1 | 11,6 | 0,480 |
| 376 | 17/9/2019 | 9 | 0,5 | 45,74 | 59 | 91,1 | 11,6 | 0,580 |

Fuente: Elaboración propia

ANEXO D

Cálculo de Dosificación de Floculante

Los cálculos siguen de la siguiente manera:



Dimensiones del tanque de preparación de Floculante

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Volumen ocupado} = \left(\frac{\pi d^2}{4} * h\right) = \left(\frac{\pi 1.84^2}{4}\right) (2.37 - 0.39 - 0.16) = 4.84 \text{ m}^3 = 4840L$$

De floculante en polvo se agrega 13.245 Kg.

$$\text{Se tiene: } \frac{13.245Kg}{4840L} = \frac{13245g}{4840L} = 2.74 \frac{g}{L}$$

$$\text{Se diluye a razón de: } \frac{1L \text{ Floc}}{4L \text{ H}_2\text{O}} = \frac{13245g}{4840L} = 2.74 \frac{g}{L} \rightarrow \text{En 5L son: } 0.55 \frac{g}{L}$$

Expresado en porcentaje resulta 0.055%.

Para una dosis de floculante de 0.8 g/t.

$$\text{Se tiene: } \frac{\left(\frac{0.9g \text{ floc}}{t} * \frac{140 t}{h} * \frac{1 h}{60min}\right)}{0.55 \frac{g \text{ floc}}{L}} = 3,82 \frac{L}{min}$$

ANEXO E

Pruebas con Agua Recuperada de Floculación

Prueba con Agua Floculada dosificando 3g/t

| 21/08/2019 | | | |
|-------------------------|----------------------|--------------------|------------------------------|
| % Sólidos Inicial. | 17%S | | |
| %S +200M | 6% | %S -200M | 11% |
| Dosis | Sedimentación Normal | Con agua Floculada | Sedimentación Floculada 3g/T |
| Agua Recuperada | 0 L | 1L de 3g/T | 0 L |
| Velocidad Sedimentación | 2.25 cm/min | 4.14 cm/min | 5.14 cm/min |
| Sólidos Finales | 62.52 %Sf | 67.58 %Sf | 64.45 %Sf |
| Altura Final | 7.2 cm. | 6.2 cm. | 6.8 cm. |
| En Operación | | | |
| %Sol Alim | Floculante | %Sol BF Real | %Hum |
| 12% | 10L/min | 68% | 7.6 % |
| Cabeza | Concent. | %Rec | %-200M |
| 285 ppm | 8.664 ppm | 93% | 88.8 % |

Fuente: Elaboración propia

Prueba con Agua Floculada dosificando 1g/t

| 27/08/2019 | | | |
|-------------------------|----------------------|--------------------|------------------------------|
| % Solidos Inicial. | 9%S | | |
| %S +200M | 4% | %S -200M | 5% |
| Dosis | Sedimentación Normal | Con agua Floculada | Sedimentación Floculada 1g/T |
| Agua Recuperada | 0 L | 1L de 1g/T | 0 L |
| Velocidad Sedimentación | 1.33 cm/min | 0.97 cm/min | 1.84 cm/min |
| Solidos Finales | 44.75 %Sf | 46.78 %Sf | 51.43 %Sf |
| Altura Final | 6.2 cm. | 5.8 cm. | 5.0 cm. |
| En Operación | | | |
| %Sol Alim | Floculante | %Sol BF Real | %Hum |
| 5 % | 11L/min | 57% | 10.5% |
| Cabeza | Concent. | %Rec | %-200M |
| 128 ppm | 4.976 ppm | 93% | 87.5 % |

Fuente: Elaboración propia



De izquierda a derecha, sin exceso de floculante y con exceso de floculante, respectivamente.

Fuente: Imagen propia

ANEXO F

Pruebas con nuevo floculante al concentrado

Resultados de Pruebas de Sedimentación de Concentrado

| PRUEBAS SEDIMENTACIÓN CONCENTRADO | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|-------------|------------|----------|
| # | Prueba | Dosis (g/t) | Volumen (ml) | vel (cm/min) | vel (cm/hr) | %S Inicial | %S Final |
| 1 | Magnafloc | 0.5 | 0.26 | 0.3258 | 19.55 | 13.06 | 53.63 |
| 2 | SA 55H | 0.5 | 0.27 | 0.3249 | 19.49 | 13.47 | 53.83 |
| 3 | SA 55 | 0.5 | 0.26 | 0.2981 | 17.89 | 13 | 53.46 |
| 4 | SA 65BH | 0.5 | 0.26 | 0.3233 | 19.4 | 13.01 | 53.03 |
| 5 | SA 60H | 0.5 | 0.28 | 0.3372 | 20.23 | 13.66 | 55.25 |
| 6 | SA 65B | 0.5 | 0.24 | 0.3003 | 18.02 | 12.08 | 55.31 |
| 7 | SA 60 | 0.5 | 0.21 | 0.4096 | 24.58 | 10.87 | 53.34 |

Fuente: Elaboración propia

ANEXO G

Pruebas con nuevo floculante a jales

Resultados de Pruebas de Sedimentación de Jales

| PRUEBAS SEDIMENTACION JALES | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|-------------|------------|----------|
| # | Prueba | Dosis (g/t) | Volumen (ml) | vel (cm/min) | vel (cm/hr) | %S Inicial | %S Final |
| 1 | Magnafloc | 31 | 18.75 | 0.4437 | 26.62 | 24.73 | 50.4 |
| 2 | SA 60H | 31 | 19.31 | 0.4523 | 27.14 | 25.33 | 51.14 |
| 3 | SA 65B | 31 | 19.81 | 0.5039 | 30.23 | 25.86 | 50.99 |
| 4 | SA 60 | 31 | 19.44 | 0.489 | 29.34 | 25.47 | 50.58 |

Fuente: Elaboración propia

ANEXO H

Medición de Porcentaje de Sólidos en la Probeta

Datos para medición de porcentaje de sólidos.

| | |
|--|-------------------------------|
| Numero de Prueba | 1 |
| Descripción | Magnafloc 336 BASF |
| Densidad del agua (g/cm ³) | 1.0000 |
| Peso probeta (g) | 916.00 |
| Peso de probeta + pulpa (g) | 3,133.20 |
| Peso calculado de pulpa (g) | 2,217.20 |
| Sólidos pulpa (g/l) | 289.60 |
| % Sólidos | 13.06 |
| Volumen de Probeta (ml) | 2,000.00 |
| Peso Agua (g) | 1,927.60 |
| Densidad Mineral (g/cm ³) | 4.00 |
| Densidad pulpa (g/cm ³) | 1.11 |

Fuente: Elaboración propia

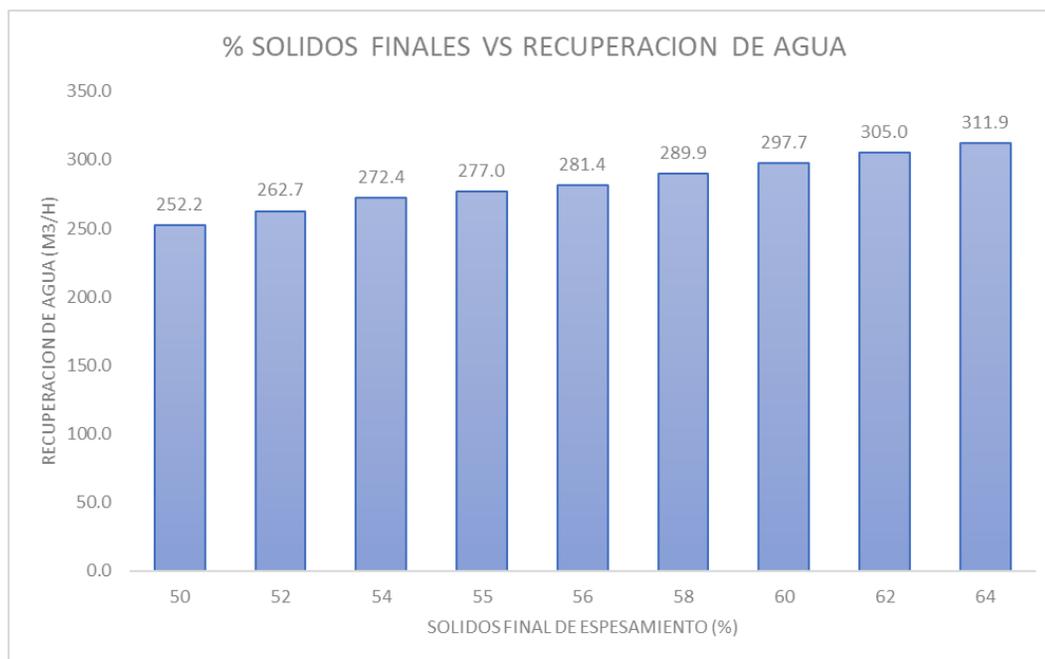
ANEXO J

Estimación de recuperación de agua en espesamiento de relave

Datos de recuperación de agua según los porcentajes de sólidos finales.

| SEDIMENTACIÓN RELAVE | | | | | | |
|----------------------|------------|----------|--------------|-----------|------------|-------------------|
| # | %S Inicial | %S Final | m3/h | t/h Jales | m3/h | Recuperación Agua |
| | | | QH2O inicial | | QH2O final | |
| 1 | 26 | 50 | 388.77 | 136.6 | 136.59 | 252.2 |
| 2 | 26 | 52 | 388.77 | 136.6 | 126.09 | 262.7 |
| 3 | 26 | 54 | 388.77 | 136.6 | 116.36 | 272.4 |
| 4 | 26 | 55 | 388.77 | 136.6 | 111.76 | 277.0 |
| 5 | 26 | 56 | 388.77 | 136.6 | 107.32 | 281.4 |
| 6 | 26 | 58 | 388.77 | 136.6 | 98.91 | 289.9 |
| 7 | 26 | 60 | 388.77 | 136.6 | 91.06 | 297.7 |
| 8 | 26 | 62 | 388.77 | 136.6 | 83.72 | 305.0 |
| 9 | 26 | 64 | 388.77 | 136.6 | 76.83 | 311.9 |

Fuente: Elaboración propia



Resultados de recuperación de agua según los sólidos finales

ANEXO K

Efecto de las espumas en las pruebas de sedimentación



De izquierda a derecha, exceso de espumas y poca cantidad de espumas, respectivamente.

Fuente: Imagen propia

ANEXO L

Método de probeta graduada para pruebas de sedimentación



Probeta de 2000ml graduada en cm.

Fuente: Imagen propia