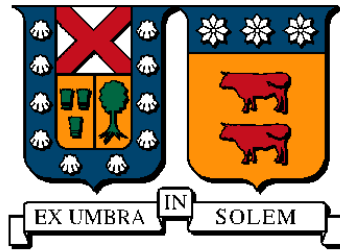


**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA Y DE MATERIALES**



**IDENTIFICACIÓN DE MEJORAS
OPERACIONALES EN ESPESADORES DE
RELAVES HRT**

**Memoria de título presentado en conformidad con los requisitos y reglamentos
requeridos para obtener el título de ingeniero civil metalúrgico.**

Profesor Guía: Dr. Jorge Ipinza

Profesora Co-referente: Dra. Pamela Garrido

Profesor co-referente: Julio Zumaeta

IGNACIO ELÍAS CATALAN PEREZ

2018

Tabla de contenido

Capítulo 1. Antecedentes generales	1
1.1 Introducción	1
1.2 Hipótesis	2
1.3 Objetivo general	2
1.4 Objetivos específicos	2
Capítulo 2. Marco teórico y antecedentes operacionales	3
2.1 Separación sólido-líquido	3
2.1.1 Teoría de doble capa eléctrica.....	3
2.1.2 Potencial superficial y potencial Zeta.....	4
2.1.3 Floculación.....	4
2.2 Espesadores industriales.....	5
2.3 Espesador HRT (High Rate Thickeners).....	6
2.3.1 Criterio de diseño	7
2.3.2 Sistema de alimentación.....	7
Sistema de dilución	8
2.3.3 Medición de variables operacionales principales.....	9
2.4 Tecnologías de análisis mineralógico.....	11
2.4.1 Análisis QEMSCAN.....	11
2.4.2 Análisis NIR (<i>Near Infrared Reflectance</i>).....	12
2.4.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX).....	13
2.5 Mineralogía en relaves.....	13
2.5.1 Filosilicatos	15
2.6 Sedimentación de relaves	17
2.6.1 Efecto de la concentración de sólidos	18
2.6.2 Efecto granulométrico.....	19
2.6.3 Otras variables.....	19
2.7 Reología.....	19
2.7.1 Efecto del tamaño de las partículas en parámetros reológicos ..	21
2.7.2 Efecto de la concentración de sólidos	22
2.7.3 Efecto del cizalle.....	23
Capítulo 3. Procedimiento experimental y equipos	24
3.1 Metodología experimental	24

3.2	Ensayo semi-piloto en columna de espesamiento.....	25
3.3	Ensayo de sedimentación	28
3.4	Ensayo de reología VANE	28
3.5	Ensayo granulométrico	28
3.6	Análisis mineralógico	28
Capítulo 4. Resultados y discusiones.....		29
4.1	Resultados de data operacional	29
4.1.1	Tonelaje de tratamiento	29
4.1.2	Torque	30
4.1.3	Concentración de sólidos de descarga (Cp de descarga)	31
4.1.4	Dosificación de floculante	32
4.1.5	Altura de agua clara	34
4.1.6	Presión de cono.....	35
4.1.7	Posición de rastra.....	35
4.2	Resultados experimentales.....	36
4.2.1	Reología a concentraciones de sólidos distintas.....	36
4.2.2	Comparación de dosis en la tensión de fluencia.....	38
4.2.3	Ensayo de sedimentación.....	39
4.2.4	Cp de descarga en el tiempo	40
4.2.5	Reología de descarga de ensayos en columna semi-piloto	41
4.2.6	Cp de descarga columna	41
4.2.7	Resultados mineralogía NIR	42
4.2.8	Resultados mineralogía QEMSCAN y DRX.	45
4.2.9	Reología y turbidez espesador.....	45
4.2.10	Granulometría y velocidad de sedimentación.....	46
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....		47
Referencias.....		48
ANEXO 1. Materiales y equipos		50
ANEXO 2. Resumen análisis estadístico de data operacional		54
ANEXO 3. Material fotográfico de columnas.....		56
ANEXO 4. Resultados mineralogía Qemscan y DRX.....		60
ANEXO 5. Distribución granulométrica		80

Resumen

Este trabajo de título denominado "Identificación de mejoras operacionales en espesadores de relaves HRT" forma parte del proyecto CL101 desarrollado por el Centro de Investigación JRI (CI-JRI) llamado "Campañas de mediciones en terreno de espesamiento y reología para identificación de mejoras en espesadores de relave".

El problema abordado está asociado a dos espesadores de relaves (E1 y E2) de una faena minera chilena, los que no están cumpliendo con el criterio de diseño de 62 [%] de sólidos en la descarga, ni con el tratamiento nominal de 5250 [tph]. Además, trabajan de manera constante, en el porcentaje de torque máximo definido en el diseño (50 [%]), lo que limita significativamente la operación de estos equipos.

Es por lo anterior que el objetivo de esta memoria es identificar, a través de trabajo experimental, estrategias de mejora operacional. El estudio desarrollado consideró ensayos de caracterización física, caracterización en sedimentación y reología, ensayos en columna semi-piloto de espesamiento, análisis mineralógico NIR, Qemscan y DRX y análisis de data operacional entregada por el cliente, además de un exhaustivo análisis de los resultados con el fin de establecer las principales causas de incumplimiento de las condiciones de diseño.

Los resultados obtenidos tanto del trabajo experimental como del análisis de resultados permitieron establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Existe una alta variabilidad mineralógica en la alimentación de los espesadores, que genera cambios constantes en parámetros reológicos y de sedimentación.
- Los espesadores de relave fueron sub dimensionados para trabajar con la pulpa alimentada actualmente.
- La tensión de fluencia obtenida a 15[gpt] es mayor que a 10[gpt] para una misma pulpa de relave.
- Para mayores contenidos de filosilicatos se observa una disminución de la concentración de sólidos de descarga en el ensayo en columna, así como también aumenta el contenido de finos (d10), lo que afectaría los parámetros reológicos y sedimentológicos de la pulpa.
- Se recomienda realizar un estudio geo metalúrgico exhaustivo que permita encontrar una manera de mitigar problemas operacionales que puedan generar las pulpas complejas.
- Con la dosis de 15[gpt] se observa sobre floculación en los ensayos semi-piloto y afecta el desempeño del Cp de descarga en los espesadores, por lo tanto, se recomienda cambiar por una dosificación de 10[gpt] que muestra mejores resultados operacionales y en los ensayos semi-piloto.

Abstract

This work called "Operational improvement identification in HRT tailings thickeners" is part of the Project CL101 called "Field thickening and rheology measurement campaigns for improvement identification in tailings thickeners" developed by JRI Research Center (CI-JRI).

The problem is addressed to two tailing thickeners (E1 & E2) from a Chilean mine site, which are not working at their design criteria of 62 [%] of solids in discharge nor with the nominal treatment of 5250 [tph]. Also, they work constantly at their maximum torque defined by design which is a significant limitation for the operation of those equipments.

It is for the above that the objective of this work is to identify through experimental analysis, operational improvement strategies for the tailings thickeners studied. The work developed considered physical characterization, sedimentation and rheology characterization, experimentation in semi-pilot thickening column, mineralogical analysis NIR, Qescam and DRX. Client's operational data was also analysed besides an exhaustive analysis of the results of the experimentation to establish the causes of the breach of design conditions.

The experimentation results and analysis allowed to establish the following conclusions and recommendations:

- There is a high mineralogical variability in the tailings thickeners feeders which generates constant changes in rheological and sedimentation parameters.
- The studied tailings thickeners were sub-dimensioned for working with the actual pulp feeded.
- Creep tension at 15 [gpt] is higher than the obtained at 10 [gpt] for the same tailings pulp sample.
- For higher phyllosilicates contents it is observed that discharge solids concentration decreased at the column test, at the same time, the fine material (d10) in the pulp increased which affects the rheological and sedimentation parameters.
- It is highly recommended to do an exhaustive geo metallurgical study to find ways to mitigate operational problems originated by complex pulps.
- With the 15[gpt] dose it is observed an over flocculation in the semi-pilot experiments. This affects the performance of the discharge Cp in the tailings thickeners, so it is recommended to change the dose to 10[gpt] because it shows better results in operation as in the semi-pilot experiments.

Capítulo 1. Antecedentes generales

1.1 Introducción

Debido a las bajas leyes de los minerales de interés la industria minera ha tenido que comenzar a considerar los efectos que tiene la ganga en los procesos productivos, ya que estudios recientes han demostrado que las especies denominadas arcillas afectan de diferentes maneras el área seca y húmeda de la planta. Del total de pulpa alimentada al proceso más del 98% del material corresponde a ganga y es eliminado en forma de relaves hacia los espesadores industriales, donde se busca recuperar la mayor cantidad de agua posible antes de ser descartadas a los tranques de relave. Específicamente, en las etapas de sedimentación, transporte y disposición de relaves, es de suma relevancia considerar el efecto de la mineralogía, ya que cambios en esta provocarán variabilidad en el sistema y posiblemente fluctuaciones en las operaciones de espesamiento y recuperación de agua.

Dado la importancia de lo antes mencionado es que las empresas mineras han comenzado a caracterizar de manera reológica y sedimentológica las pulpas de relaves, con el objetivo de estar preparados ante los cambios en la mineralogía de entrada que sufre el proceso productivo día a día y también para realizar planes de extracción más óptimos, de tal manera de no disminuir la producción y evitar detenciones debido a problemas operacionales, ya que ambas situaciones generan una gran pérdida de tiempo y dinero.

El presente trabajo forma parte del proyecto CL101 “Campaña de mediciones en terreno de espesamiento y reología para la identificación de mejoras en espesadores de relave” desarrollado por el CI-JRI entre los meses de octubre 2017 y enero 2018 y tiene por objetivo el desarrollo de trabajo experimental en terreno y el contraste de los resultados semi-piloto de espesamiento con resultados operacionales, en la búsqueda de una explicación a los problemas de incumplimiento de las condiciones de diseño.

El problema abordado en este estudio se debe a que los actuales espesadores de relave (E1 y E2) de una faena minera chilena no cumplen con el 62 [%] de concentración de sólidos de descarga. El promedio del Cp de descarga durante el año 2017 es de 58 [%] para E1 y 57 [%] para E2 con una desviación estándar de 3 [%], alcanzando solo de manera puntual el valor de diseño. Además, el promedio de tratamiento por espesador es del orden de 4800 [tph], lo que está muy lejano de los 5250 [tph] estipulados por diseño.

Por otro lado, los espesadores E1 y E2 operan de manera frecuente próximos al porcentaje máximo de torque admisible (50%) lo que provoca un levantamiento continuo y rápido del sistema de rastras mecánicas, afectando la compactación de la pulpa de descarga y, en consecuencia, su concentración de sólidos.

Además, la operación actual presenta grandes fluctuaciones que podrían ser atribuidas a una alta variación mineralógica en las pulpas de alimentación al espesador, lo que genera un cambio en las características sedimentológicas y reológicas haciendo aún más complicado el funcionamiento operacional de los espesadores.

Para lograr el objetivo de identificar mejoras operacionales este proyecto considera la realización de pruebas en terreno de espesamiento continuo en columna de 1 [m], además

de una completa caracterización de las muestras a través de reología, sedimentación en probetas, análisis mineralógico mediante tecnología QEMSCAN y NIR, determinación de distribución granulométrica y un análisis de data operacional del año 2017 entregada por el cliente. Finalmente se realiza un análisis global que considera tanto el trabajo experimental como la data operacional, en la búsqueda de las causas que generan los incumplimientos operacionales.

El presente trabajo de título considera en el capítulo 1 una descripción del proyecto y las problemáticas presentes en los espesadores de relave mediante una introducción además se presentan el objetivo general y los objetivos específicos que definen el desarrollo del proyecto.

En el capítulo 2 se presenta la revisión de los antecedentes operacionales y el marco teórico de sedimentación de relaves, se abordan temáticas relacionadas a la teoría de la separación sólido-líquido, floculación, los espesadores HRT (High Rate Thickeners), las arcillas presentes en los relaves y los factores que afectan la velocidad de sedimentación y reología de los relaves.

En el capítulo 3 se muestran los resultados obtenidos del trabajo experimental; la caracterización física, ensayos de sedimentación, ensayos reológicos, análisis mineralógico de QEMSCAN, NIR y DRX, determinación de distribución granulométrica y análisis de data operacional y también las discusiones elaboradas a partir de los resultados obtenidos.

Finalmente, en el capítulo 4 se presentan conclusiones y recomendaciones que abordan los problemas encontrados y las medidas que se podrían adoptar para mejorar las condiciones operaciones actuales.

1.2 Hipótesis

Los problemas operacionales presentes se deben a la presencia de pulpas de relave con propiedades metalúrgicas complejas que no fueron consideradas correctamente en la definición de los criterios de diseño.

1.3 Objetivo general

Identificar estrategias de mejora operacional en espesadores de relave, a partir de trabajo experimental que considera caracterización de relaves, ensayos semi piloto de espesamiento y análisis de data operacional.

1.4 Objetivos específicos

- Caracterizar física, química, sedimentológica y reológicamente muestras de relave.
- Evaluar el comportamiento de distintos relaves en espesamiento, a través de ensayos en columna continua de 1 [m].
- Analizar al menos un año de data operacional de los espesadores considerados en el estudio y evaluar el grado de cumplimiento de las condiciones establecidas por el criterio de diseño.
- Contrastar los datos obtenidos experimentalmente con los datos medidos en planta, con el propósito de identificar cómo fue generado el incumplimiento de la concentración de sólidos de descarga de diseño.

- Evaluar el efecto de la mineralogía en el comportamiento en espesamiento y reología de las pulpas de relave, tanto en el ámbito experimental como operacional.

Capítulo 2. Marco teórico y antecedentes operacionales

2.1 Separación sólido-líquido

En las etapas de separación sólido-líquido, una alimentación formada por una suspensión de partículas de un sólido en un líquido, se separa en dos nuevas suspensiones: una fase con menor y hasta nula cantidad de partículas y otra con una concentración de sólidos superior a la de la alimentación. Dentro de los procesos de separación sólido líquido asociados al procesamiento de minerales podemos destacar los filtros y los espesadores, teniendo este último una menor eficiencia de separación, pero también un menor costo energético. En ambos casos la separación total no es posible ya que para una separación completa se debe considerar una etapa de secado.

En particular, la eficiencia de los procesos de separación por decantación (espesamiento), está asociada a diversos factores tales como carga eléctrica superficial de las partículas, pH, potencial zeta, utilización de reactivos, tamaño de partículas y mineralogía, entre otras. En las próximas secciones se describen conceptos básicos de algunas de estas variables y cómo influyen en los procesos de espesamiento.

2.1.1 Teoría de doble capa eléctrica

Cuando una partícula está sumergida bajo una solución acuosa, la superficie se carga eléctricamente, por lo que ocurre una adsorción de iones disueltos en la solución con carga opuesta. El modelo de Stern de doble capa eléctrica es el que mejor explica lo que ocurre en la superficie de los minerales.

Se identifican dos capas principales, la primera es la capa de Stern que es de cargas distribuidas equitativamente en la superficie del mineral en la cual los iones están adsorbidos, mientras que la segunda capa consta de una capa difusa de iones positivos y negativos de iones que no son adsorbidos por la superficie del sólido. Además, se observan dos planos principales, el de Stern y de corte. El primero corresponde al que delimita la capa de Stern con la capa difusa y es el centro eléctrico de los iones determinantes de potencial, mientras que el plano de corte es donde termina la capa difusa y comienza el seno de la solución, este delimita la porción de capa difusa que sigue el movimiento de la partícula sólida. Cuando las partículas son sumergidas en agua, los iones determinantes de potencial son H^+ y OH^- , por lo tanto, el potencial está determinado por el Ph de la solución [1]. En **Figura 1** se puede observar de mejor forma esta teoría. La carga superficial de los minerales es importante para evaluar qué tipo de floculante se debe utilizar y qué tan efectivo puede ser.

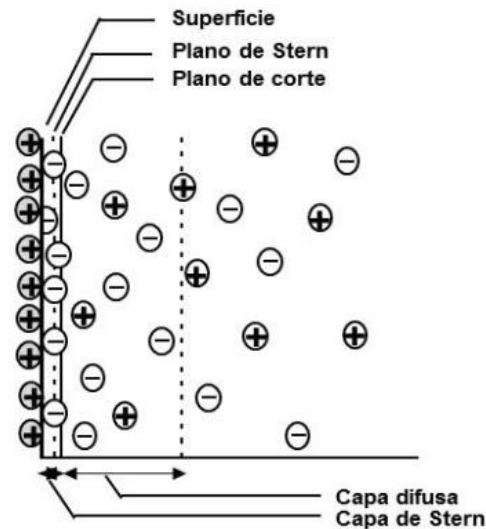


Figura 1. Doble capa eléctrica, capa de Stern y capa difusa [1].

2.1.2 Potencial superficial y potencial Zeta

El potencial superficial es la diferencia que hay entre el potencial de la superficie del mineral y la solución y depende fuertemente de la densidad de adsorción de los iones que determinan el potencial. Este potencial no se puede medir, sin embargo, se pueden obtener aproximaciones midiendo el punto de cero cargas (PCC), que corresponde al pH al cuál la carga neta superficial es cero (igual densidad de adsorción de cargas negativas y positivas).

El potencial zeta es el que existe en el plano de corte y puede ser medido por varias técnicas, electroforesis y medición electroacústica. Este potencial indica la interacción electrostática de las partículas en suspensión, dado que si los sólidos en suspensión tienen un potencial zeta de valor absoluto menor a 5 [mV] se espera que el fenómeno de coagulación ocurra rápidamente. También existe el punto isoeléctrico (IEP) que es al pH en el cual el potencial zeta se hace cero. Hay veces que el PCC y el IEP son iguales y esto ocurre para ciertos minerales, sin embargo, para el caso de los filosilicatos esto no ocurre debido a la anisotropía de cargas que presentan [1].

2.1.3 Floculación

La agregación de partículas a partir de dispersiones por adsorción de cadenas de polímeros grandes de varias partículas se denomina floculación. Existen varios tipos de floculación que dependen de la forma en que los polímeros actúan sobre la superficie de la partícula. El tipo más importante es la floculación de tipo puente, en la cual pequeñas cantidades de floculante de cadena grande se adsorben sobre muchas partículas simultáneamente, produciendo flóculos fuertes. A concentraciones de floculante más altas que las necesarias, se adsorben completamente en una partícula, dejando menos posibilidades de adsorción simultánea en otras partículas, lo que re-estabiliza la suspensión, tal como se presenta en forma esquemática en la **Figura 2** derecha.

En consecuencia, hay dosis óptimas de floculante. Si uno o más polímeros lineales se adsorben sobre partículas, se forma un gel con una red tridimensional. En este caso, la

agregación se denomina floculación de red. El control estricto de floculantes lineales o ramificados puede producir flóculos muy compactos conocidos como gránulos. Este tipo de floculación se llama floculación de pellets [2]. Todos estos casos se pueden observar en **Figura 2** y **Figura 3**.

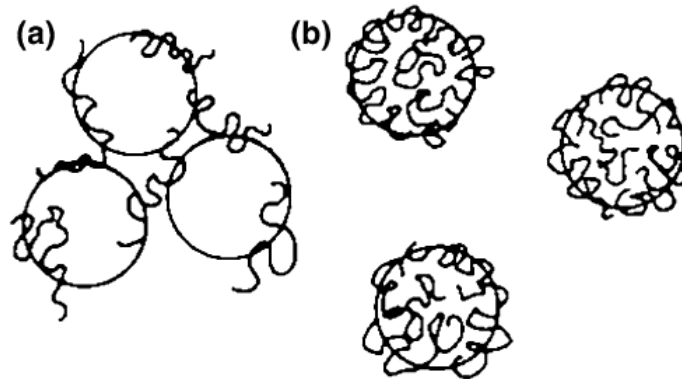


Figura 2. (a) Floculación de puente; (b) Re-estabilización por sobre floculación [2].

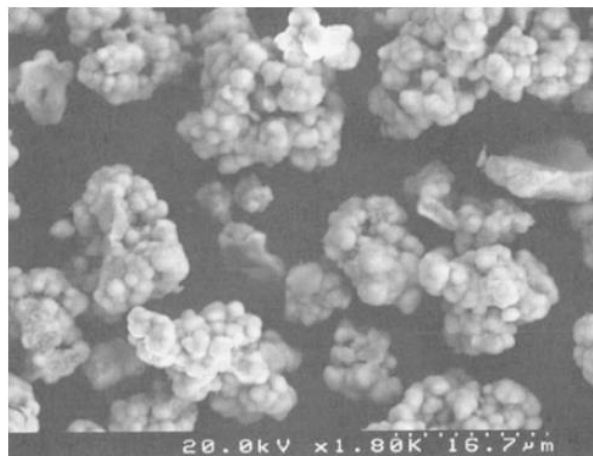


Figura 3. Floculación de tipo pellets [2].

2.2 Espesadores industriales

Los espesadores son equipos de separación sólido-líquido en los que una suspensión de sólidos que conforma una pulpa se alimenta a un tanque provisto de un mecanismo interno que mediante la acción de la gravedad permite concentrar los sólidos en el fondo y hace fluir el agua clarificada hacia la superficie para ser recogida en el rebose del tanque. Por lo general, las partes que integran estos equipos de sedimentación en esencia son las mismas desde los primeros diseños, sin embargo, los equipos más modernos presentan avances y nuevas tecnologías aplicadas a los componentes que integran el mecanismo interno proporcionando un mayor rendimiento en operación.

Con el paso de los años, los espesadores han experimentado una gran reducción en el tamaño y en el diámetro requerido para una misma tasa de alimentación de sólidos, principalmente debido al desarrollo de una alta eficiencia en los floculantes poliméricos

actuales y a la mejora en eficiencia producto de nuevos sistemas de alimentación. Actualmente existen cuatro tipos de espesadores: Convencional, Alta capacidad (HRT), Alta densidad (HDT) y Cono profundo, siendo este último la tecnología más actual [3]. En la faena estudiada los espesadores son del tipo HRT, por lo tanto, será ese el que se mencionará a continuación.

2.3 Espesador HRT (High Rate Thickeners)

Los espesadores HRT se caracterizan por que tienen mayor capacidad que los espesadores convencionales, en estos equipos el pozo de alimentación es más profundo que en el espesador convencional, lo que permite la descarga de la pulpa de alimentación bajo el nivel del sedimento, evitando así el contacto **directo entre el líquido que asciende y los sólidos que sedimentan**. La alimentación entra en el mismo lugar donde se agrega el floculante y lo dispersa rápidamente, logrando un mezclado gradual en su descenso, con una mejor acción del floculante [2]. En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar lo mencionado anteriormente, donde no se observa una zona de sedimentación y solo una zona de sólidos y compactación.



Figura 4. Comparación de la forma de alimentación de espesador convencional (izq.) y HRT (der.) [2].

En particular, el espesador de relaves Outotec de 86 [m] instalado en la faena minera es del tipo HRT (*high rate thickener*), el cual es alimentado con pulpa de alimentación mediante dos cañerías de 800NB cada una. Esta pulpa es alimentada tangencialmente al *feedwell* de tipo Vane feedwell® (Outotec), donde la pulpa es diluida con la misma agua sobrenadante del espesador mediante un sistema que se denomina Autodil® (Outotec) y mezclada con floculante para la generación de flóculos que mediante acción gravitacional decantan a la zona inferior formando una cama de sólidos [4].

El líquido clarificado alimenta por rebalse una canaleta periférica de recolección ubicada en la parte superior del espesador y sale a través de dos tuberías de 1100NB cada una. Mientras que el *underflow* sedimentado es transportado mediante sistema de rastras a un cono central ubicado en la base del espesador, donde es bombeado y extraído para que siga a la otra parte del proceso. A continuación, en **Figura 5** se muestra la vista general del espesador HRT de la faena minera [4].

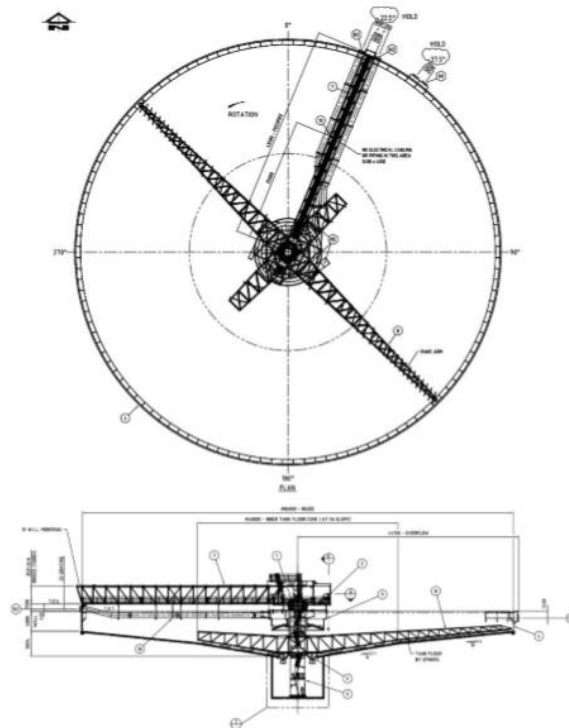


Figura 5. Ejemplo de vistas de espesador HRT [4].

2.3.1 Criterio de diseño

A continuación, se muestran en **Tabla 1** los criterios de diseño estipulados para el espesador HRT.

Tabla 1. Criterios de diseño del espesador HRT.

Parámetro	Valor	Unidades
Concentración de sólidos descarga	62	[%]
Torque máximo	50	[%]
Área unitaria	0,1	[m ² /t/d]
Tasa de espesamiento	0,46	[t/h/m ²]
Diámetro	86	[m]
Altura de cono	3,54	[m]
Sólido seco de alimentación	126.000	[t/d]

2.3.2 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación (*feedwell*) es el componente del espesador que está encargado de recibir y acondicionar la pulpa alimentada al equipo. El diseño del *feedwell* se realiza para permitir la de-aireación de la pulpa, por lo que la alimentación al *feedwell* es de manera tangencial para promover la correcta mezcla entre el agua clarificada, el floculante y la pulpa. Existen distintos diseños, siendo los más comunes los pozos de alimentación ubicados en la zona superior en espesadores convencionales y los de pozo profundo que están ubicados en la zona inferior (cercana a la zona de compresión) en el caso de

espesadores HRT. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un esquema general del *feedwell* de un espesador y como se distribuyen los flujos gracias a su forma.

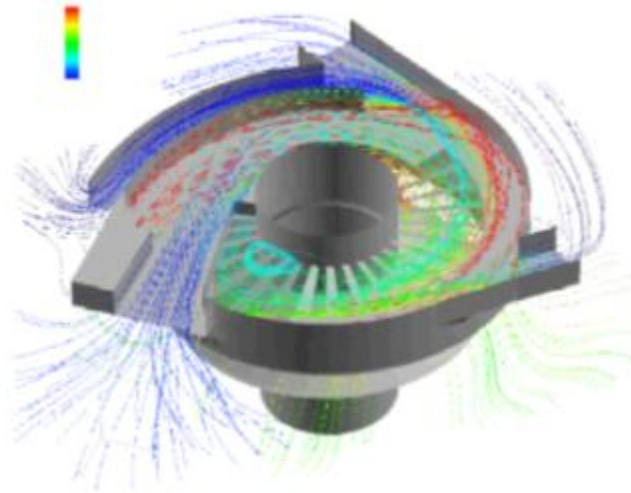


Figura 6. Esquema del funcionamiento del *feedwell* [4].

En el caso de la empresa minera considerada en este estudio, el floculante en un inicio era inyectado por medio de cuatro aspersores de floculante (*spargers*), sin embargo, al no conseguir una mezcla deseada y una velocidad recomendada por el manual de operación de 1,9 [m/s], el floculante se está dosificando actualmente por medio de un arreglo rectangular de tuberías ubicadas en la parte superior de la alimentación al *feedwell* del espesador [4].

Sistema de dilución

Autodil® presentado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** corresponde a un sistema de dilución de la pulpa de alimentación al espesador, que utiliza como agente la solución clarificada producida por el proceso. El agua sobrenadante ingresa por la parte superior del *feedwell* donde es usada para diluir la pulpa entrante y permitir la mezcla entre la alimentación y el floculante.

El sistema ocupa la diferencia de presión entre la pulpa al interior del *feedwell* y la solución clarificada fuera de este. Ranuras y compuertas ubicadas en el *feedwell* permiten al agua de dilución mezclarse con la pulpa en el interior. Como el sistema opera con un diferencial de cabeza hidráulica, es independiente de la proporción del flujo másico que ingresa al equipo [4].

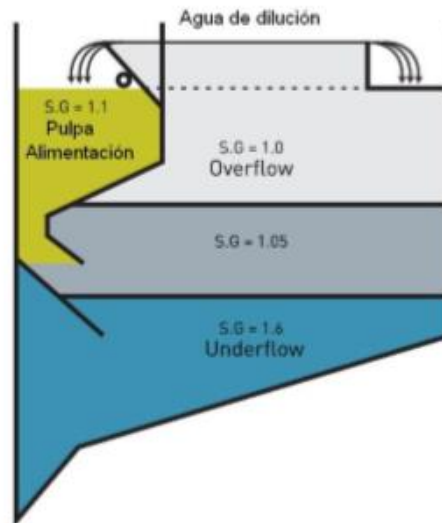


Figura 7. Funcionamiento del sistema de dilución Autodil® con la respectiva gravedad específica (S.G) en cada sector del espesador [4].

Actualmente en la faena en estudio se cuenta con este sistema de dilución, pero se ha identificado que no se logra cumplir con la agitación óptima (1,9 [m/s]) para homogenizar la pulpa de alimentación, lo que impide llegar al 15 [%] de sólidos de diseño. Para optimizar el sistema se ha instalado un sistema de dilución forzada que busca mejorar estos aspectos, pero debido a que es una medida tomada recientemente se desconoce el efecto que ha tenido en el sistema.

2.3.3 Medición de variables operacionales principales

Para que los espesadores de relaves puedan trabajar de forma óptima se debe tener un control exhaustivo de los parámetros operacionales más relevantes dentro del proceso. A continuación, se mencionarán las formas de control de los espesadores instalados en la faena minera estudiada [4]. Dentro de las variables operacionales que se miden en el lazo de control se encuentran.

- Torque percibido en las rastras
- Altura de cama
- Concentración de sólidos de alimentación y descarga
- Flujos de alimentación y descarga
- Dosificación y flujo de floculante
- Tasa de agua sobrenadante.

2.3.3.1 Sistema de control

La filosofía de control está orientada a la producción de *underflow* (UF) con densidades de sólido adecuadas de acuerdo con el tipo de espesador y a la recuperación de *overflow* (OF) de bajos contenido de sólidos en suspensión. Para ello el esquema de control operacional

se resume en la **Figura 8** y está orientado a las variaciones en la alimentación al espesador [4].

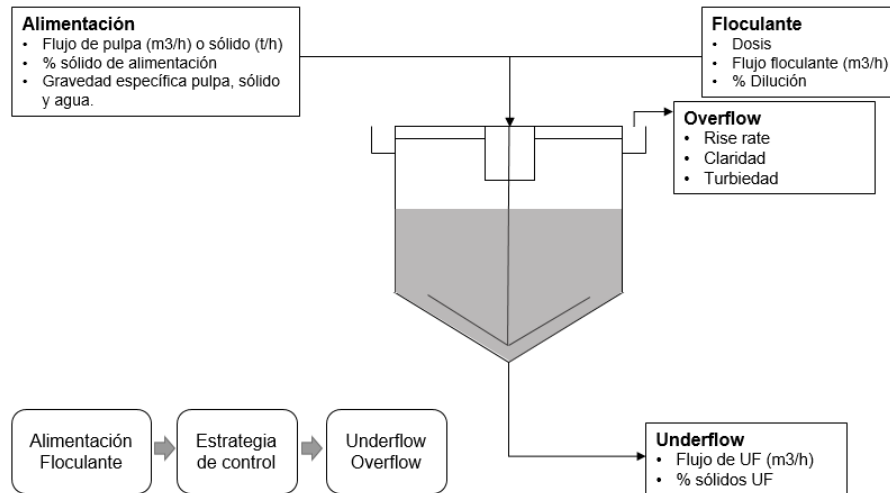


Figura 8. Esquema de sistema de control del espesador HRT [4].

2.3.3.2 Medición de torque

La medición de torque es realizada en forma indirecta a través de la medición de presión de operación en la unidad hidráulica. La presión hidráulica se muestra en un indicador digital con escala de 0-100 [%]. La señal es generada por un transductor/transmisor de presión hidráulica montado sobre la unidad. Esta variable es proporcional al torque de la rastra y existe un *switch* de presión que detiene la unidad si el torque es crítico y sobrepasa una presión equivalente a 95 [%] del valor máximo, sin embargo, existe un criterio de control más conservador en las operaciones industriales que está asociado al torque máximo, que provoca el levantamiento de las rastras en el espesador cuando se alcanza un valor entre el 35-50 [%] del torque máximo. La protección final contra un torque muy alto es una válvula de alivio de presión [4].

2.3.3.3 Medición de cama (Bed mass sensor)

En la pared lateral del cono inferior de descarga generalmente se puede encontrar un transmisor de presión, que genera una señal FF H1 (Fieldbus Foundation) que representa la masa de cama al interior del espesador, pudiendo alcanzar valores ubicados entre 0-100 [%] (en el transmisor de presión), sin embargo, mediante el lazo de control esta señal se transforma en [kPa]. El Fieldbus Foundation corresponde a una red de control basada en PLCs que permite enviar rápidamente las señales de la operación a un aparato portátil, en donde mediante un software es posible llevar el control de las variables operacionales en tiempo real. Esta señal se usa normalmente para controlar la abertura de la descarga del espesador [4].

2.4 Tecnologías de análisis mineralógico

La mineralogía es una de las variables a considerar más importantes del proceso productivo, ya que definirá el comportamiento que tendrá el mineral a medida que va siendo tratado en las diferentes etapas de la operación. El análisis mineralógico en conjunto con otros estudios es relevante a la hora de diseñar una planta, equipos y lograr óptimos resultados operacionales.

Hoy en día existen varias técnicas para poder medir la mineralogía de los yacimientos, tales como, XRD, XRF, QEMSCAN, NIR, entre otras. A continuación, se repasarán algunas de ellas.

2.4.1 Análisis QEMSCAN

El QEMSCAN (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy*) es un sistema automatizado que permite realizar análisis químicos y mapas minerales de alta resolución. Funciona gracias a un SEM (*Scanning Electron Microscope*) y cuatro espectrómetros de rayos X (EDS: *energy-dispersive X-ray spectrometers*). Al incidir el haz de electrones del SEM sobre la muestra se generan *backscattered electrons* (BSE) que son medidos para localizar las partículas individuales dentro de la muestra. Posterior a esto, se realiza un barrido sobre la superficie en una grilla de espaciamiento definida por el usuario, con una resolución comúnmente entre 0.2 [μm] y 25 [μm]. El haz de electrones genera la emisión de rayos X al pasar de un estado de mayor energía a uno menor (cambio de orbitales). Los espectros de rayos X obtenidos son comparados con una base de datos y de esta forma se identifican todas las fases minerales presentes en la muestra en cada espacio de la grilla [5]. A continuación, se presenta un esquema del análisis QEMSCAN en **Figura 9**.



Figura 9. Diagrama del funcionamiento de análisis QEMSCAN [6].

El análisis QEMSCAN tiene distintos modos de análisis, a continuación, se detallarán los tipos de análisis [5].

- **Análisis Mineralógico de Partículas** (*Particle Mineral Analysis, PMA*)
- **Análisis Mineralógico en Masa** (*Bulk Mineral Analysis, BMA*)
- **Búsqueda de Mineral Específico** (*Specific Mineral Search, SMS*)
- **Búsqueda de Mineral Traza** (*Trace Mineral Search, TMS*)
- **Escaneo de campo** (*Field Scan*)

2.4.2 Análisis NIR (*Near Infrared Reflectance*)

La tecnología NIR involucra luz interactuando con un material, donde una radiación electromagnética ocurre en forma de ondas. La longitud de onda en el espectro NIR se mide normalmente en nanómetros y en este ensayo se encuentra entre 750 [nm] a 2600 [nm]. Las uniones de los átomos vibran a cierta frecuencia y cada tipo de estas uniones dentro de una muestra absorben los rayos NIR de una longitud de onda específica, mientras que las otras longitudes de onda son reflejadas.

En la práctica, la muestra a ser analizada es bombardeada por rayos NIR de diferentes longitudes de onda y por cada una, algunos de los rayos serán absorbidos por uniones químicas específicas. Al mismo tiempo otros rayos son diseminados y reflejados por otras uniones. Los rayos esparcidos, reflejados y/o transmitidos son concentrados dentro de una celda de medición, donde un número de reflejos de diferentes longitudes de onda son medidos y luego convertidos en resultados analíticos. La profundidad de penetración del haz dentro de la muestra no está determinada por la posición del detector, sino más bien por la potencia de la fuente de luz [7]. A continuación, en la **Figura 10** se observan las posibles trayectorias de los rayos incidentes.

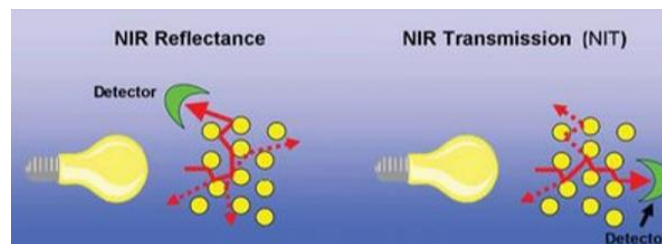


Figura 10. Esquema de la penetración de rayos de reflectancia NIR y rayos de transmisión NIR [7].

Cabe destacar que un paso muy importante para la tecnología NIR es la calibración del equipo y se debe llevar a cabo mediante el análisis del contenido de arcillas (en este caso) por medio de otras técnicas analíticas para determinar la composición real de las muestras y luego ser introducidas en el instrumento NIR, donde se obtienen las diferentes longitudes de onda que son analizadas por un microprocesador y generan así la calibración del equipo [7].

2.4.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (XRD) consiste en el bombardeo de rayos X a una muestra, cuya preparación involucra la conminución de esta para que los granos queden orientados en distintas direcciones. Los rayos X se difractan según la ley de Bragg y se registran los peaks de difracción. Cada fase cristalina tiene un espectro de difracción característico, por lo que quedan caracterizadas siempre y cuando no se produzcan problemas como el solapamiento de peaks o el efecto matriz, donde una fase altamente cristalina oscurece a una pobremente cristalina [8].

2.5 Mineralogía en relaves

En los gráficos mostrados en **Figura 11**, **Figura 12**, **Figura 13** y **Figura 14**, elaborados por un estudio mineralógico realizado por Lucas Francisco Contreras Torres, ex-alumno de la Universidad de Chile, donde se buscaba realizar una caracterización mineralógica del proceso metalúrgico y el impacto de esta en la producción de concentrados de cobre y molibdeno en CMDIC se puede apreciar que las especies mineralógicas pertenecientes a los filosilicatos como el cuarzo, arcillas, biotita, clorito y moscovita se van en su mayoría a las colas o relaves de los procesos mineros. Se observa que uno de los minerales que están en mayor cantidad es el cuarzo que representa cerca del 45% de la alimentación al proceso productivo y que cerca del 99 [%] de este mineral se va a los relaves o cola. Estos elementos son de gran interés para el análisis del comportamiento que tendrá la pulpa de relave una vez que ingrese a las etapas de espesamiento de relaves [6].

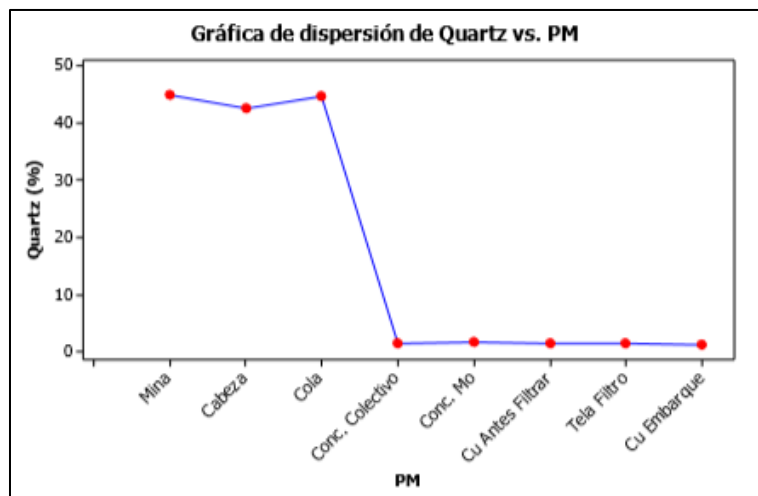


Figura 11. Cuarzo en cola vs PM: punto muestreo [6].

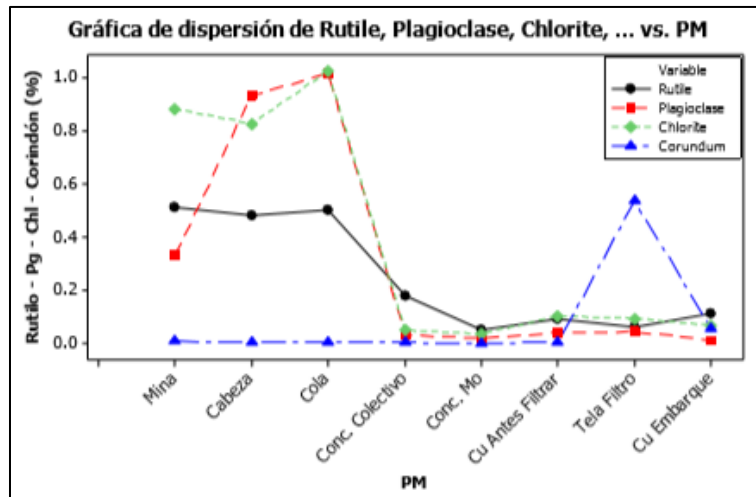


Figura 12. Clorito en cola (color verde) vs PM: punto muestreo [6].

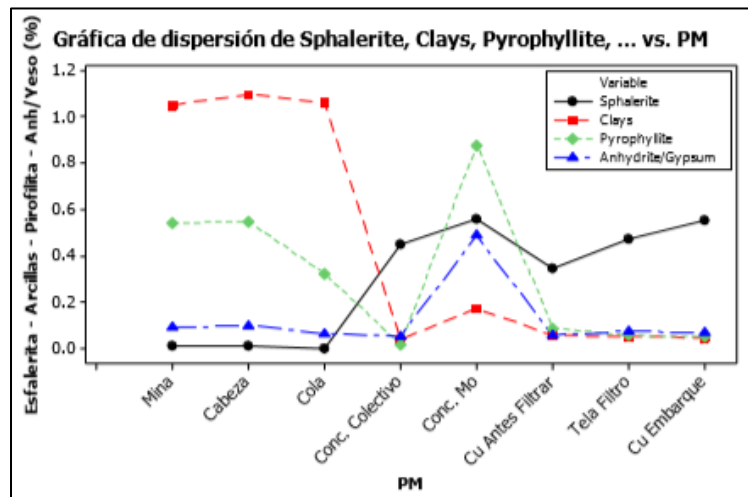


Figura 13. Arcillas en cola (color rojo) vs PM: punto muestreo [6].

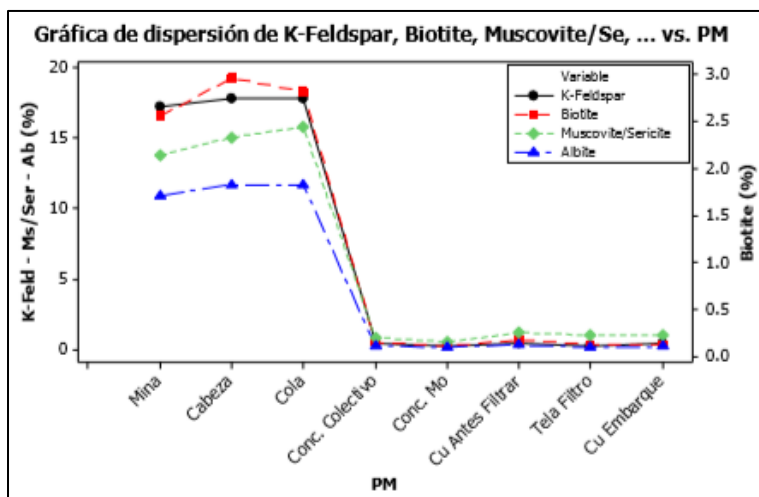


Figura 14. Moscovita/Sericita (color verde) y biotita (color rojo) en cola vs PM: punto muestreo [6].

2.5.1 Filosilicatos

Los yacimientos de minerales al ser de baja ley poseen una gran cantidad de elementos que no son de interés económico (ganga) y son los que determinan en gran medida el comportamiento que tiene el proceso productivo. Dicho esto, dentro de la ganga se encuentran los filosilicatos que se caracterizan por ser un material de granulometría muy fina ($<2 \mu\text{m}$) y según su naturaleza química puede afectar gravemente el funcionamiento del área seca y húmeda de una faena minera. A continuación, se hará una breve descripción de la naturaleza de estos y sus propiedades.

Se han realizado estudios en la búsqueda de cuantificar el efecto de los filosilicatos en las propiedades de los relaves como, por ejemplo, [9], [10], y [11]. En ellas se ha concluido que el efecto en los relaves mineros depende significativamente del tipo y en qué proporción se encuentran en este tipo de pulpas.

Estos minerales poseen una estructura molecular de tipo tetraédrica-octaédrica (TO) o tetraédrica-octaédrica-tetraédrica (TOT) como se puede observar en **Figura 15** [11] y dependiendo de su naturaleza y capacidad de unión con iones hidratados, pueden generar menores o mayores problemas en sus propiedades reológicas y sedimentológicas.

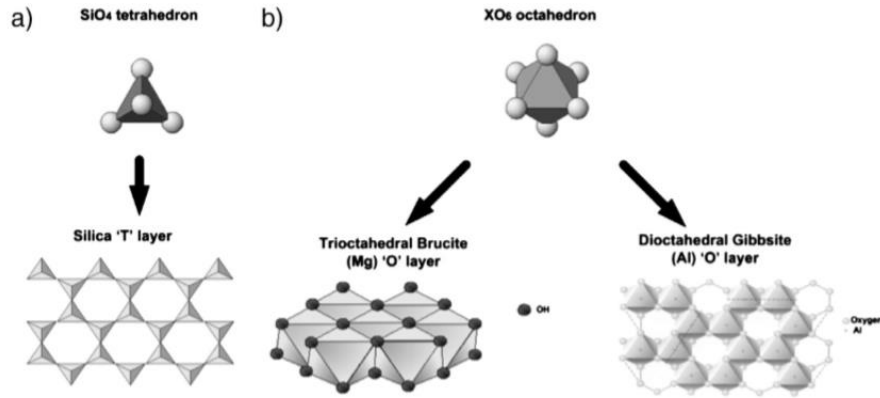


Figura 15. Esquema de uniones tipo 'T' y 'O'. (a) tetraedro de SiO_4 y capa de sílice 'T' (b) Unidad octaédrica (XO_6) [11].

Como se menciona anteriormente en la **sección 2.5** en el proceso productivo existe una gran posibilidad de que elementos como la moscovita, illita, crisolito, biotita, arcillas, clorito, cuarzo, entre otras especies oxidadas se vayan a las colas (relaves) del proceso de flotación de minerales, por lo que, en la etapa de separación sólido-líquido hecha en los espesadores de relaves estos elementos determinan en gran medida el comportamiento que tendrá la pulpa. En la se puede observar las distintas clasificaciones de los filosilicatos y como son sus estructuras básicas, algunas más complejas que otras y clasificándose en serpentinas, talcos, micas, clorito y arcillas (caolinita, illita y arcillas expansivas) [11].

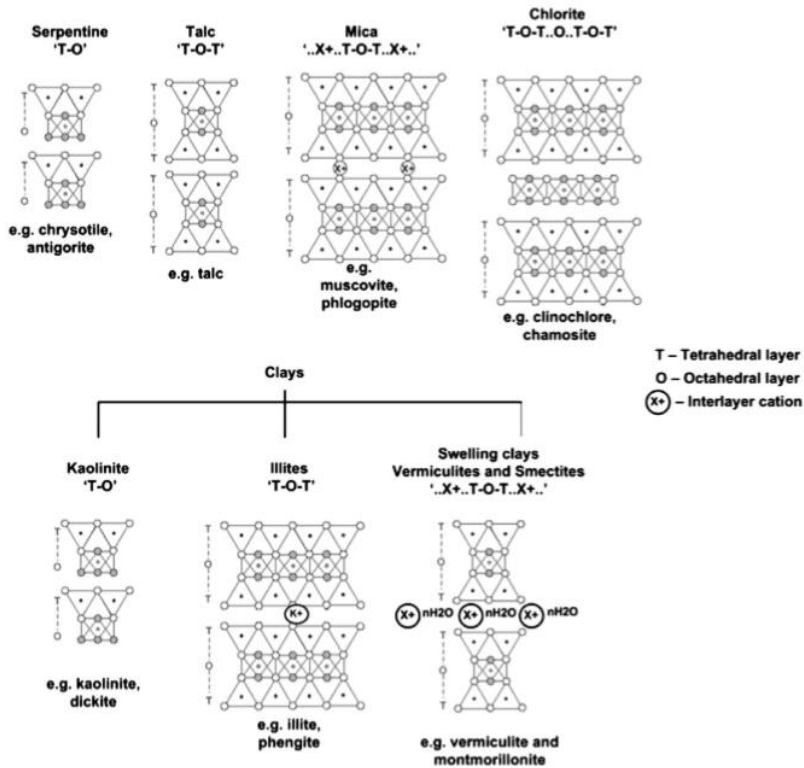


Figura 16. Clasificación de los filosilicatos [11].

2.5.1.1 Efecto de los filosilicatos en la reología de la pulpa

Cada elemento que conforma la pulpa de relave tiene un efecto en su reología y para entender de qué manera la afecta se deben realizar estudios particulares para cada tipo de mineral. Estas pulpas están compuestas por filosilicatos principalmente y son estos los que definen el comportamiento de este fluido. Comprender el efecto de los distintos elementos químicos en la tensión de fluencia permite evitar problemas operacionales, realizar mejores planes de explotación y prepararse de mejor manera en las distintas áreas del proceso productivo para evitar una disminución de tratamiento en la planta.

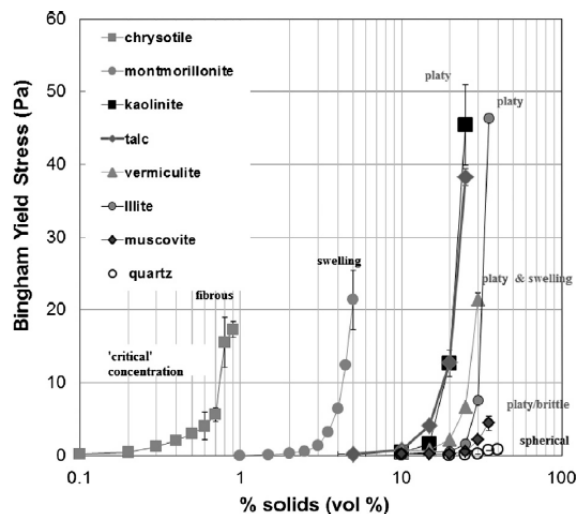


Figura 17. Comparación de tensión de fluencia de diferentes filosilicatos [11].

De acuerdo con estudios realizados con distintas especies de filosilicatos por Ndlovu con muestras de filosilicatos de diferentes morfologías. El Crisolito y la Montmorillonita que presentan morfologías más irregulares son los filosilicatos que más afectan la tensión de fluencia, mientras que, la Moscovita y el Cuarzo de estructura plana son los que menos afectan la tensión de fluencia [11].

2.6 Sedimentación de relaves

Debido al beneficio económico y ambiental que genera una óptima sedimentación de relaves es necesario contar con una correcta caracterización mediante ensayos de sedimentación hechos en laboratorio. El ensayo que se realiza permite la obtención de la velocidad de sedimentación característica de cada pulpa de relave.

Las gráficas para obtener la velocidad de sedimentación se obtienen desde una probeta cilíndrica, en donde se va registrando a qué altura se encuentra la pulpa en un tiempo determinado. Por lo general, la gráfica posee una parte lineal inicial y luego es asintótica a medida que se va llegando a la zona de consolidación de la pulpa. La velocidad de sedimentación es calculada mediante la pendiente de la parte lineal de la curva y es expresada en [cm/min] o [m/s], según corresponda.

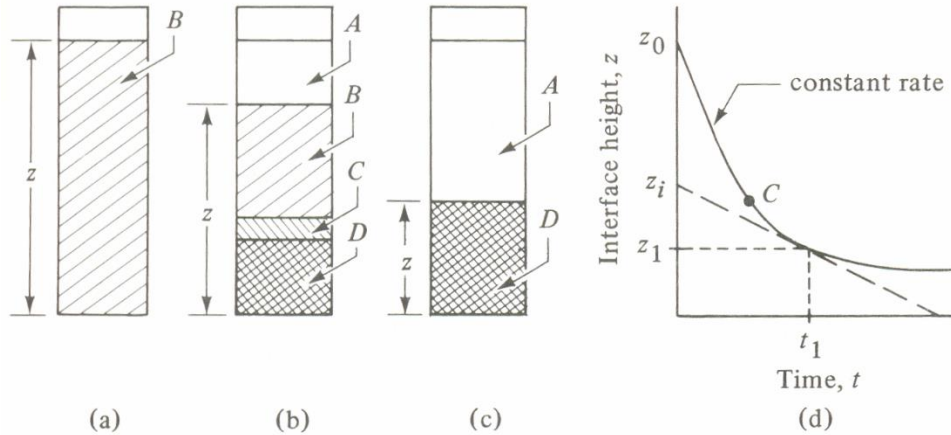


Figura 18. Gráfica de altura vs tiempo para la determinación de la velocidad de sedimentación [2].

2.6.1 Efecto de la concentración de sólidos

A mayor concentración de sólidos es más lenta la velocidad de sedimentación, ya que a mayor cantidad de sólidos existe una mayor probabilidad de colisiones dificultando la sedimentación. Este comportamiento se puede observar en **Figura 19**, el cual corresponde a un gráfico obtenido en CI-JRI en un estudio de velocidad de sedimentación a dos concentraciones de sólidos diferentes. Se observa que la pendiente más pronunciada es la del Cp de 9[%], por lo tanto, es más rápida en sedimentar que la misma muestra a un Cp de 12[%].

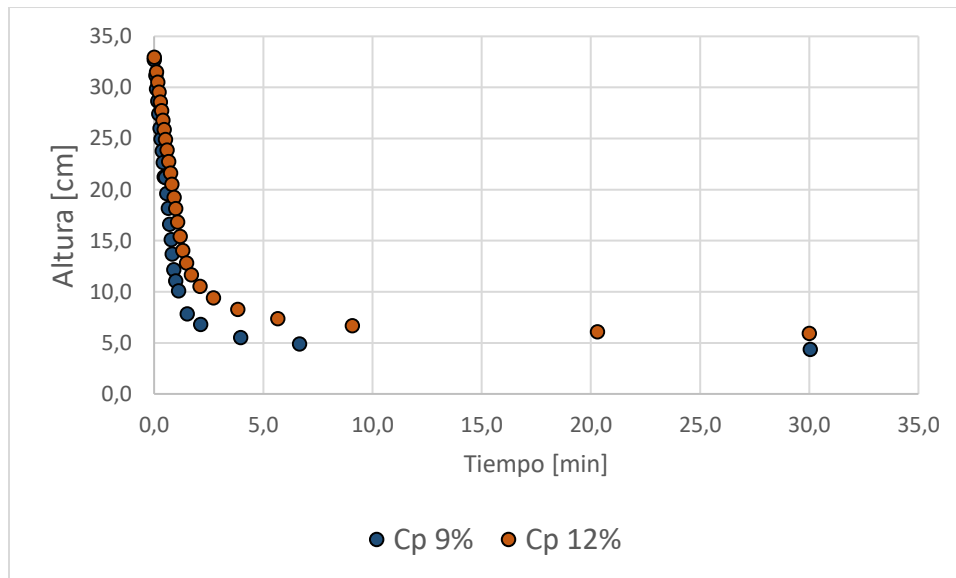


Figura 19. Altura vs tiempo para una misma muestra de relave de cobre estudiada en CI-JRI. Cp=9% en azul y Cp=12% en naranja.

2.6.2 Efecto granulométrico

La velocidad de sedimentación disminuye cuando hay partículas más finas, mientras que si hay partículas más gruesas aumenta su velocidad. Esto se explica mediante la ecuación (1), donde se ve que el diámetro de partícula es directamente proporcional con la velocidad de sedimentación [2].

$$vt = \sqrt{\frac{4 * (\rho_p - \rho) * g * D_p}{3 * C_D * \rho}} \quad (1)$$

Donde:

vt = Velocidad terminal

ρ_p = Densidad de pulpa

ρ = Densidad del agua

g = Aceleración de gravedad

D_p = Diámetro de partícula

C_D = Coeficiente de Drag (depende del Reynolds)

2.6.3 Otras variables

Dentro de otras variables que afectan la sedimentación de relaves se encuentran el pH, el tipo de floculante que se utiliza, la dosificación de floculante y la mineralogía en general. Para determinar en qué afectan estas variables se realizan experimentos particulares para cada pulpa. En el centro de investigación JRI se realizan este tipo de estudios con diversas pulpas de relaves proporcionadas por cada cliente en diversos proyectos asociados.

2.7 Reología

Dentro del ámbito del espesamiento industrial, la reología de relaves es una variable de gran relevancia para definir parámetros de diseño, principalmente los requerimientos de transporte de suspensiones y en particular, en el sistema mecánico que permite el movimiento de las rastras, ya que el ensayo reológico entrega la tensión de fluencia máxima del fluido (pulpa) estudiado. Actualmente en diversas operaciones mineras se han dado cuenta que contar con una caracterización reológica del yacimiento mejora los planes de producción (recuperación de agua) y pueden evitar posibles problemas operacionales, ya que permite realizar planes de contingencia anticipadamente.

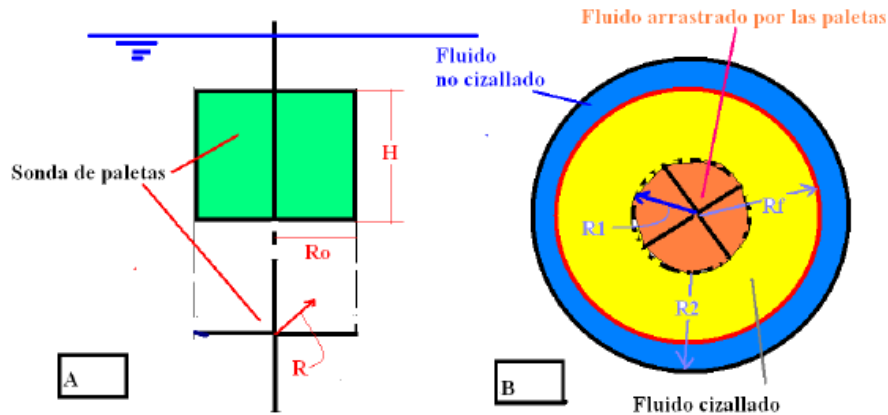


Figura 20 (a) Vista lateral de sensor de paleta VANE; (b) Vista superior de ensayo VANE [12].

Una de las metodologías utilizadas para la determinación de parámetros reológicos es el método de medición VANE o paleta, que permite determinar la tensión de fluencia y que se cumple bajo los siguientes supuestos: el primero es que la tensión tangencial medida en la superficie cilíndrica limitada por las paletas τ_0 es constante, lo segundo es que la tensión tangencial sobre las caras circulares (superior e inferior) del cilindro varía linealmente con el radio, desde cero en el centro hasta τ_0 en el borde, la tercera es que el torque sobre el eje es despreciable y la última es que el fondo de la vasija está suficientemente alejado de la sonda como para que no influya sobre ella [12].

Un ejemplo de gráfica de tensión de corte versus tiempo se puede ver en **Figura 21** donde la tensión de fluencia es el valor máximo obtenido en la gráfica.

El cálculo del torque y la tensión de fluencia bajo los supuestos antes mencionados se pueden ver en la ecuación (2) y (3).

$$T = T_{manto} + T_{cara} = (2\pi R_0 H)\tau_1 R_0 + 2 \int_0^R 2\pi R \tau_1 R dR \quad (2)$$

$$\tau_1 = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{\frac{1}{3} + \frac{H}{D}} \right] \cdot \frac{T}{D^3} \quad (3)$$

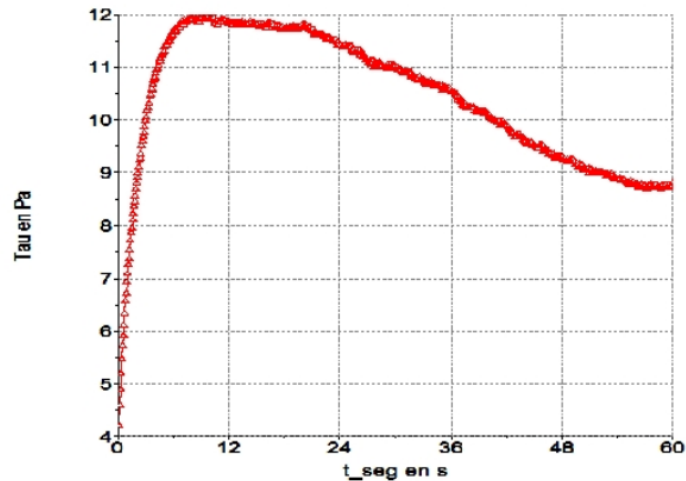


Figura 21. Gráfica obtenida por método VANE de tensión de fluencia vs tiempo en CI-JRI [12].

2.7.1 Efecto del tamaño de las partículas en parámetros reológicos

La distribución granulométrica del material procesado es uno de los parámetros que afectan a la reología. El material que es más fino tiende a aumentar los valores de tensión de fluencia obtenidos a medida que aumentamos la concentración de sólidos. Por ejemplo, en **Figura 22** se puede observar que en un estudio que contempló 3 granulometrías de muestras de bauxita, la que tiene una granulometría menor ($d_{90} 53 \mu\text{m}$) alcanza valores de tensión de fluencia de 110 [Pa] aproximadamente, mientras que para una granulometría con un d_{90} de 212 μm a una concentración de sólidos parecida sólo se obtiene 18 [Pa], por lo tanto una granulometría muy fina puede causar grandes problemas operacionales en los espesadores de relaves debido a que los altos valores de tensión de fluencia se traducen en alto torque y afectan el correcto funcionamiento de las rastras.

En resumen, una granulometría fina provoca que la curva de tensión de fluencia versus concentración de sólidos se mueva hacia la izquierda, aumentando los valores de tensión de fluencia, como se puede ver en **Figura 22** [10].

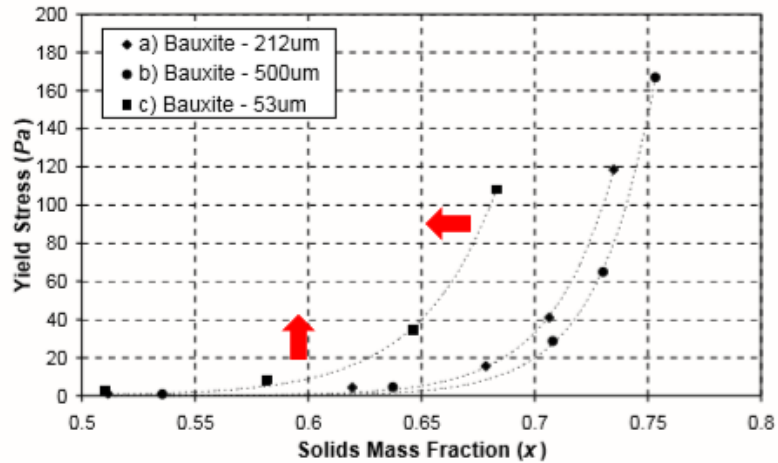


Figura 22. Tensión de fluencia versus concentración de sólidos con distintas distribuciones granulométricas [10].

Estudios sobre el efecto del tamaño de partículas indican que la tensión de fluencia es inversamente proporcional al tamaño de partículas de manera cuadrática, como se observa en la ecuación (4) [12].

$$\tau_f \approx d^{-2} \quad (4)$$

τ_f = Tensión de fluencia

d = Diámetro de partícula

2.7.2 Efecto de la concentración de sólidos

El valor de tensión de fluencia de una suspensión (por ejemplo, pulpa de relaves) aumenta cuando hay una mayor concentración de sólido. Si bien no se sabe exactamente la dependencia matemática del efecto en la tensión de fluencia si se puede decir que la concentración de sólidos afecta de manera directamente proporcional al cubo [12]. A continuación, en **Figura 23** se puede apreciar lo sensible que es la tensión de fluencia a medida que aumenta la concentración volumétrica de sólidos [12].

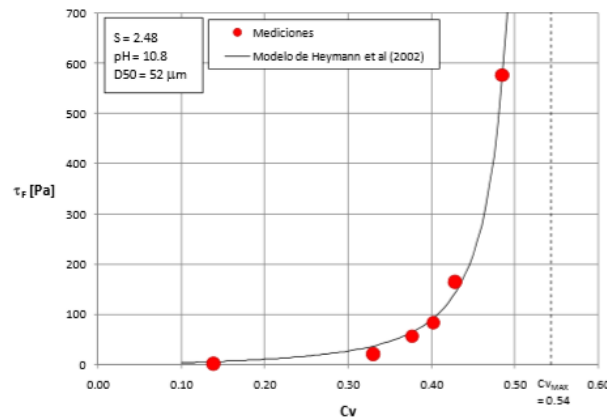


Figura 23. Tensión de fluencia versus concentración volumétrica de sólidos [12].

2.7.3 Efecto del cizalle

La pulpa una vez que entra al espesador es floculada para permitir generar sólidos que sedimenten de una manera más apropiada. Cuando la pulpa está floculada esta posee interconexiones entre partículas de naturaleza química, sin embargo, cuando la pulpa pasa por equipos que la agitan o le aplican una fuerza externa, estas uniones se rompen [10] [13]. La curva tiende a moverse a la derecha disminuyendo los valores de tensión de fluencia, como se observa en **Figura 24**.

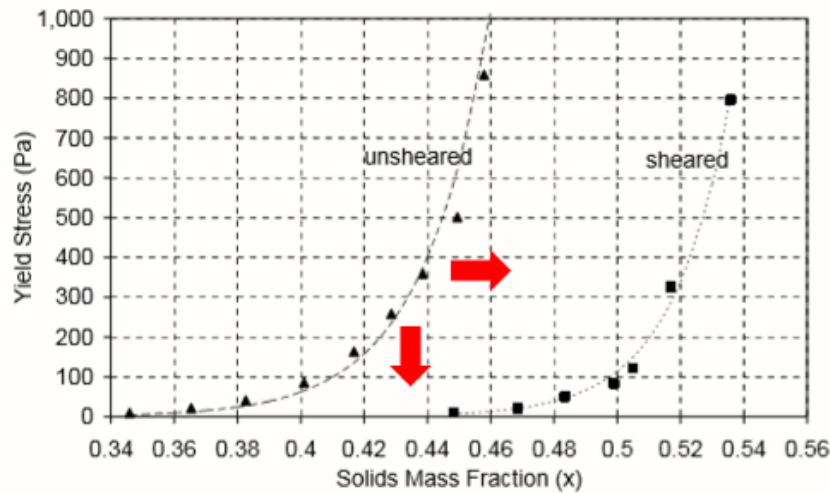


Figura 24. Efecto del cizalle en la tensión de fluencia versus concentración en peso de sólidos [10].

Capítulo 3. Procedimiento experimental y equipos

3.1 Metodología experimental

En **Figura 25** se presenta en forma esquemática los ensayos realizados a partir de las muestras recibidas de los espesadores E1 y E2. Diariamente se recibe pulpa de alimentación, pulpa de descarga, overflow y agua de procesos. Donde a la pulpa de alimentación se le denominará MA- (n° muestra), a la pulpa de descarga MD- (n° muestra) y al overflow de los espesadores MO- (n° muestra). Las muestras son enumeradas en orden creciente al número de ensayos. En total fueron 21 muestras de pulpa de alimentación, 21 de pulpa de descarga y 21 overflow de espesadores, por lo tanto, las muestras van desde MA1 a MA21, MD1 a MD21 y MO1 a MO21 y en específico a las muestras M20 y M21 se les realiza un estudio de dosis de 10[gpt] y 15[gpt].

Las pulpas de alimentación se utilizan para los ensayos semi-piloto de espesamiento y son caracterizadas mediante reología VANE, pruebas de sedimentación en probetas de 1[l], granulometría láser rotap y láser, mineralogía NIR y mineralogía QEMSCAN solo a 3 muestras, las cuales tuvieron los comportamientos más extremos en reología y sedimentación. Las pulpas de descarga de los espesadores son caracterizadas mediante reología VANE y el overflow de los espesadores se les realiza pruebas de turbidez. En el ensayo semi-piloto de espesamiento, las pulpas de descarga de columna son caracterizadas mediante reología VANE y al agua sobrenadante también se le mide la turbidez.

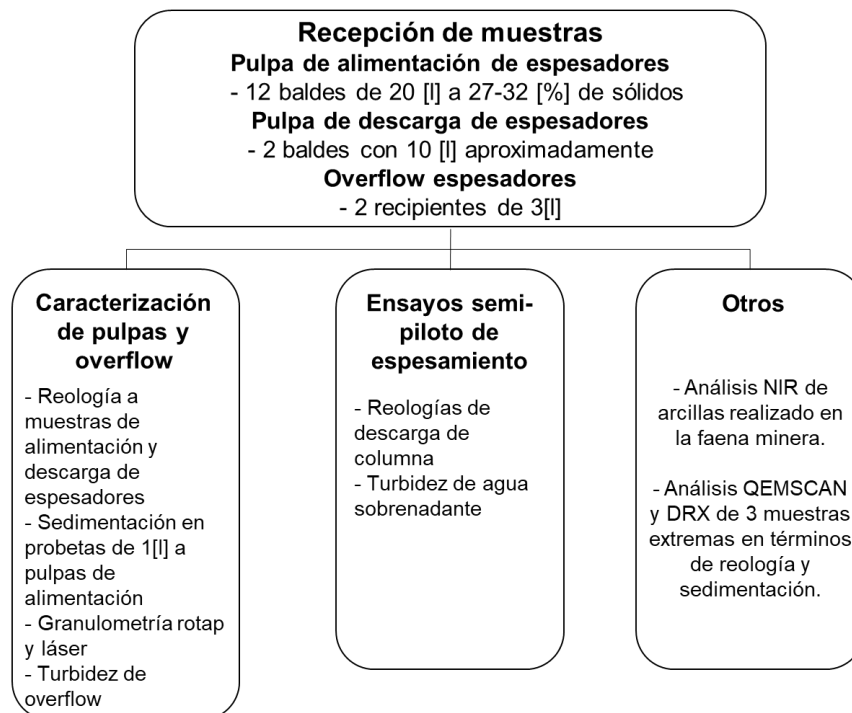


Figura 25. Resumen metodología experimental general.

En la **Figura 26** se pueden observar los puntos de muestreo considerados para el experimento que son en el cajón de alimentación a ambos espesadores (punto 1) donde se

retiraban 12 baldes de 20[l] de pulpa de alimentación, la canaleta de recepción del rebose de los espesadores (punto 2) donde se retiraba agua sobrenadante en recipientes de 3[l] en cada espesador y en la cañería hacia el tranque de relaves (punto 3) donde se retiran 10[l] de pulpa de descarga, aproximadamente para cada espesador.

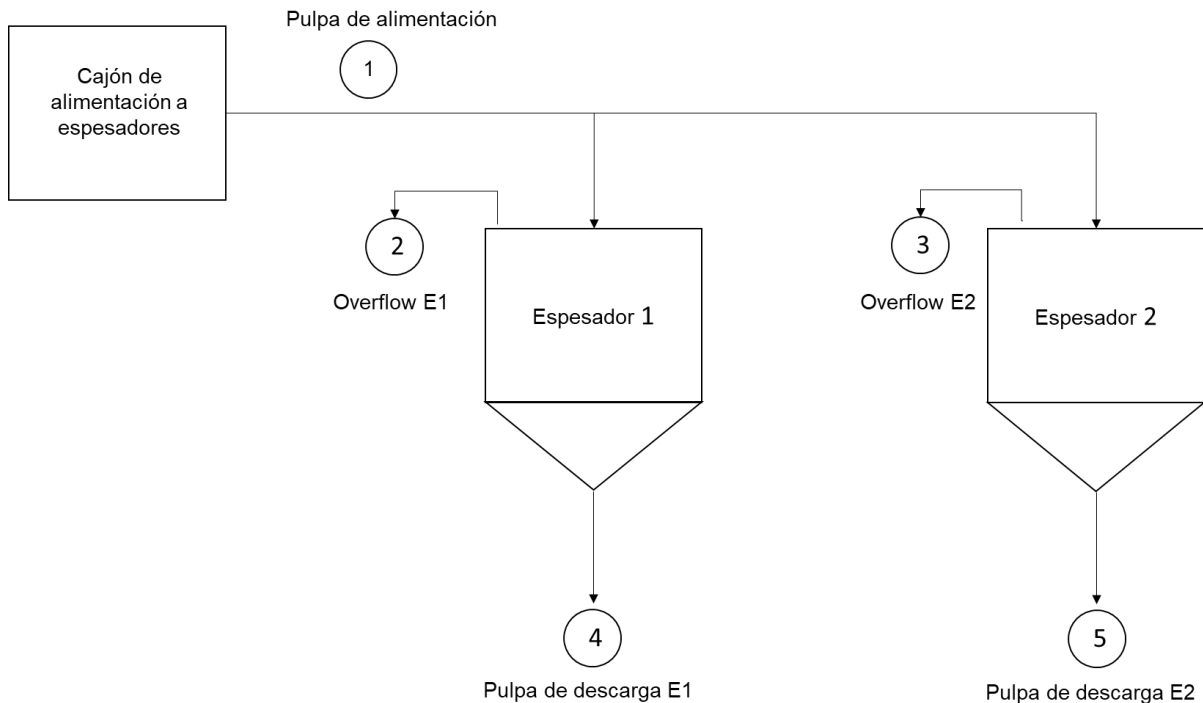


Figura 26. Esquema de puntos de muestreo en los espesadores de relave E1 y E2.

3.2 Ensayo semi-piloto en columna de espesamiento

Los ensayos de espesamiento consideran parámetros operacionales relacionados con la operación de los espesadores industriales en estudio, la **Tabla 2** resume las condiciones de operación utilizadas en las pruebas semi piloto. El propósito del ensayo es mantener un flujo de alimentación del 100 [%] independiente de cual fuera el flujo de descarga, ya que en operación lo más óptimo es tratar de trabajar siempre al tonelaje máximo permitido.

La pulpa de alimentación que se recibe viene con un 27-32[%] de concentración de sólidos, por lo tanto, es acondicionada con agua de procesos para lograr el Cp de alimentación de 15[%] requerido para la realización de los ensayos semi-piloto de espesamiento. Además, el floculante es preparado a partir de un floculante madre de 2,5[g/l] que es diluído a 0,2[g/l], correspondiente a la dilución de planta.

Tabla 2. Criterios estándar para los ensayos en columna de espesamiento.

Estándar prueba en columna		
Parámetro	Valor	Unidades
Cp de alimentación	15	[%]

Cp descarga deseado	62	[%]
Dosis floculante	15	[g/t]
Dilución floculante	0,2	[g/l]
Flujo alimentación	0,7	[l/min]
Flujo de floculante	9,2	[ml/min]
Área unitaria	0,1	[m ² /t/d]

La pulpa es alimentada mediante una bomba peristáltica desde un estanque a un flujo de 0,7 [l/min], a su vez, la dosificación del floculante es de 15 [g/t] y para lograr dicho parámetro se dosifica a un flujo de 9,2 [ml/min] en contra corriente a la manguera de alimentación.

Al principio, se debe mantener esta condición de flujo de alimentación y floculante con descarga cerrada hasta generar una cama de sólidos que permita realizar el estudio de las variables. Una vez alcanzada la estabilización y la altura de cama óptima del ensayo se procede a abrir el flujo de descarga al 100 [%], en el caso de que la cama de sólidos no se estabilice se varía el flujo de descarga para mantener lo más estable posible este parámetro. Cuando recién están todos los parámetros de la columna estables es posible realizar los muestreos de overflow y underflow.

Las variables que se controlan dentro del ensayo son el flujo de alimentación, la concentración de sólidos de la alimentación, el flujo de overflow, el flujo de descarga, la concentración de sólidos de descarga, la altura de la cama y la altura de la interfase de agua clara. Por otro lado, los muestreos se realizan en un intervalo de tiempo definido y corresponden a pulpa de descarga para la medición de reología y agua clara del overflow para la medición de turbidez.

En **Figura 27** se puede ver una foto que muestra la disposición de la columna de espesamiento con su tablero eléctrico a la izquierda, el agitador de la pulpa de alimentación en la zona media y la columna de espesamiento a la derecha. En **Figura 28** se puede observar que la muestra de overflow se saca de la zona superior de la columna, el nivel de cama se controla mediante observación visual y el punto de muestreo del underflow es en la zona inferior de la columna.



Figura 27. Disposición de equipos de columna semi-piloto de espesamiento

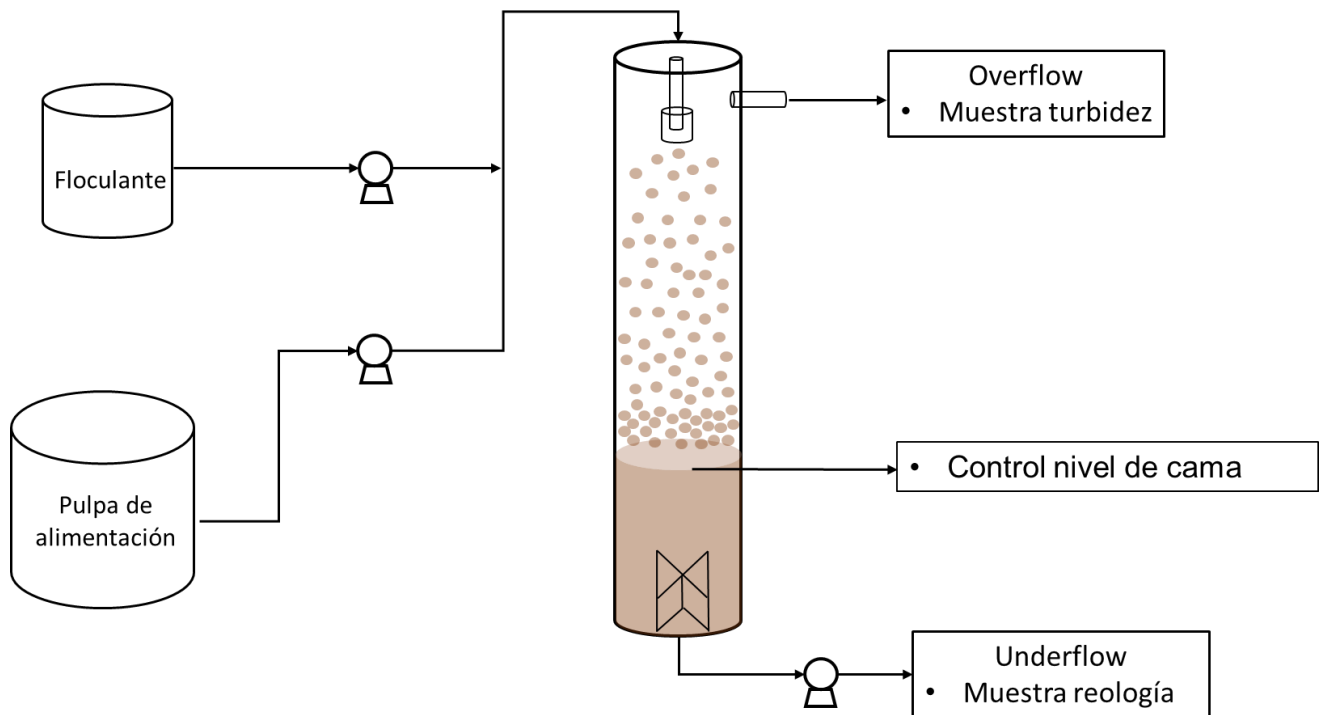


Figura 28. Esquema de ensayo en columna de espesamiento.

3.3 Ensayo de sedimentación

Los ensayos de sedimentación en probeta son realizados a tres concentraciones de sólidos diferentes, 7 [%], 15 [%] y 21[%]. Esto tiene por objetivo la caracterización sedimentológica de las muestras y analizar en cuanto varía la velocidad de sedimentación con pulpas muestreadas en diferentes días del proceso productivo. El ensayo se realiza en probetas de 1000 [ml] (Ver **Figura 61** en **ANEXO 1**) y está normado bajo el procedimiento interno del CI-JRI llamado “**CDI-LAB-PR-001 Ensayo de sedimentación**”¹.

3.4 Ensayo de reología VANE

Los ensayos de reología son realizados a cinco concentraciones de sólido distintas, 54 [%], 57 [%], 60 [%], 62[%] y 65 [%]. Este ensayo tiene por objetivo la caracterización reológica de las pulpas muestreadas y determinar la tensión de fluencia mediante el uso del método VANE. El sensor utilizado es de tipo paleta y se llama FL100, mientras que las mediciones son realizadas por el reómetro VT550 (ver **Figura 56**, **ANEXO 1**) bajo las condiciones estipuladas en el procedimiento interno llamado “**CDI-LAB-PR-004 Ensayo de reología en reómetro VT550**”.

3.5 Ensayo granulométrico

En el ensayo granulométrico se tienen muestras de pulpa que son secadas y tamizadas en malla 500 Tyler, el material sobre esta malla es tamizado y el material bajo la malla es analizado mediante granulometría laser en equipo Microtrac S3200. Finalizados ambos ensayos se construye el perfil completo de distribución granulométrica.

Lo que corresponde al ensayo en Rotap, se realiza en las dependencias del laboratorio de la faena minera con los procedimientos correspondientes a su metodología, por otro lado, el ensayo de granulometría laser se realiza en las dependencias del laboratorio del CI-JRI y está normado bajo el procedimiento llamado “**CDI-LAB-PR-008 Análisis granulométrico láser de pulpas mineras**”.¹

3.6 Análisis mineralógico

Los análisis mineralógicos realizados corresponden a NIR, QEMSCAN y DRX. El análisis NIR se realiza en las dependencias de la faena minera y la data es entregada mediante documentación computacional. Mientras que, el análisis QEMSCAN y DRX es realizado por una empresa externa y solo se les realiza a 3 muestras del total estudiadas, las que corresponden a las más extremas en términos de características sedimentológicas y reológicas.

¹ Ensayo acreditado en NCh ISO17025, en CI-JRI.

Capítulo 4. Resultados y discusiones

4.1 Resultados de data operacional

La primera parte del proyecto contempla el análisis de data operacional entregada por el cliente. La información está filtrada con datos obtenidos cada 1 hora de proceso productivo y fue medida durante los 12 meses del 2017, además con el propósito de simplificar el análisis de resultados se denominará E1 al espesador 1 y E2 al espesador 2. Las variables consideradas en el análisis corresponden a concentración de sólidos de descarga (Cp de descarga), tonelaje de tratamiento, torque, dosificación de floculante, altura de agua clara, presión de cono y posición de las rastras. La evaluación de su comportamiento en el período de estudio fue realizado a través de análisis estadístico de promedios y desviación estándar mediante el uso de histogramas de frecuencia y cuartil 1 (Q1) y cuartil 3 (Q3) por medio de gráficos de cajas.

Los resultados se presentan a continuación.

4.1.1 Tonelaje de tratamiento

El tratamiento de los espesadores está por debajo de lo estipulado por diseño (5250 [tph]) y tiene un promedio de 4835 [tph], sólo en 7 meses del año el 75 [%] de los datos está por sobre el tonelaje de diseño. Sin embargo, se observa en **Figura 29** que cuando el tonelaje está en estas condiciones el Cp de descarga de los espesadores E1 y E2 disminuye. Por ejemplo, el mes de mayo es uno de los peores meses en términos de descarga de sólidos, donde el 75 [%] de los casos solo alcanza un 56 [%] y un 57 [%] para E1 y E2, respectivamente y fue el mes con mayor tonelaje procesado.

Se infiere de este análisis y del comportamiento en los boxplot de tratamiento y Cp de descarga que cuando el tonelaje aumenta el Cp de descarga disminuye, debido a una disminución del tiempo de residencia dentro del espesador. Esto permite concluir que el espesador no alcanza a cumplir con el Cp de descarga del 62 [%] bajo condiciones de alimentación cercanas al diseño. Si se hace un zoom en el mes de agosto el Cp de descarga aumenta y la alimentación comienza a aumentar, sin embargo, llega a un punto en que la alimentación presenta una disminución y el Cp de descarga desciende. Esto se explica por el levantamiento de rastras que ocurre constantemente en los espesadores, en este caso E2.

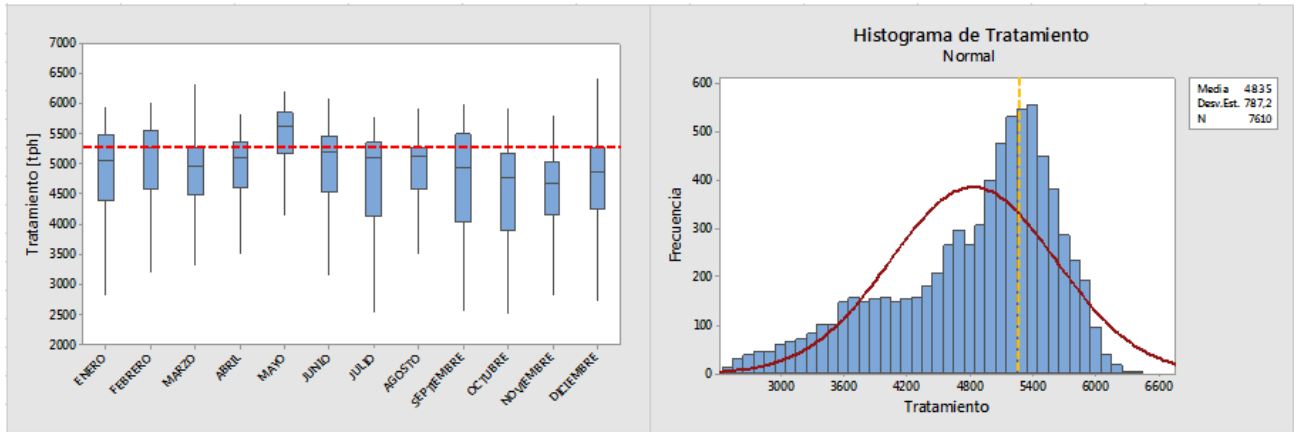


Figura 29. Boxplot e histograma de tratamiento espesadores E1 y E2 en el año 2017.

4.1.2 Torque

El torque de los espesadores está siempre cercano al máximo de 50 [%] según criterio de diseño [14]. Durante el año 2017 el promedio de torque en E1 es de 41,61 [%] con una desviación estándar de 4,504 [%], mientras que para E2 el torque promedio es de 42,40 [%] con una desviación estándar de 4,139 [%] (ver **Figura 30**). Esto indica que el 99% de los datos está entre 37,1 [%] - 46,1 [%] para E1 y entre 38,2 [%] - 46,5 [%] para E2 (Ver **Figura 31**). En la actualidad el levantamiento de rastra comienza a ocurrir en torques que están por sobre el 40[%], lo que provoca que la pulpa no sea compactada correctamente y disminuya la concentración de sólidos de descarga. Lo dicho anteriormente se observa de “**forma esquemática**” en **Figura 32**, donde en la realidad constantemente la rastra es levantada en un 6 [%] de altura total de levantamiento para torques que están bajo el 44 [%], mientras que si sobrepasa este valor la rastra es levantada hasta en más del 50 [%] de su altura total de levantamiento, lo que tiene un impacto directo en la disminución del Cp de descarga.

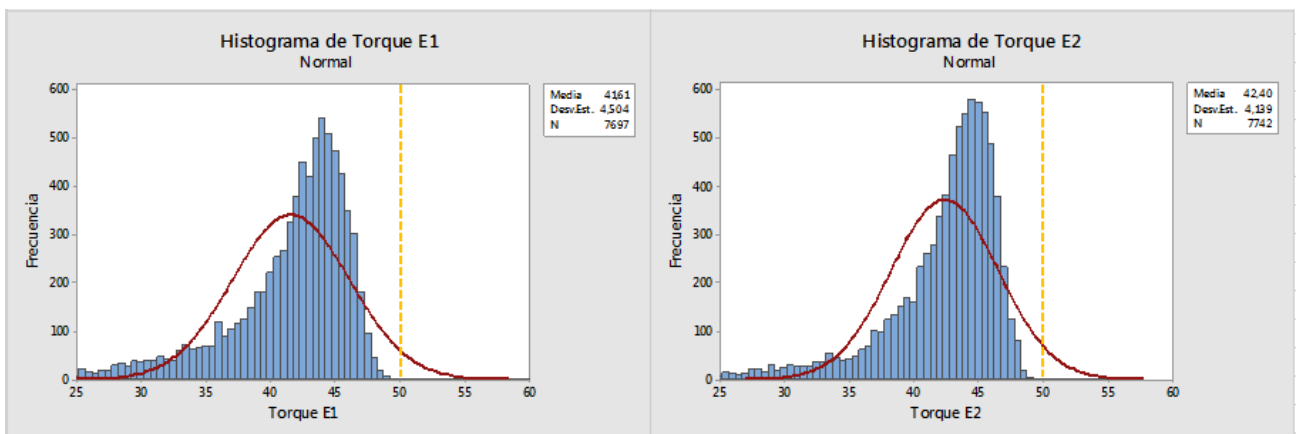


Figura 30. Histogramas de frecuencia de torque en E1 y E2 en el año 2017.

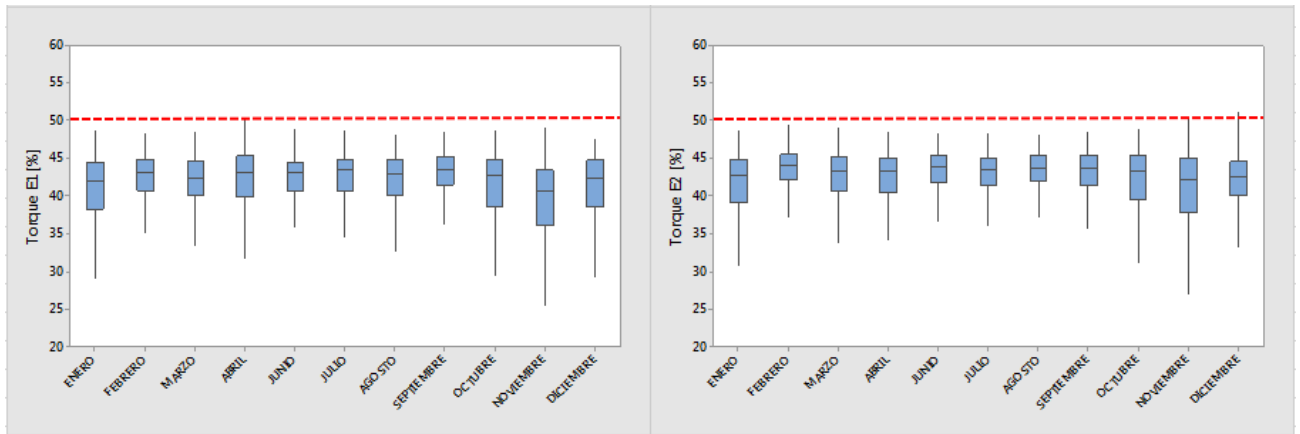


Figura 31. Boxplot de torque en E1 y E2 en el año 2017.

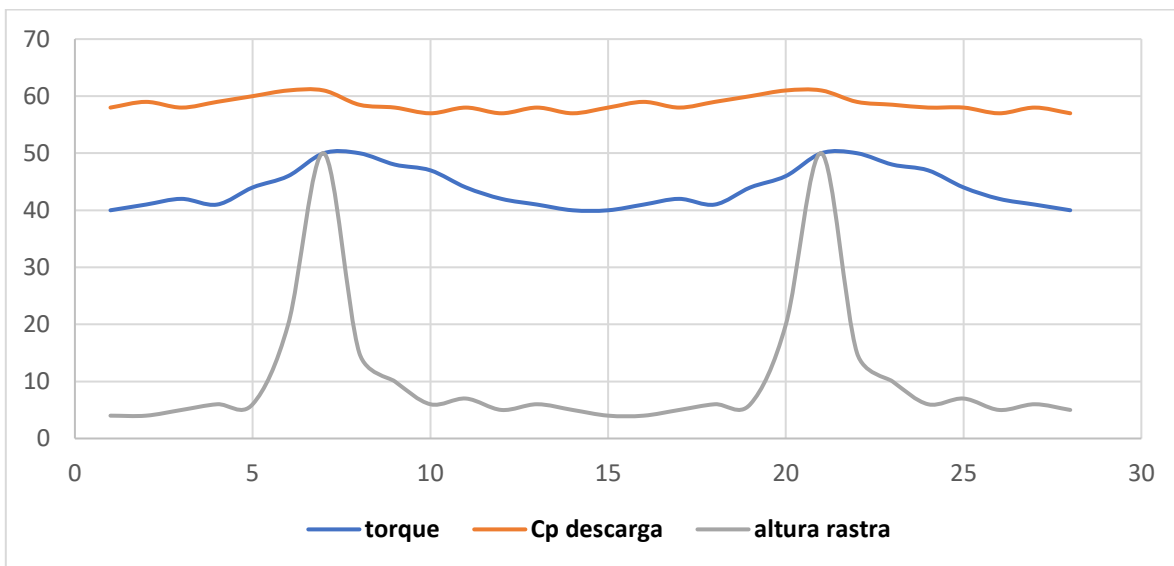


Figura 32. Esquema del comportamiento del torque, Cp de descarga y levantamiento de rastra.

4.1.3 Concentración de sólidos de descarga (Cp de descarga)

El Cp de descarga de diseño del 62 [%] [14] no es alcanzado como valor promedio en ningún mes, siendo alcanzado solamente de manera puntual. Esta variable en el mes de octubre fue donde más se acercó al valor de diseño, sin embargo, el tonelaje está por debajo de las 5250 [tph] la mayor parte del tiempo y los niveles de torque están siempre cercanos al 50% (torque máximo). Además, el promedio anual de Cp de descarga es de 57,7 [%] para E1 y 56,9 [%] para E2, con una desviación estándar de 3 [%], lo que son valores muy por debajo del 62 [%] e indica el incumplimiento de esta variable con el criterio de diseño (Ver **Figura 33** y **Figura 34**).

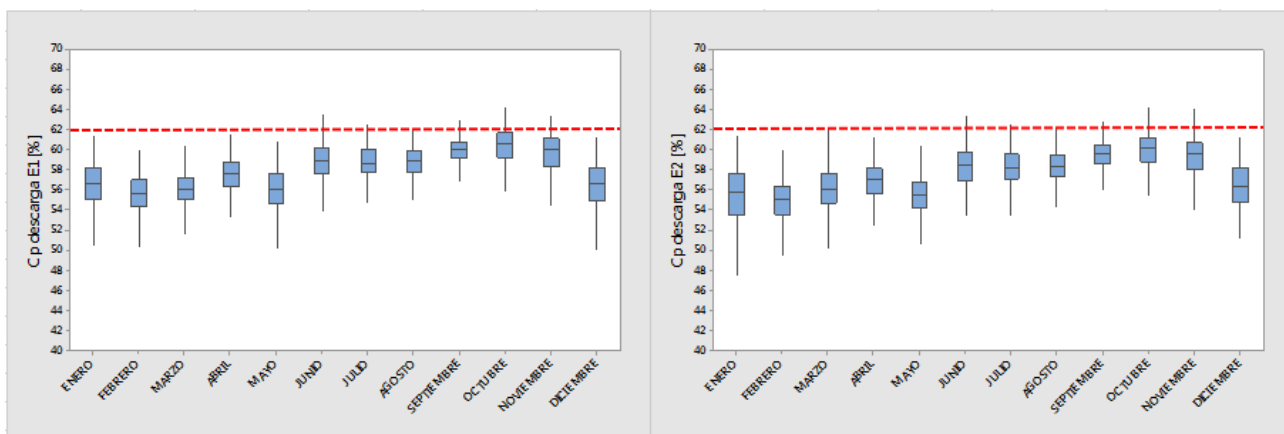


Figura 33. Boxplot de Cp de descarga en E1 y E2 en el año 2017.

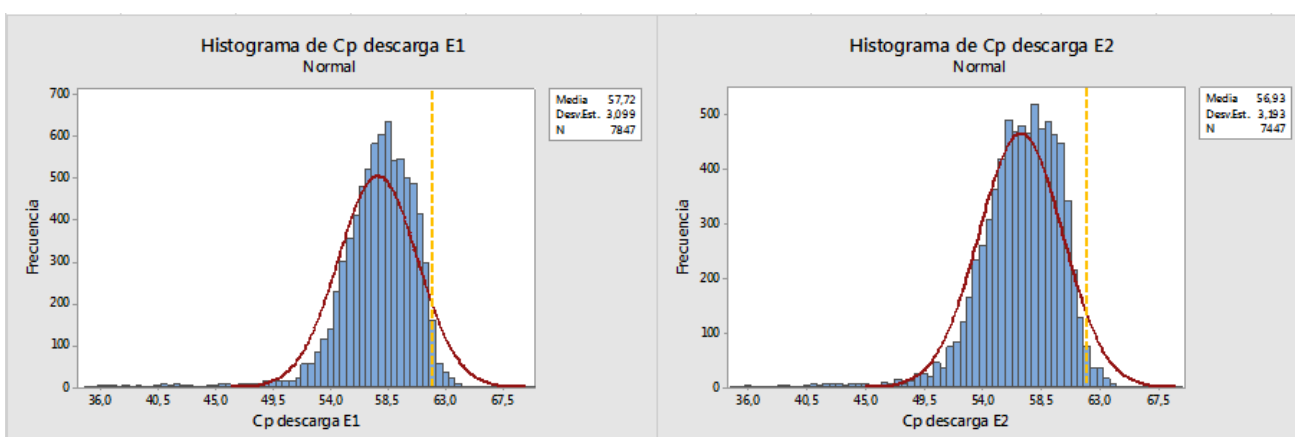


Figura 34. Histogramas de frecuencia de Cp de descarga en E1 y E2 en el año 2017.

4.1.4 Dosificación de floculante

Con respecto a la dosificación de floculante, en los meses de enero y febrero se trabaja con una dosis promedio de 15 [gpt] [14] (valor de diseño), sin embargo, bajo estos regímenes el Cp de descarga está por debajo de meses posteriores. Luego, la dosificación de floculante va disminuyendo gradualmente desde el mes de marzo hasta llegar a un valor promedio de 10 [gpt]. Con este cambio los valores promedio del Cp de descarga comienzan a aumentar y el cuartil 3 se sitúa cercano al 60 [%] entre los meses de agosto-noviembre. Los datos de planta y los resultados de los ensayos en columna como se mostrarán en la sección 4.2 indican que la dosis de 15 [gpt] no es adecuada debido a que existe un grado de sobre floculación, formación de grandes intersticios de agua en la cama de sólidos y formación de canalizaciones (ver todas las figuras de **ANEXO 3**), mientras que en los datos de planta se ve que bajo esta dosis el Cp de descarga alcanzado no es mayor que 58 [%] en el 75 [%] del tiempo (Ver **Figura 35**). Por el contrario, las columnas hechas a 10 [gpt] muestran una cama más compacta y flóculos de menor tamaño. El promedio anual de dosis de floculante es de 11,03 [gpt] para E1 y 10,87 [gpt] para E2 y su desviación estándar de 3,49 [gpt] y 3,51 [gpt] (Ver **Figura 36**), respectivamente, lo que indica que la dosificación fue cambiada de forma permanente desde el mes de marzo en adelante. En **Figura 37** se

ve que a una dosis de 10 [gpt] se obtienen mayores Cp de descarga que con una dosis de 15 [gpt] o más, sin embargo, se llega solo de manera puntual al 62 [%] estipulado por diseño, lo que indica que el cambio de dosis si bien optimiza el Cp de descarga obtenido, aun así no se cumple con el criterio de diseño.

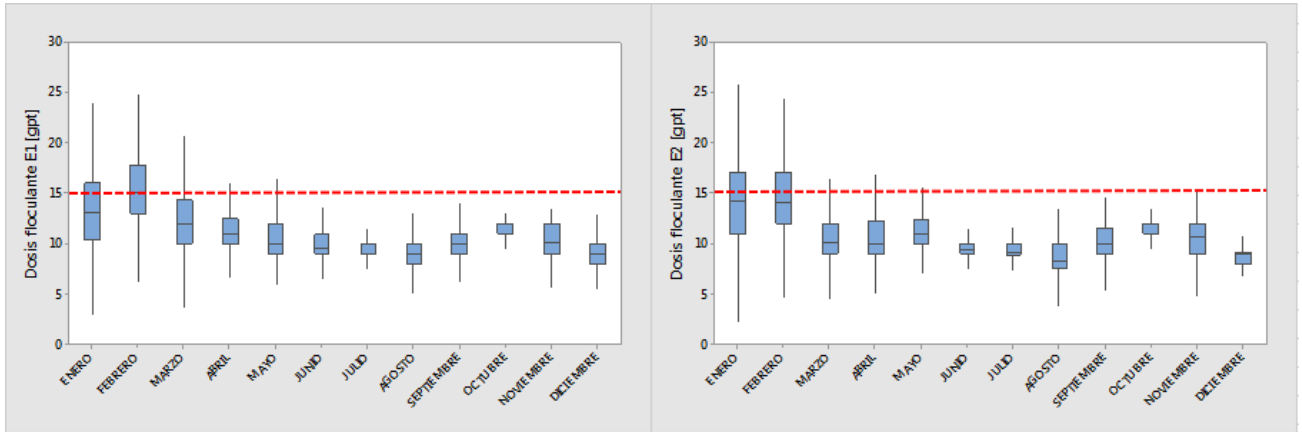


Figura 35. Boxplot dosificación de floculante para E1 y E2 en el año 2017.

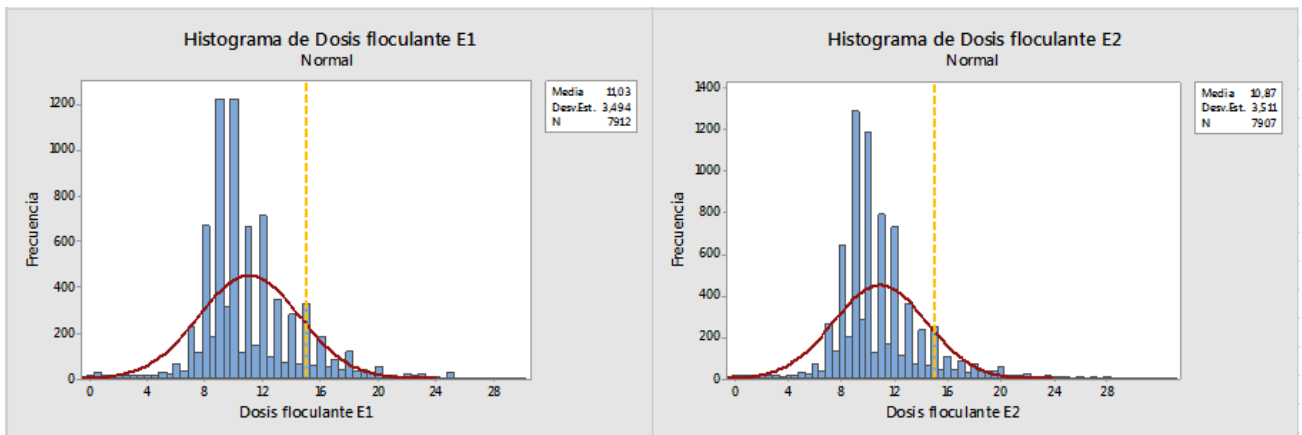


Figura 36. Histograma de frecuencia dosificación de floculante para E1 y E2 en el año 2017.

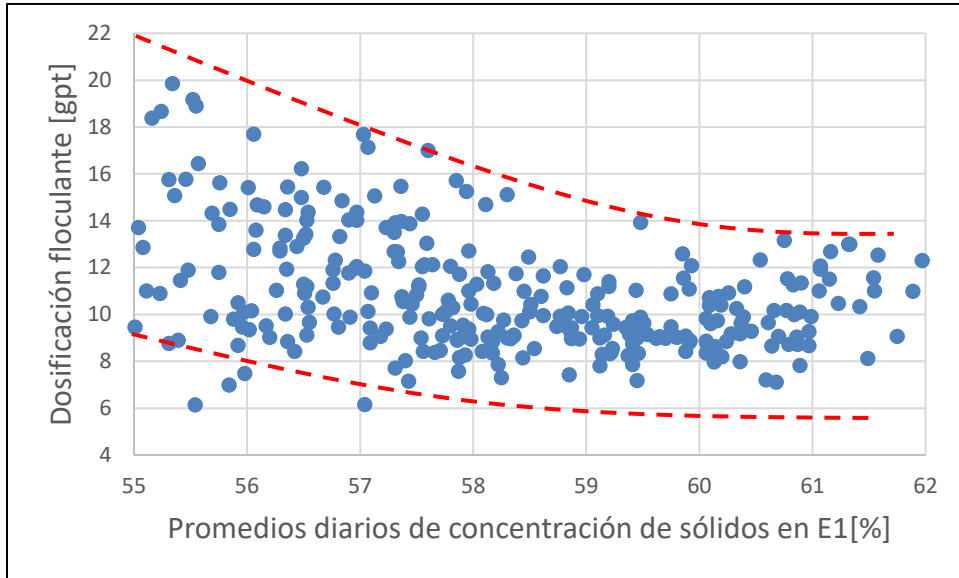


Figura 37. Dosis flocculante vs concentración de sólidos de descarga (promedios diarios), junto a línea de tendencia.

4.1.5 Altura de agua clara

La altura de agua clara recomendada para el espesador es entre 3-4 [m] [15] y los promedios anuales de agua clara son 3,02 [m] para E1 y 3,12 [m] para E2, sin embargo, desde enero a mayo hay una alta frecuencia de datos que no sobrepasan los 2 [m] de altura de agua clara (Ver **Figura 38** y **Figura 39**). Al no tener un nivel de agua clara adecuada la dilución no es óptima, lo que afecta el rendimiento del espesador en términos de concentración de sólidos de descarga, ya que se afecta la velocidad de sedimentación. En los meses de enero a mayo hay una menor concentración de sólidos de descarga que entre los meses de junio a noviembre y el agua clara presenta la misma tendencia, así mismo cuando disminuye el Cp de descarga en ambos espesadores en el mes de diciembre la altura de agua clara sigue la misma tendencia, i.e. para el mes de noviembre hay una tendencia al alza del Cp de descarga cuando el agua clara aumenta y viceversa.

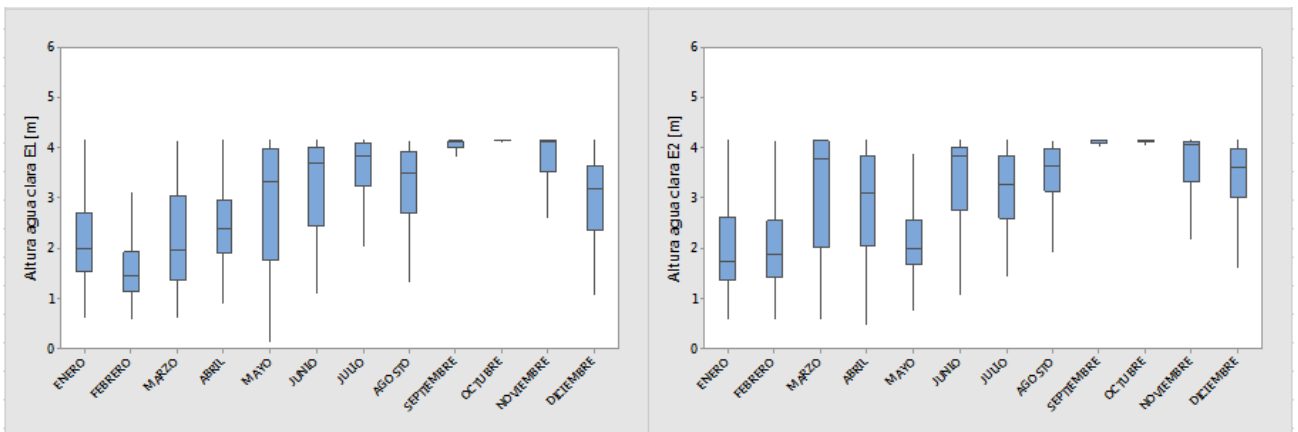


Figura 38. Boxplot de altura de agua clara para E1 y E2 en el año 2017.

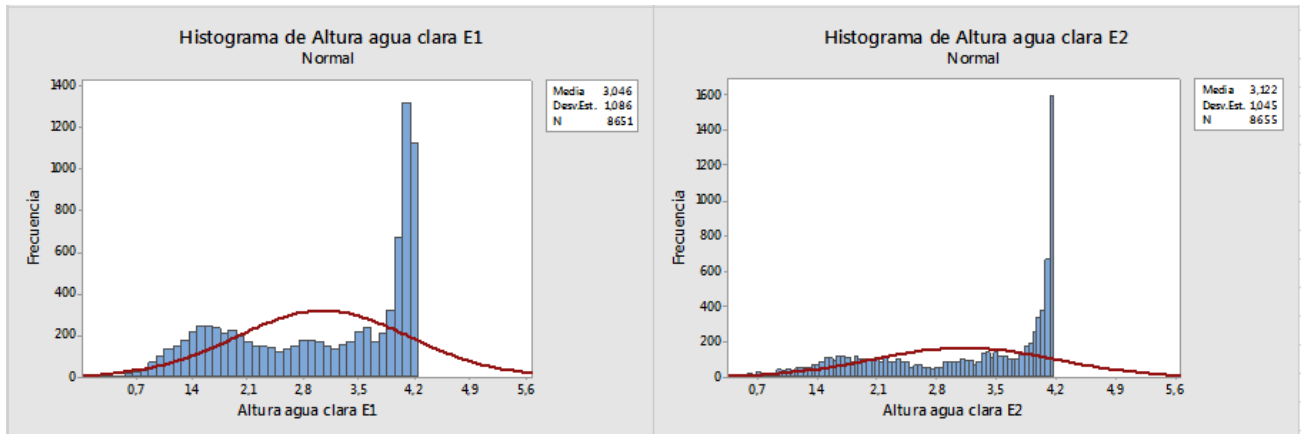


Figura 39. Histograma de frecuencia de altura de agua clara para E1 y E2 en el año 2017.

4.1.6 Presión de cono

Como se puede ver en el histograma de la presión de cono de E1 (Ver **Figura 40**) la frecuencia más alta de presión de cono se alcanza en los 130 [kPa], mientras que en E2 tienen dos peaks altos de 107 y 120 [kPa], la presencia de dos peaks de frecuencias diferentes indica que en E2 hay una mayor variabilidad de presión de cama. Esta variación en presión de cono puede estar asociada al levantamiento de rastras, ya que E2 tiene una mayor frecuencia de levantamientos que E1, lo que podría explicar el menor valor promedio de Cp de descarga de E2.

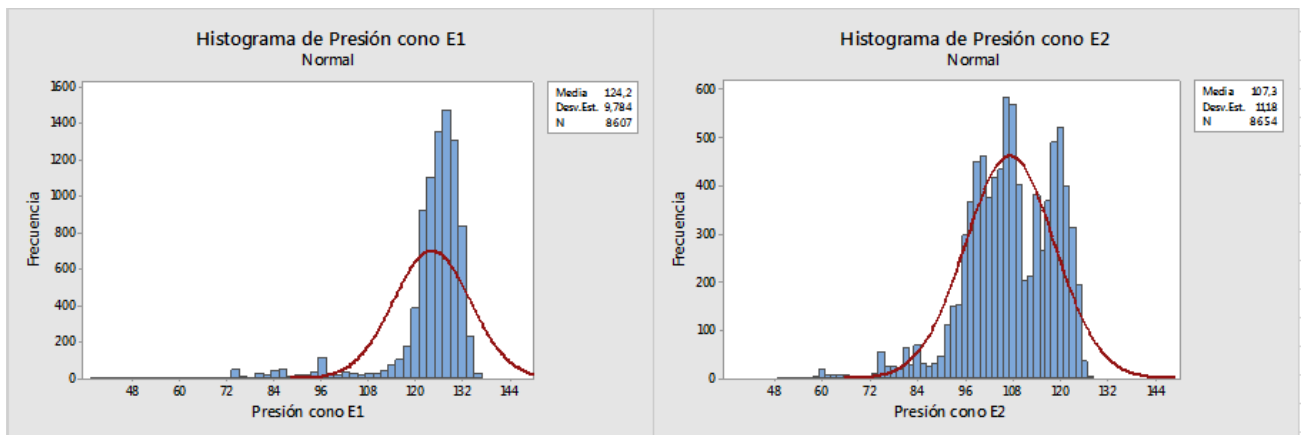


Figura 40. Histograma de frecuencias de presión de cono en E1 y E2 en el año 2017.

4.1.7 Posición de rastra

El histograma de la posición de las rastras muestra que **E2 tiene una mayor frecuencia de levantamientos que E1** (Ver **Figura 41**). Este levantamiento provoca que la pulpa en la zona inferior del espesador no sea compactada de forma eficiente y disminuye la concentración de sólidos de descarga. Como el levantamiento es más recurrente en E2 que en E1, se puede decir que este factor también explica la diferencia que existe entre E1 y E2 con respecto a su desempeño en la concentración de sólidos de descarga. Además, este levantamiento concuerda con el cambio en la presión de cono mencionado anteriormente, ya que al levantar más veces la rastra se hace más inestable la cama de sólidos producto del movimiento.

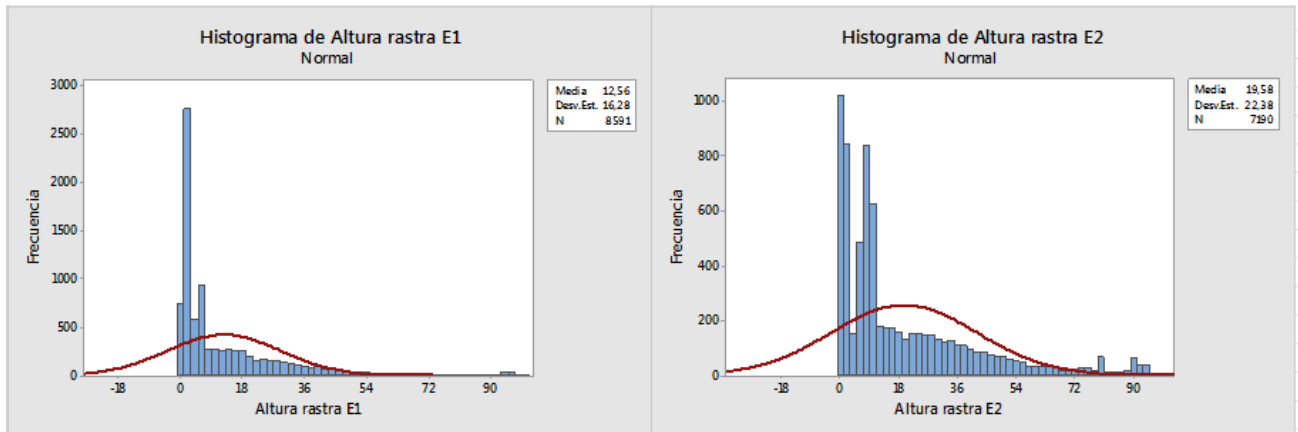


Figura 41. Histograma de frecuencia de altura rastras para E1 y E2 en el año 2017.

4.2 Resultados experimentales

En la parte experimental se presentan los resultados obtenidos por los ensayos de sedimentación en probeta, ensayos de reología VANE, ensayos en columna semi-piloto de espesamiento, determinación de distribución granulométrica y mineralogía NIR y QEMSCAN.

4.2.1 Reología a concentraciones de sólidos distintas

Las reologías VANE consideran un estudio a distintos C_p , los cuales son 54 [%], 57[%], 60[%], 62[%] y 65[%] a una dosis de 15 [gpt]. El gráfico de la **Figura 42** muestra que hay una gran variabilidad en la tensión de fluencia medida a lo largo de los dos meses en que se realizan las mediciones en terreno. Las muestras más extremas con respecto a la tensión de fluencia tienen valores de 81 [Pa] y 57 [Pa], respectivamente para un C_p de 62 [%] (valor de diseño), mientras que el resto tiene una tensión de fluencia por debajo de los 40 [Pa] para la misma condición de C_p , las muestras que tienen una menor tensión de fluencia tienen un valor de 17 [Pa] y 22 [Pa], respectivamente.

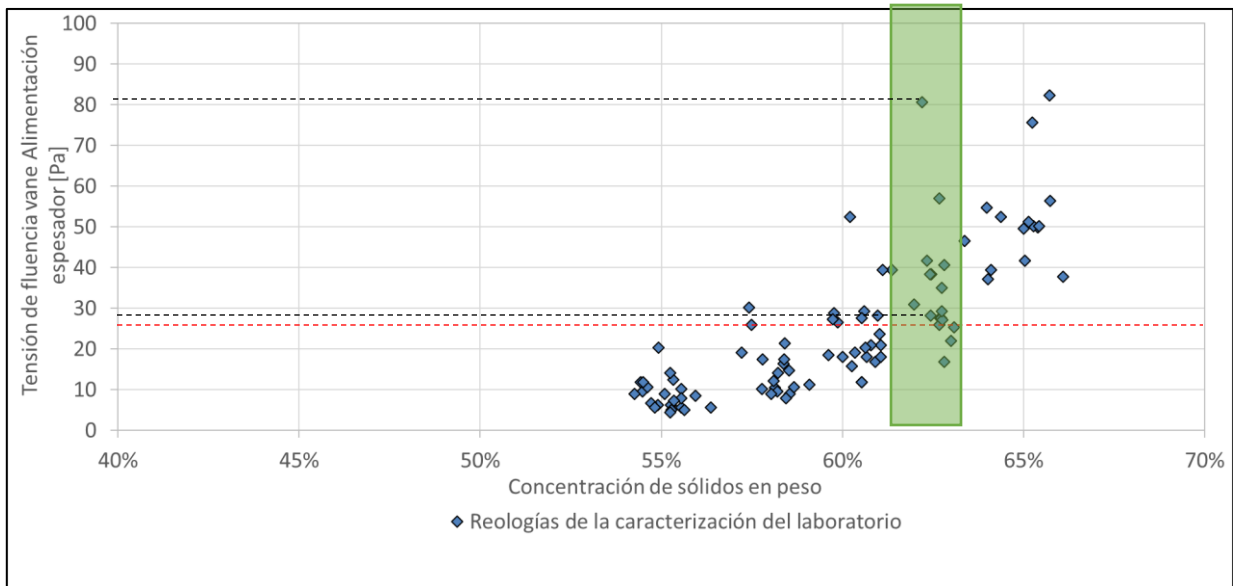


Figura 42. Tensión de fluencia VANE vs Cp vaso reología para todas las muestras de alimentación a espesador estudiadas en la caracterización de laboratorio.

Tabla 3. Resumen tensión de fluencia VANE de muestras extremas (buenas y malas).

ID	Floculante	Cp real	Tensión de fluencia vane
[]	[]	[%]	[Pa]
MA10	SNF704 15[g/t]	62,2%	80,7
MA16	SNF704 15[g/t]	62,7%	57
MA13	SNF704 15[g/t]	62,8%	16,9
MA6	SNF704 15[g/t]	62,7%	22

Se observa que la zona asintótica de la tensión de fluencia para las muestras extremas comienza a Cp más bajos que el valor de diseño, así que, si en el espesador se llega a esta condición con pulpas extremas, pequeñas variaciones de concentración de sólidos aumentarían significativamente el torque percibido por las rastras. Bajo los criterios de diseño la tensión de fluencia VANE medida en laboratorio está dentro del rango permitido por el sistema mecánico que es entre 70-110 [Pa] [14], no obstante, en la realidad ocurre que se levanta la rastra constantemente con pulpas que no necesariamente se encuentran en la zona extrema, incluso para valores de 25 [Pa].

4.2.2 Comparación de dosis en la tensión de fluencia

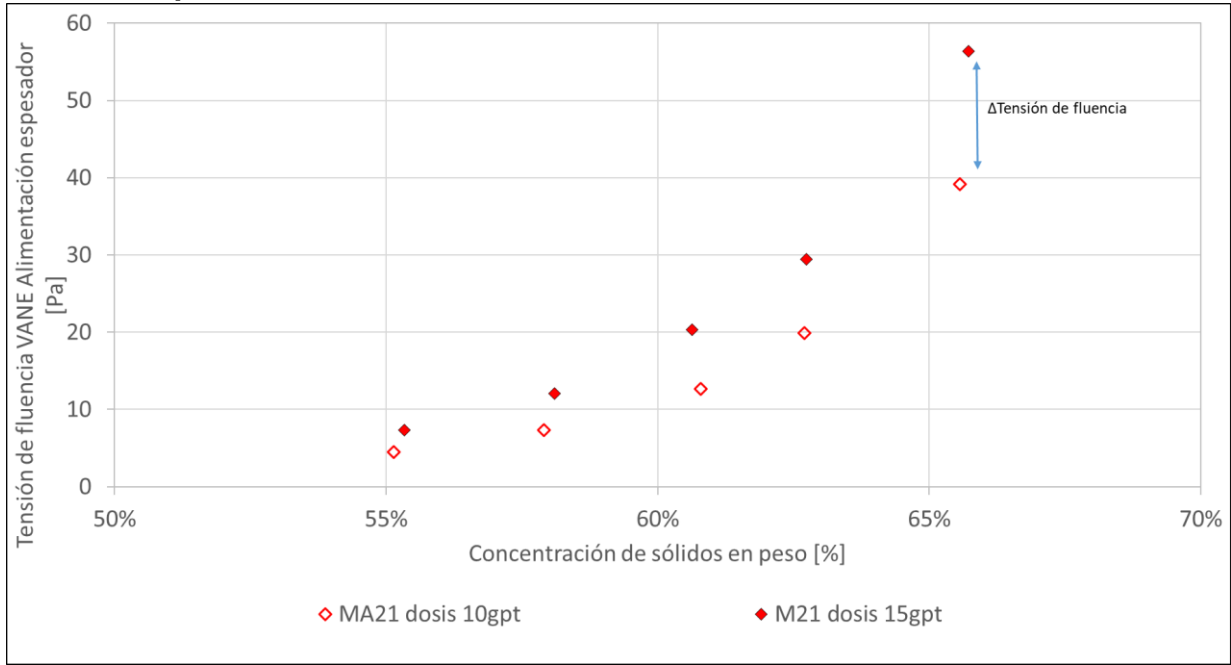


Figura 43. Tensión de fluencia VANE de alimentación espesador vs Cp; comparación dosis 10 [gpt] y 15 [gpt].

Tabla 4. Tensión de fluencia de muestras MA21 con dosis de 15 [gpt] y 10 [gpt].

ID Muestra	Cp real	Tensión de fluencia vane [Pa]
[]	[%]	[Pa]
MA21 dosis 15gpt	62,7%	29,4
MA21 dosis 10gpt	62,7%	19,9

En **Figura 43** las muestras MA20 y MA21 fueron medidas con una concentración de sólidos 54 [%], 57 [%], 60 [%], 62 [%] y 65 [%], si se compara la dosis de 10 [gpt] con la de 15 [gpt], la tensión de fluencia alcanzada por una dosis mayor es más alta como se puede observar en **Tabla 4**. Esto se puede explicar porque el aumento de dosis provoca que las partículas finas se encierran con floculante y no generen el enlace que debieran con otras partículas gruesas, lo que evita que se aumente el diámetro de partícula de la suspensión. De aquí se puede inferir que el aumento de dosis de floculante hace que la curva tensión de fluencia vs concentración de sólidos empiece su comportamiento asintótico a menores Cp y que aumenten los valores de tensión de fluencia para una misma concentración de sólidos.

El torque en el espesador siempre está en un valor muy cercano al máximo (50 [%]) y trabajar con tensiones de fluencia menores puede evitar que el sistema de levante de rastras se active con tanta frecuencia como lo es actualmente. En el caso de la muestra M21 tiene una tensión de fluencia de 29,4 [Pa] y 19,9 [Pa] para un Cp cercano al diseño (62 [%]), lo que se traduce en una disminución 32,3 [%], respectivamente.

4.2.3 Ensayo de sedimentación

La velocidad de sedimentación en probeta de 1[l] se hizo a concentraciones de sólidos de 7 [%],15 [%] y 21 [%]. En **Figura 44** el cuadro azul encierra los resultados de velocidad de sedimentación correspondiente a un 15 [%] de sólidos (Cp de dilución de diseño), donde hay una alta variabilidad de velocidades de sedimentación para los distintos días estudiados. Esta variación se debe principalmente a cambios en la mineralogía de entrada al proceso productivo, ya que los sectores de explotación no siempre son los mismos y varían según los planes de extracción.

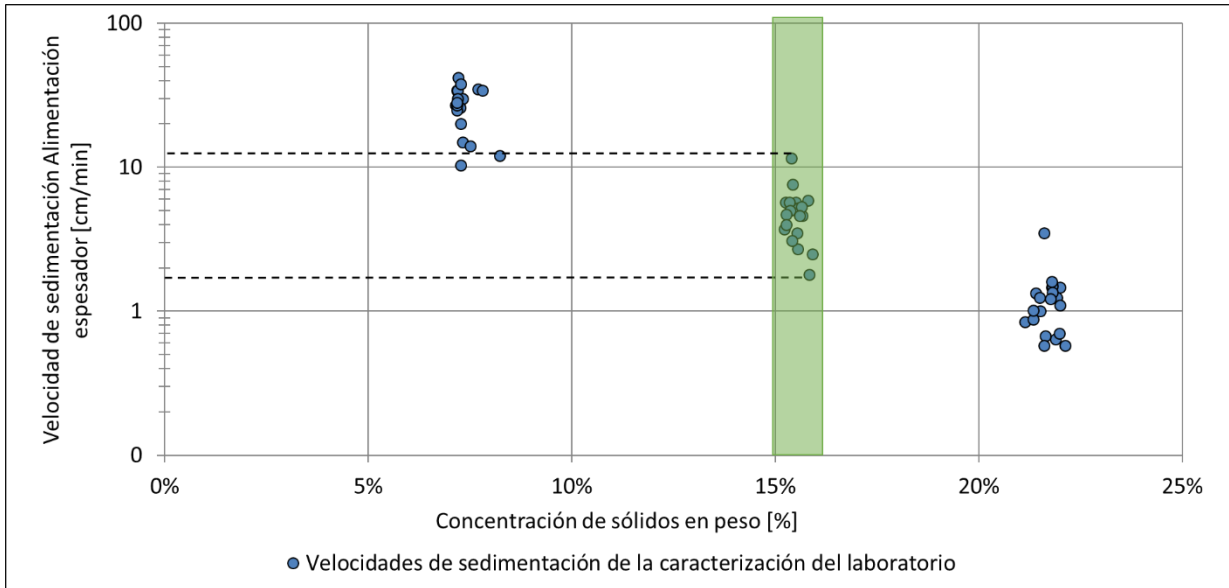


Figura 44. Velocidad de sedimentación vs concentración de sólidos para todas las muestras.

Tabla 5. Resumen de velocidad de sedimentación de muestras extremas (buenas y malas).

	ID CI-JRI []	Cp real [%]	Velocidad de sedimentación [cm/min]
Muestras malas	MA10	15,84%	1,80
	MA10	22,13%	0,58
	MA9	15,54%	3,50
	MA9	21,63%	0,70
	MA21	15,41%	3,10
	MA21	21,61%	0,58
Muestras buenas	MA14	15,39%	11,60
	MA14	21,60%	3,50
	MA17	15,42%	7,60
	MA17	21,79%	1,60

Tabla 6. Promedio de velocidad de sedimentación para Cp 15% y Cp 21%.

Promedio a Cp: 15% [cm/min]	Promedio a Cp: 21% [cm/min]
4,89	1,14

La mejor muestra tuvo una velocidad de 11,6 [cm/min], por otro lado, en la peor muestra la velocidad de sedimentación es de 1,8 [cm/min], casi 6 veces menor, esto probablemente está asociado a mineralogías distintas.

Los resultados obtenidos demuestran la importancia de contar con un Cp adecuado en la zona de alimentación (dilución), los resultados indican que para un Cp de 21 [%] la velocidad de sedimentación de la mejor muestra es de 3,5 [cm/min] y 0,6 [cm/min] para la peor, lo que se traduce en una disminución del 70 [%] y 66 [%], respectivamente con respecto a un Cp del 15 [%].

4.2.4 Cp de descarga en el tiempo

El Cp de descarga obtenido luego de 1 [h] de terminada la prueba en columna por las muestras MA10, MA13, MA14, MA16, MA17 y MA21 alcanza el Cp de diseño del 62 [%] e incluso lo sobrepasan, mientras que, las muestras del MA6 y MA9 no llegan a esta condición. La variabilidad en el Cp de descarga obtenido se explica por cambios en velocidad de sedimentación y tensión de fluencia VANE que experimentan las muestras día a día debido al cambio en la mineralogía de las pulpas de relave alimentadas al espesador y columna semi-piloto.

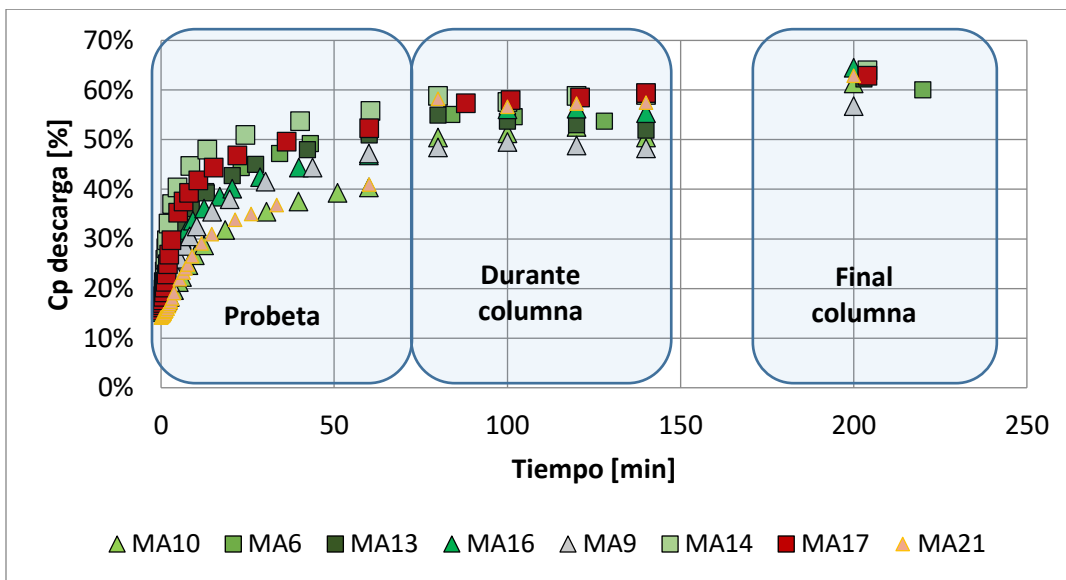


Figura 45. Cp de descarga en el tiempo de las muestras extremas en sedimentación y tensión de fluencia VANE.

El Cp de diseño se alcanza solo cuando la pulpa es dejada un tiempo de residencia de una hora y se logra compactar. Mientras se realiza la prueba en columna y está el flujo de descarga abierto solo se alcanzan valores máximos de 60 [%] para el caso de la pulpa del MA14 y MA17 que justamente son las muestras con mejores velocidades de sedimentación.

4.2.5 Reología de descarga de ensayos en columna semi-piloto

La muestra más extrema tiene una tensión de fluencia de 75 [Pa] para un Cp de descarga de columna de 61,2 [%] que coincide con la muestra de la caracterización de laboratorio más compleja (80,7 [Pa]) (Ver **Tabla 3**) y alrededor de cuatro muestras superan los 40 [Pa] para Cp cercanos al diseño (zona verde), mientras que el resto de pulpas se encuentran en valores por debajo de los 40 [Pa] en zonas de Cp menores o iguales al diseño (62 [%]). Sobre esta condición de Cp de diseño la tensión de fluencia supera los 40 [Pa], exceptuando algunas muestras en particular que se puede observar en **Figura 47**.

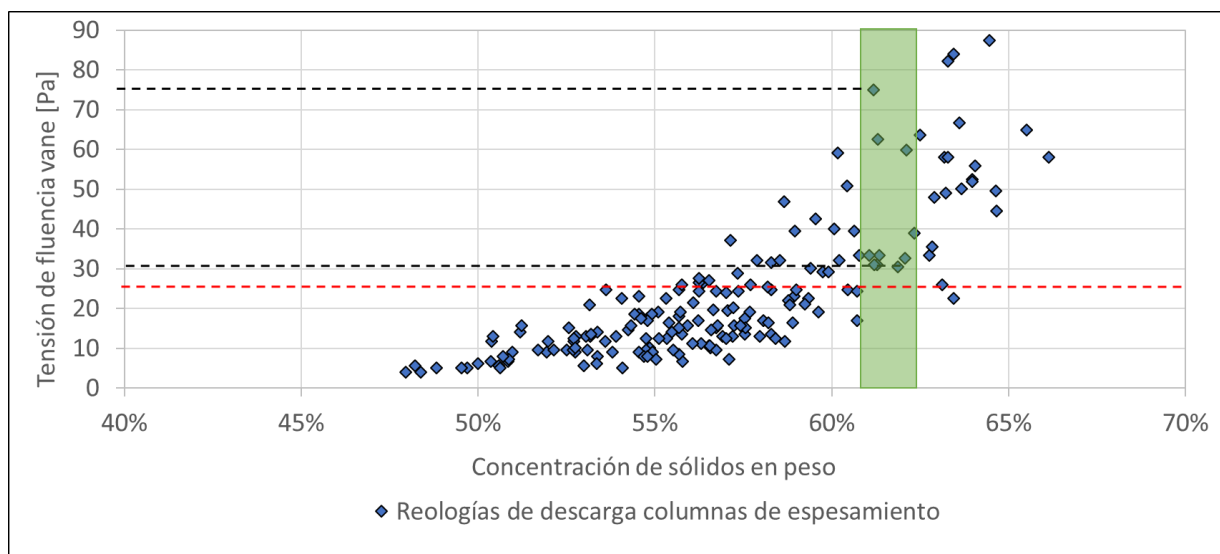


Figura 46. Tensión de fluencia VANE vs Cp de descarga de prueba en columna; Zona verde: Cp cercano al diseño de 62 [%].

4.2.6 Cp de descarga columna

Al comparar la descarga de la prueba hecha en columna semi-piloto de espesamiento con las muestras de descarga de E1, se observa que el valor del Cp obtenido en las pruebas de laboratorio es cercano al obtenido en E1, lo que indica que los ensayos se aproximan al comportamiento que se tiene con las pulpas en planta. La mayor diferencia existe en una muestra donde el Cp de columna es de 63 [%] y el Cp de descarga de E1 es de 53,15 [%], las demás muestras solo difieren en máximo 5 puntos porcentuales.

Una de las diferencias que existe es que la columna de espesamiento no tiene una limitación de torque y es por eso por lo que en gran cantidad de muestras se sobrepasa el Cp obtenido en planta, ya que la rastra provoca una compactación durante toda la prueba.

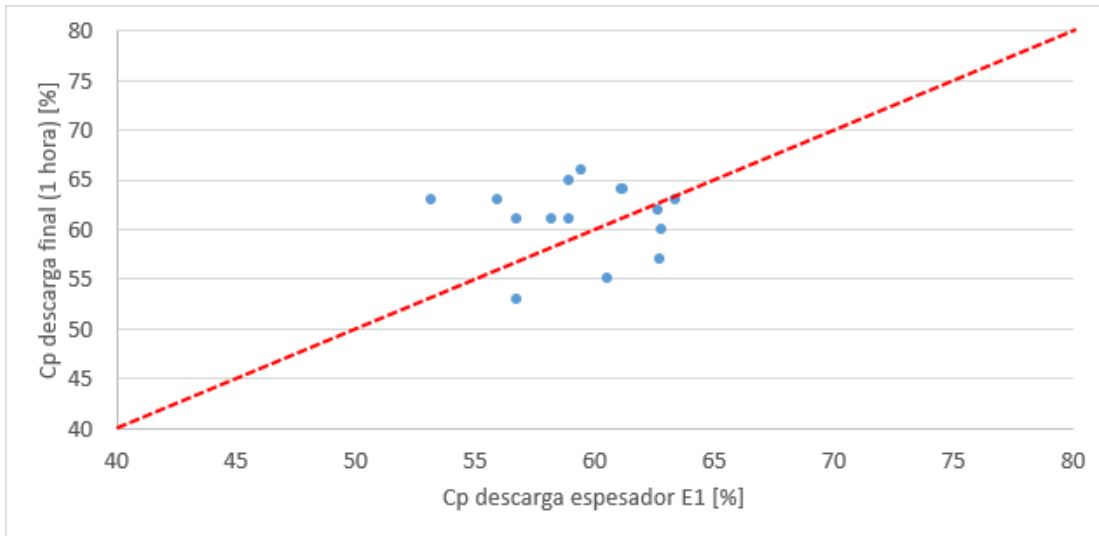


Figura 47. Cp de descarga final (1 hora) vs Cp descarga E1.

La **Figura 48** muestra la concentración de sólidos de descarga después de una hora de realizado el ensayo de espesamiento, aquí se puede ver que en gran cantidad de las muestras se alcanza el Cp de diseño del 62 [%] e incluso se sobrepasa este valor. Sin embargo, en planta se trabaja con una dosis promedio de 10 [gpt] al momento de realizar los estudios y las columnas son hechas con la condición estándar de 15 [gpt], por lo que se esperaba una mejora en los Cp obtenidos si es que se realizan pruebas a una dosis más baja.

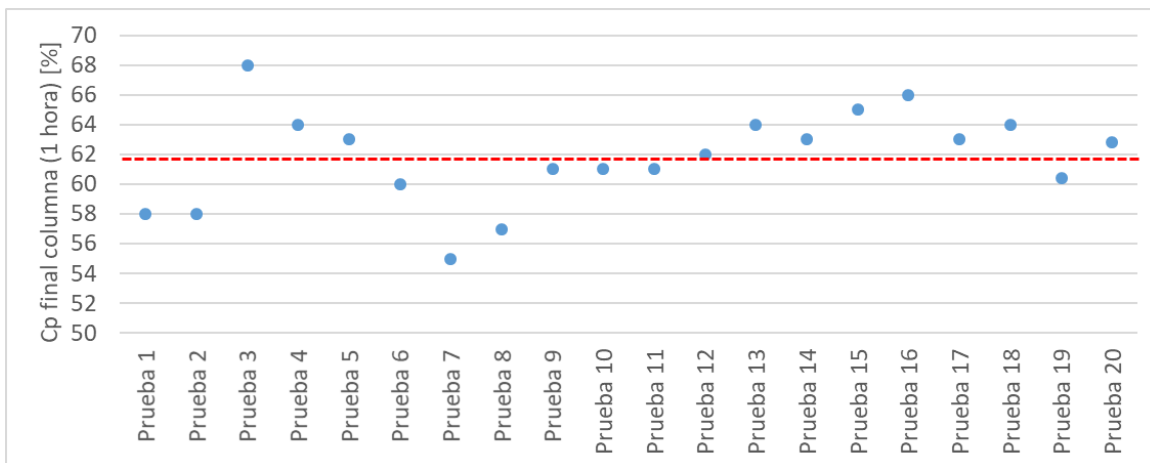


Figura 48. Cp de descarga final columna (1 hora) de cada muestra estudiada.

4.2.7 Resultados mineralogía NIR

Por medio de análisis mineralógico con tecnología NIR se observa una tendencia ascendente en el contenido de filosilicatos en la mineralogía de entrada a la planta. Un aumento implica mayores complicaciones en la sedimentación de relaves, ya que afecta la velocidad de sedimentación, Cp de descarga, tensión de fluencia, etc. Para el periodo de febrero-junio el contenido de filosilicatos en promedio es de 18 [%], mientras que para el

segundo semestre el promedio es de 26,5 [%]. Aun así, cabe destacar que no todos los filossilicatos tienen el mismo efecto perjudicial en las pulpas de relave.

Seguir actualizando la evolución mineralógica del yacimiento y determinar la cantidad de filossilicatos es relevante para anticipar, evitar y corregir problemas operacionales.

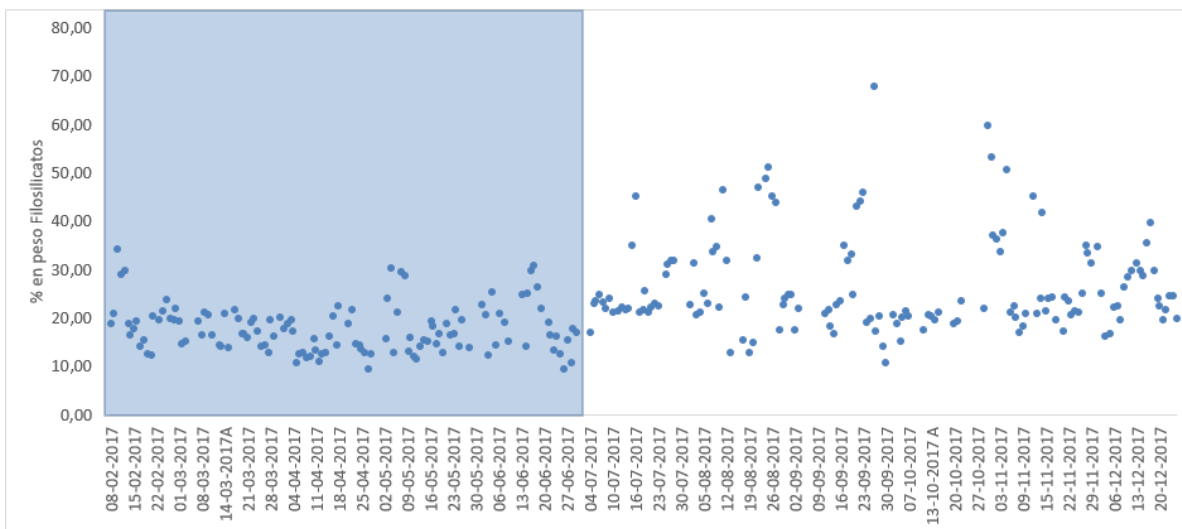


Figura 49. Evolución de la mineralogía en el periodo febrero-diciembre medida por tecnología NIR.

Tabla 7. Contenido de filossilicatos periodo febrero-junio y julio-diciembre.

Contenido filossilicatos			
Periodo	Promedio	Máx.	Min.
febrero - junio	18%	34,14%	9,22%
julio-diciembre	26,50%	67,82%	10,71%

Se infiere de la **Figura 50** que si el contenido de filossilicatos es menor al 30 [%] no hay una tendencia clara sobre el efecto del aumento en el contenido de arcillas en el Cp de descarga, sin embargo, cuando se sobrepasa el 30 [%] existe una tendencia clara que el Cp de descarga comienza a decrecer. Esto indica que por sobre este porcentaje las pulpas cambian su comportamiento y esto afecta en la descarga obtenida, sin embargo, se requiere de una mayor cantidad de pruebas para determinar si realmente este comportamiento es concluyente.

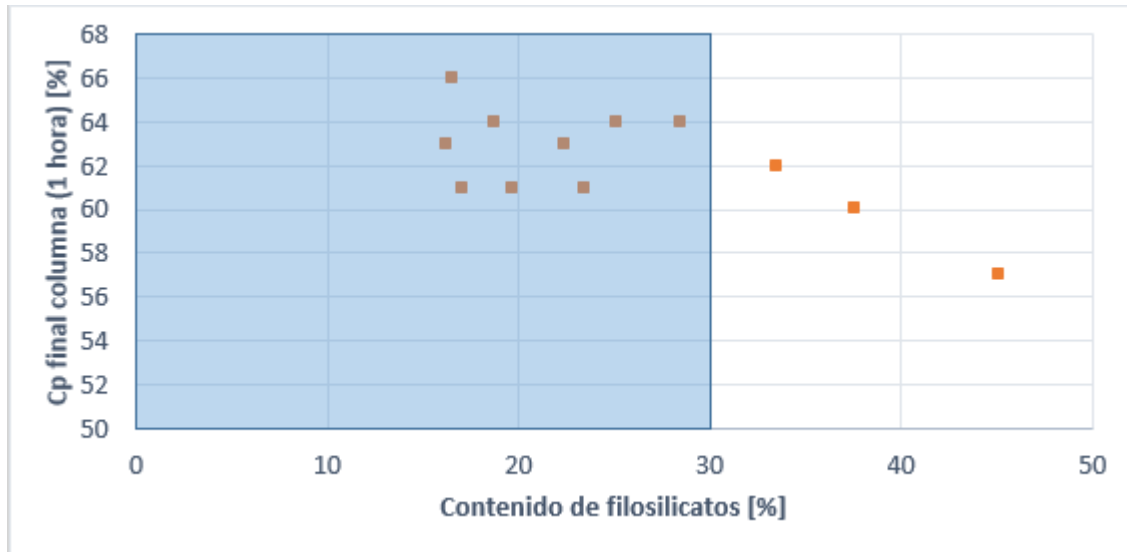


Figura 50. Cp final columna (1 hora) vs contenido de filosilicatos.

A mayor contenido de filosilicatos es más fina la muestra obtenida y esto se explica porque las arcillas poseen una granulometría muy fina bajo 2 μm y si hay un mayor contenido hay más cantidad de mineral fino dentro de la pulpa. Por lo tanto, la relación que existe entre el contenido de filosilicatos y el d_{10} es inversamente proporcional, ya que un menor d_{10} implica una muestra más fina.

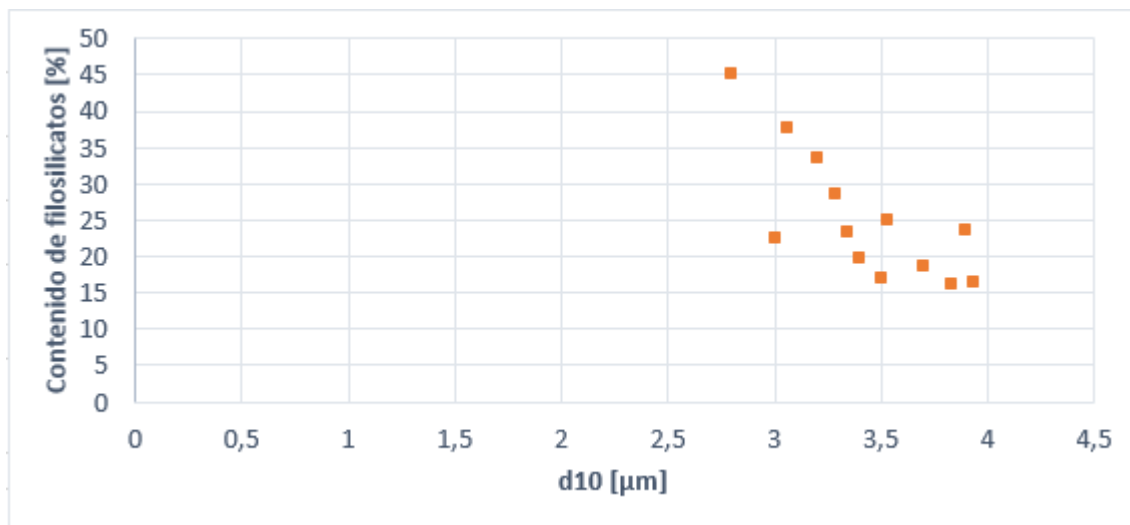


Figura 51. Contenido de filosilicatos vs tamaño de partículas d_{10} .

4.2.8 Resultados mineralogía QEMSCAN y DRX.

Las muestras que se estudian por QEMSCAN y DRX corresponden a solo 3 muestras. Los resultados obtenidos son sólo tendencias y hace falta una mayor cantidad de datos para dar una respuesta concluyente, los gráficos obtenidos se pueden ver en **ANEXO 4**.

Para el análisis de moscovita, caolinita / arcillas, filosilicatos sin biotita (moscovita, caolinita / arcillas y clorito) se observa que a mayor contenido de estos elementos hay una tendencia a que disminuya la velocidad de sedimentación, el Cp de descarga del ensayo en columna y el Cp de descarga de los espesadores E1 y E2. Para el caso de los óxidos de Fe (hematita y magnetita) se observa una tendencia a la inversa, mayor contenido de estos elementos aumenta la velocidad de sedimentación y mayor es el Cp de descarga obtenido. También a mayor contenido de filosilicatos sin considerar la biotita, se ve un aumento en la tensión de fluencia. Por el contrario, con la biotita se observa que la velocidad de sedimentación y Cp de descarga aumentan, mientras que la tensión de fluencia disminuye.

4.2.9 Reología y turbidez espesador

La reología fue medida mediante método VANE con el sensor FL100. Las muestras de descarga de los espesadores E1 y E2 corroboran que existe una muestra más compleja desde el punto de vista reológico que coincide con la muestra más compleja caracterizada en laboratorio, dando un valor de 20,3 [Pa] para un Cp de descarga de 58,9 [%] (E1). Este valor está por debajo del medido en la caracterización y el obtenido en la columna semi piloto de espesamiento y es porque esta muestra es tomada después de ser bombeada hacia el tranque de relave, lo que implica que hay un efecto de cizalle en la pulpa que disminuye el valor de tensión de fluencia medido, tal como el efecto indicado en la **sección 2.7.3**. En este análisis están consideradas la totalidad de muestras de pulpa de descarga, desde MD1 a MD21 y se considera el dato para ambos espesadores, tanto E1 y E2.

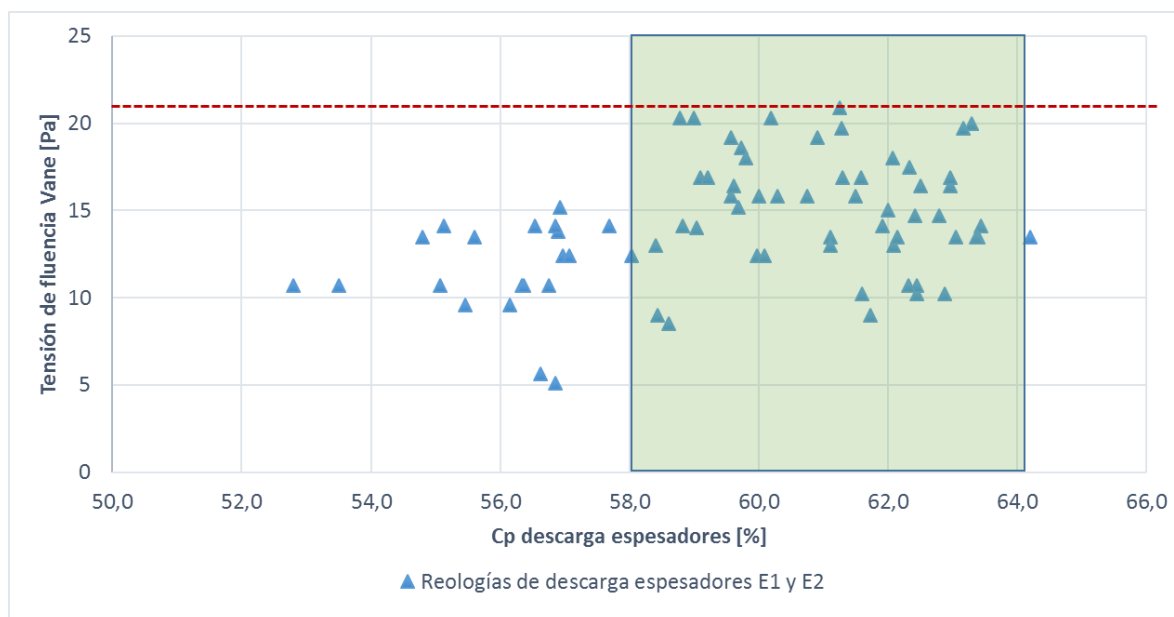


Figura 52. Tensión de fluencia VANE vs Cp descarga espesador de muestras de descarga.

En general, se ve que E2 tiene valores de turbidez mayores que E1 y solo en tres puntos de muestreo E1 tiene una mayor turbidez que E2, lo que indica que en E2 la sedimentación de relaves pareciera ser menos eficiente que en E1. Al tener una mayor turbidez hay más sólidos en suspensión en la zona de agua clara y provoca una mala dilución en la zona alta del espesador. Recientemente se instaló un sistema de dilución forzada en desmedro de la auto dilución, ya que con la última se estaba diluyendo a un 18 [%] de sólidos y el diseño considera un 15 [%] [14], aunque, con el actual sistema se desconoce cuál ha sido el cambio con respecto a esta variable. Para graficar esto se considera la totalidad de muestras bien recibidas de overflow del espesador, por lo tanto, se considera desde la muestra MO1 a MO21.

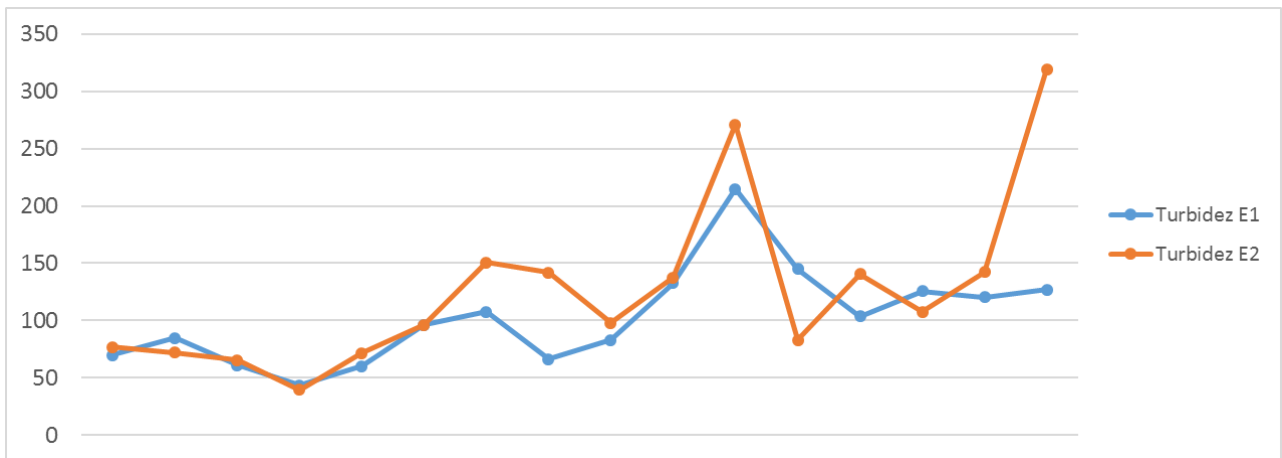


Figura 53. Turbidez del agua clara en espesadores E1 y E2.

4.2.10 Granulometría y velocidad de sedimentación

Para las sedimentaciones a un 15 [%] de sólidos se observa que hay una tendencia que a mayor granulometría d_{10} hay una mayor velocidad de sedimentación, esto corroboraría la dependencia directa que existe entre mayor diámetro de partícula y la velocidad terminal de sedimentación. Sin embargo, falta una mayor cantidad de datos para poder concluir en base a esta tendencia.

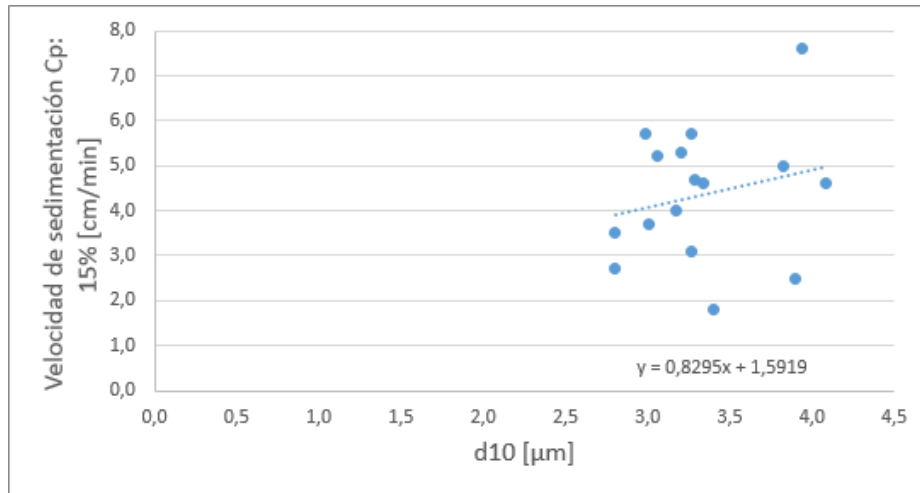


Figura 54. Velocidad de sedimentación Cp: 15% vs d10.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

- Los relaves estudiados presentan una alta variabilidad con muestras de comportamiento extremo en velocidad de sedimentación y reología.
- Los espesadores de relave se encuentran sub dimensionados, principalmente en su capacidad de torque máximo, variable que está limitando el lograr mayores porcentajes de sólido en la descarga.
- Dosis de reactivos superiores a 12 [gt⁻¹] no generan beneficios a la operación. Mayores dosis de floculante implican mayores valores de tensión de fluencia lo que podría afectar el torque en la zona baja del espesador.
- A mayor contenido de filosilicatos, se observa una disminución en el Cp final de descarga de las columnas de espesamiento y granulometrías más finas.
- Aumentos en tonelaje de tratamiento disminuyen el Cp de descarga de los espesadores. El mes de mayo es el mejor en tonelaje de tratamiento, pero posee el Cp de descarga más bajo.
- Los ensayos en columna llegan a Cp de descarga cercanos al diseño al no contar con una limitación de torque y reafirman que el no cumplimiento de este parámetro en operación es un problema que está relacionado con el torque percibido en las rastras.
- Se recomienda controlar la dilución de los espesadores mediante el uso de nuevas técnicas de dilución, como podría ser la dilución forzada.
- Realizar una evaluación técnica – económica de alternativas de potenciamiento de los actuales espesadores (aumento de capacidad de torque) versus la instalación de un nuevo espesador que permitan cumplir con el plan de tratamiento proyectado y los Cp requeridos en descarga y que considere la variabilidad detectada en este estudio.

- Realizar un estudio geo metalúrgico que permita identificar en que zonas del yacimiento se encuentran las muestras más problemáticas y a partir de esta información desarrollar el Plan Minero y/o tomar acciones correctivas si se presentan dificultades operacionales.
- Se recomienda disminuir la dosificación de reactivos a $10[gt^{-1}]$, ya que se observa una mejora en Cp de descarga, menor sobre floculación y una disminución en tensión de fluencia.
- Caracterizar en mineralogía un mayor número de muestras y utilizar tecnologías más cuantitativas como QEMSCAN, y a partir de estos resultados identificar mineralogías complejas y valores críticos.

Referencias

- [1] A. M. Luévanos, Fisicoquímica de superficies e interfases, México, 2012.
- [2] F. C. A., Solid - Liquid Separation in the Mining Industry, Springer, 2014.
- [3] A. R. Avello-Sanz, J. a. B. Muñoz y C. G. Olmedo, «Evolución de los equipos de decantación para estériles de mina: Del espesador convencional al de cono profundo para la producción de pasta,» Madrid.
- [4] Outotec, «Manual de operación y mantención,» 2013.
- [5] B. e. a. Ayling, «Qemscan (Quantitative evaluation of minerals by scanning electron microscopy): Capability and application to fracture characterization in geothermal systems,» *Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2012.
- [6] L. Contreras, «Caracterización mineralógica del proceso metalúrgico y su impacto en la producción de concentrados de Cu y Mo en CMDIC,» Santiago de Chile, 2015.
- [7] T. Groenewald y D. H. Köster, «Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) - La técnica de análisis rápidos del futuro».
- [8] S. Mukherjee, Applied Mineralogy: Applications in Industry and Environment, Springer, 2011.
- [9] R. Carrasco, «EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO Y SEDIMENTOLÓGICO DE MINERAL DE CABEZA Y,» Santiago de Chile, 2017.
- [10] F. Sofra, «Rheological Assessment - A Road Map for Plant Designers and Operators,» de *Paste 2006*, Perth, 2006.
- [11] B. Ndlovu, «The effect of phyllosilicate minerals on mineral processing industry,» *International Journal of Mineral Processing*, pp. 149-156, 2013.
- [12] D. R. Fuentes, «Curso reología de pulpas,» Santiago de Chile, 2011.

- [13] Fluor, «Procesos criterios de diseño área húmeda planta colectiva,» 2013.
- [14] Outotec, «Operational review at tailing thickeners,» Santiago de Chile, 2017.
- [15] P. e. a. Gottlieb, «Using quantitative electron microscopy for process mineralogy applications,» 2000.
- [16] SGS Minerals Services, «Qemscan Operational Modes,» 2013.
- [17] U. Kelm, «Arcillas: Pequeños minerales, grandes efectos,» de *Seminario Impacto de las Arcillas en los Procesos Metalúrgicos*, Valparaíso, 2013.
- [18] B. Ndlovu, «A preliminary rheological classification of phyllosilicate group,» *Minerals engineering*, pp. 190-200, 2014.
- [19] J. F. S. Pérez, «Análisis del comportamiento tixotrópico de relaves ante variaciones de cizalle,» Santiago de Chile, 2018.

ANEXO 1. Materiales y equipos



Figura 55. Columna semi-piloto de espesamiento.

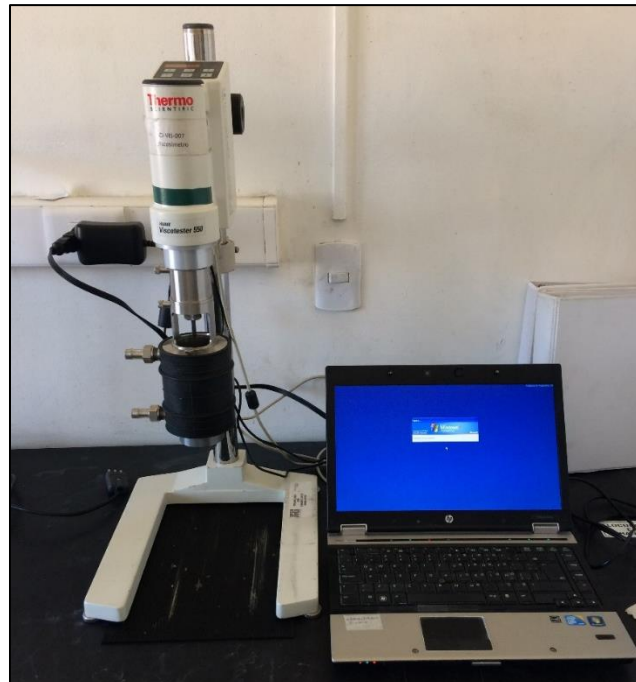


Figura 56. Reómetro VT-550.



Figura 57. Turbidímetro HACH.



Figura 58. Tablero eléctrico para manipular rastra mecánica y agitador.



Figura 59. Disposición de equipos de ensayo en columna semi-piloto de espesamiento.

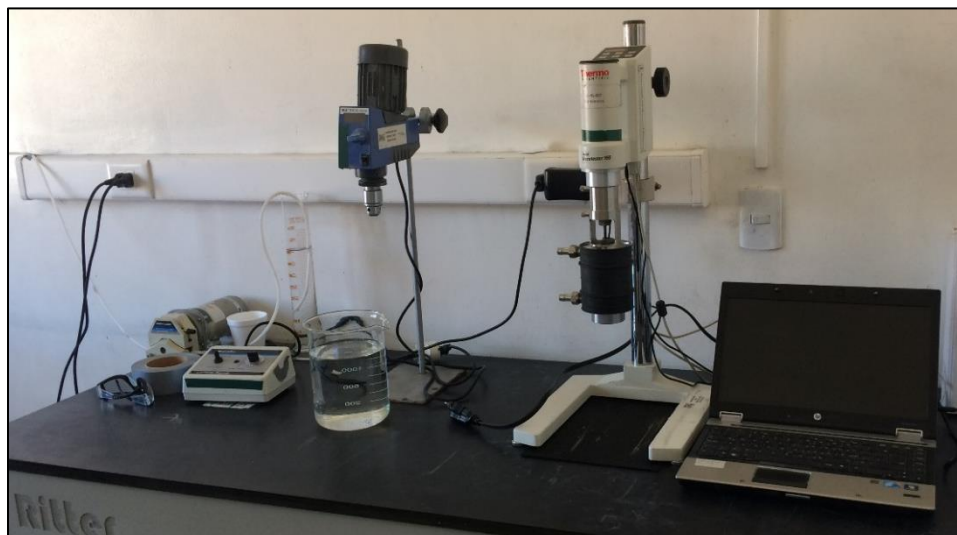


Figura 60. Disposición de bomba de floculante y reómetro VT-550.

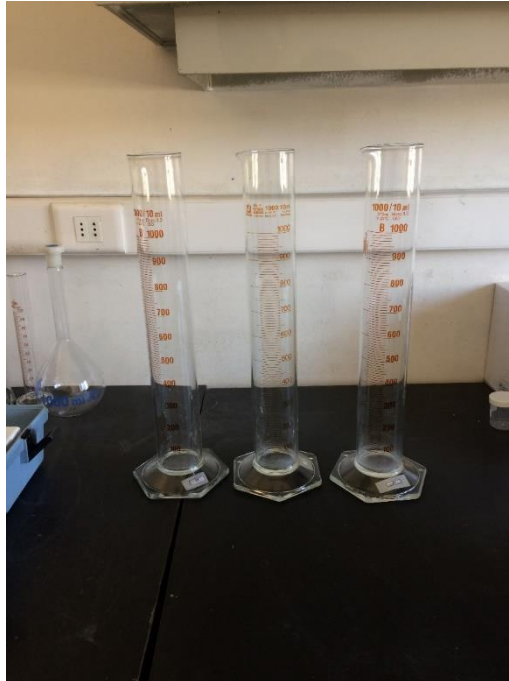


Figura 61. Probetas de 1 [l] para ensayos de sedimentación.

ANEXO 2. Resumen análisis estadístico de data operacional

Tabla 8. Resumen análisis boxplot del tonelaje de tratamiento.

Variable	Promedio Anual	Desviación Estándar	Mes	Q3
Tonelaje de tratamiento	4835	787,2	enero	5486
			febrero	5558
			marzo	5272
			abril	5371
			mayo	5859
			junio	5473
			julio	5347
			agosto	5288
			septiembre	5505
			octubre	5172
			noviembre	5041
			diciembre	5282

Tabla 9. Resumen análisis boxplot Cp de descarga E1 y E2.

Variable	E1				E2			
	Prom. Anual	Desv. Est.	Mes	Q3	Prom. Anual	Desv. Est.	Mes	Q3
Cp de descarga	57,72	3,099	enero	58	56,93	3,193	enero	57
			febrero	57			febrero	55
			marzo	57			marzo	58
			abril	59			abril	58
			mayo	58			mayo	56
			junio	60			junio	60
			julio	60			julio	59
			agosto	60			agosto	59
			septiembre	61			septiembre	60
			octubre	62			octubre	61
			noviembre	61			noviembre	60
			diciembre	58			diciembre	58

Tabla 10. Resumen análisis boxplot torque en E1 y E2.

Variable	E1				E2			
	Prom. Anual	Desv. Est.	Mes	Q3	Prom. Anual	Desv. Est.	Mes	Q3
Torque	41,61	4,504	enero	44	42,4	4,139	enero	45
			febrero	45			febrero	45
			marzo	45			marzo	45
			abril	45			abril	45

		mayo	45			mayo	46
		junio	44			junio	45
		julio	45			julio	45
		agosto	45			agosto	45
		septiembre	45			septiembre	45
		octubre	45			octubre	45
		noviembre	43			noviembre	45
		diciembre	45			diciembre	45

Tabla 11. Resumen análisis boxplot dosificación de floculante en E1 y E2.

Variable	E1				E2			
	Prom. Anual	Desv. Est.	Mes	Q3	Prom. Anual	Desv. Est.	Mes	Q3
Dosificación de floculante	11,03	3,494	enero	16	10,87	3,511	enero	45
			febrero	18			febrero	45
			marzo	15			marzo	45
			abril	12			abril	45
			mayo	12			mayo	46
			junio	11			junio	45
			julio	10			julio	45
			agosto	10			agosto	45
			septiembre	11			septiembre	45
			octubre	12			octubre	45
			noviembre	12			noviembre	45
			diciembre	10			diciembre	45

Tabla 12. Resumen análisis boxplot de altura agua clara en E1 y E2.

Variable	E1				E2			
	Prom. Anual	Desv. Est.	Mes	Q3	Prom. Anual	Desv. Est.	Mes	Q3
Altura agua clara	3,046	1,086	enero	3	3,122	1,045	enero	3
			febrero	2			febrero	3
			marzo	2			marzo	4
			abril	3			abril	4
			mayo	4			mayo	3
			junio	4			junio	4
			julio	4			julio	4
			agosto	4			agosto	4
			septiembre	4			septiembre	4
			octubre	4			octubre	4
			noviembre	4			noviembre	4
			diciembre	4			diciembre	4

ANEXO 3. Material fotográfico de columnas



Figura 62. Cama de sólidos de columna de 15 [gpt].



Figura 63. Canalización columna de 15 [gpt].



Figura 64. Cama de sólidos columna 10 [gpt].



Figura 65. Zoom Cama de sólidos de columna 10 [gpt].

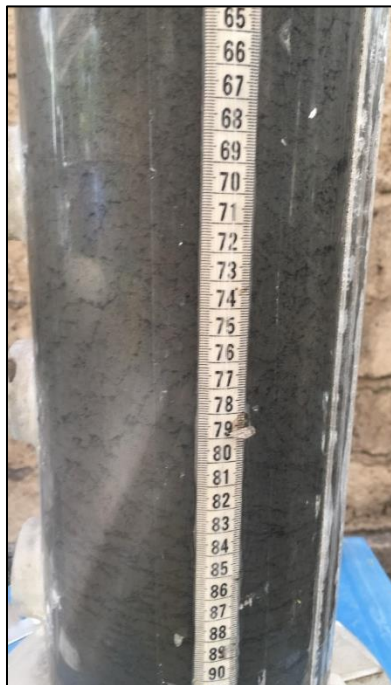


Figura 66. Atrapamiento de agua en cama de sólidos de columna de 15 [gpt].



Figura 67. Interface de sólido y zona de sedimentación columna 15 [gpt].

ANEXO 4. Resultados mineralogía Qemscan y DRX

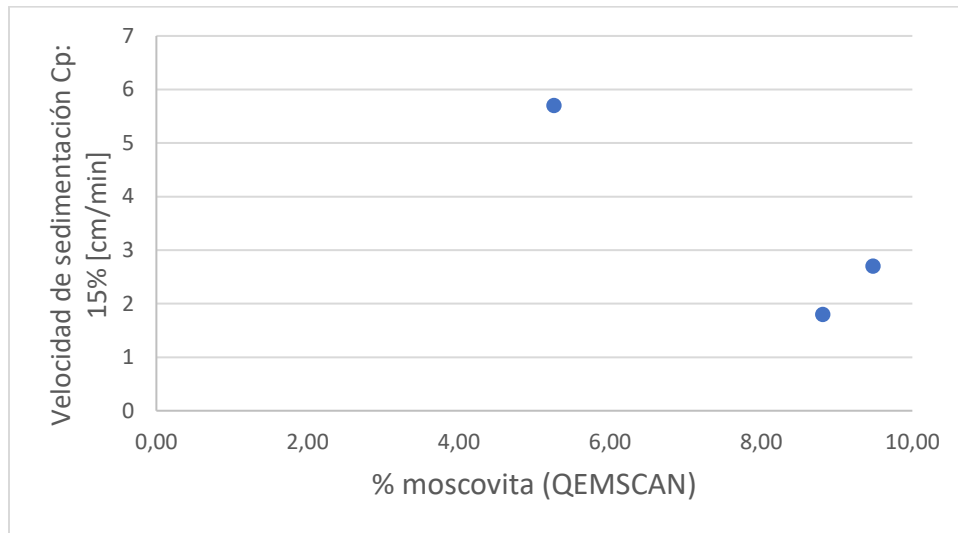


Figura 68. Velocidad de sedimentación Cp 15% vs % moscovita (QEMSCAN).

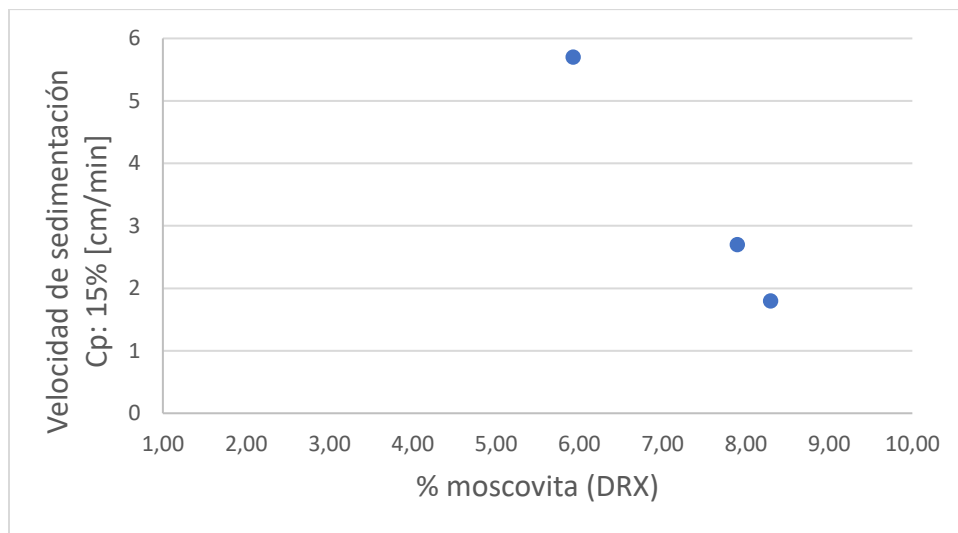


Figura 69. Velocidad de sedimentación Cp 15% vs %Moscovita (DRX).

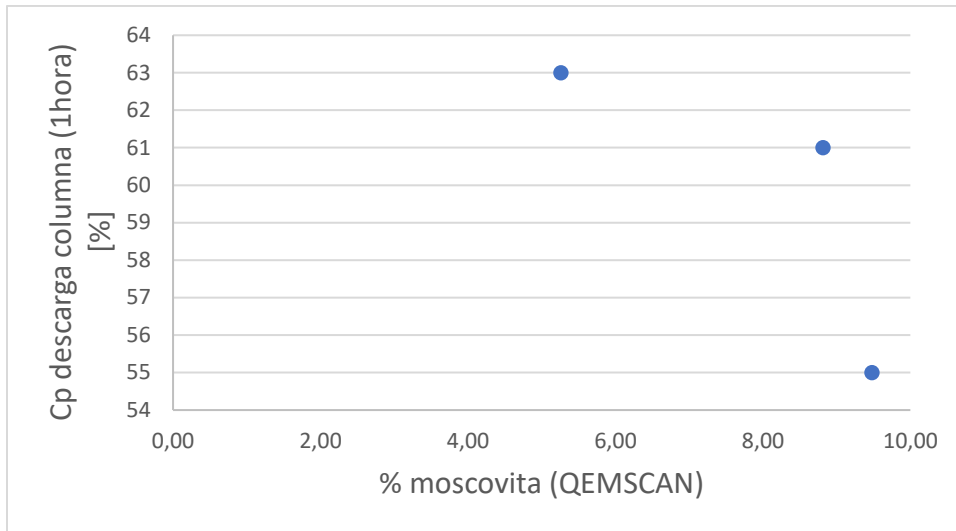


Figura 70. Cp de descarga columna (1 hora) vs % Moscovita (QEMSCAN).

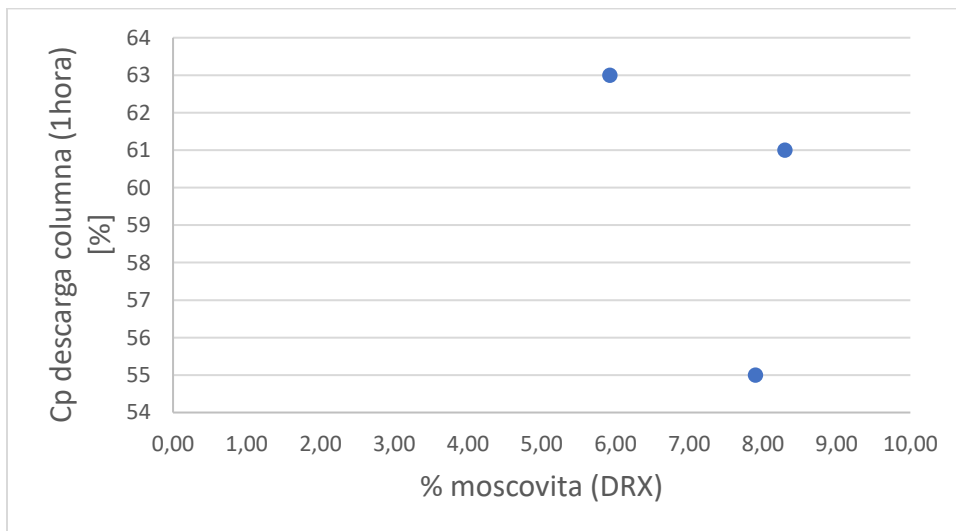


Figura 71. Cp de descarga columna (1 hora) vs % Moscovita (DRX).

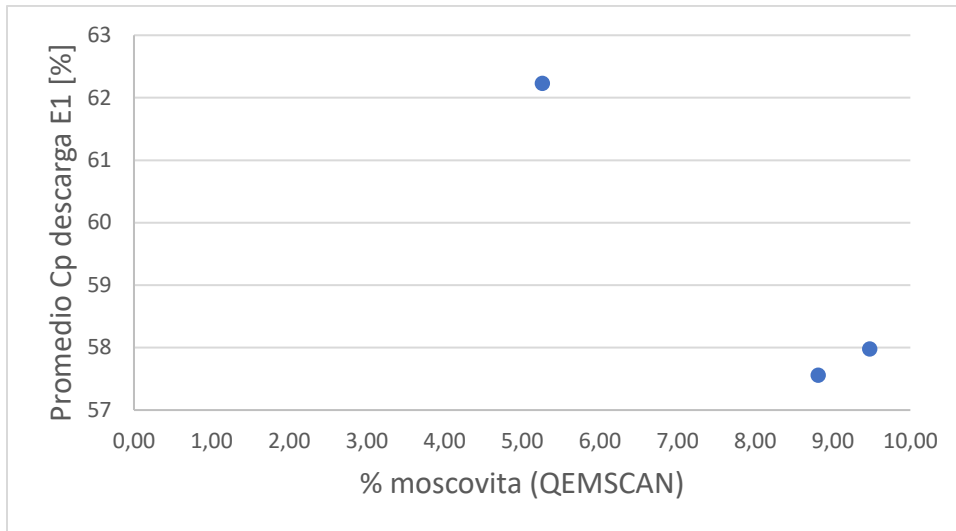


Figura 72. Promedio Cp descarga E1 vs % Moscovita (QEMSCAN).

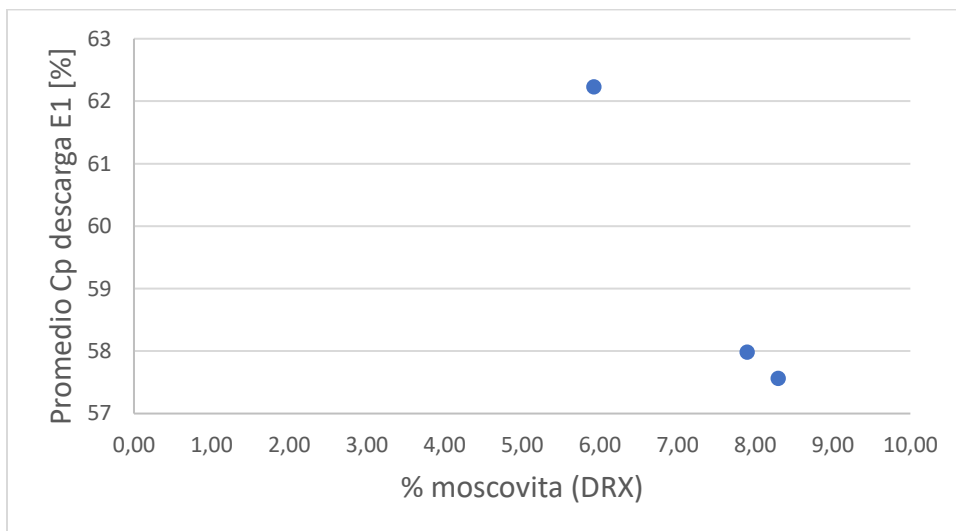


Figura 73. Promedio Cp descarga E1 vs % Moscovita (DRX).

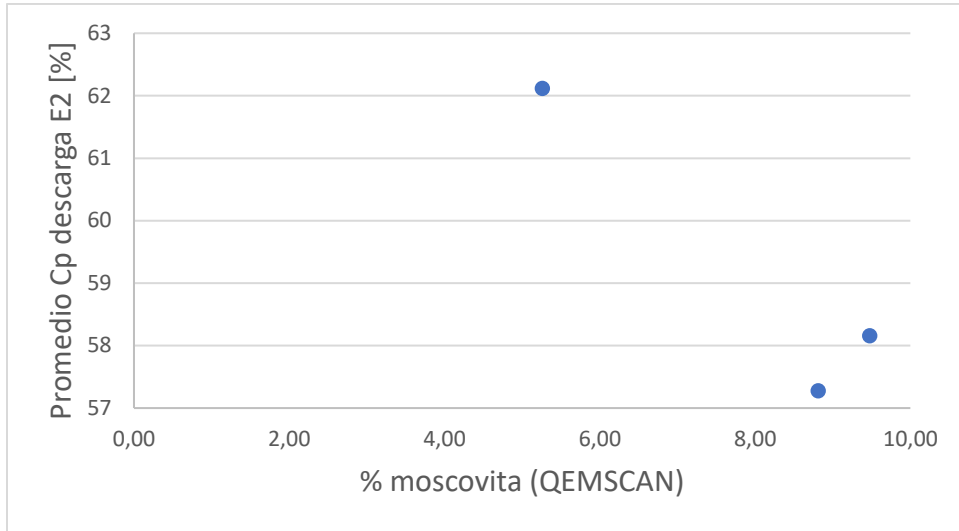


Figura 74. Promedio Cp descarga E2 vs % Moscovita (QEMSCAN).

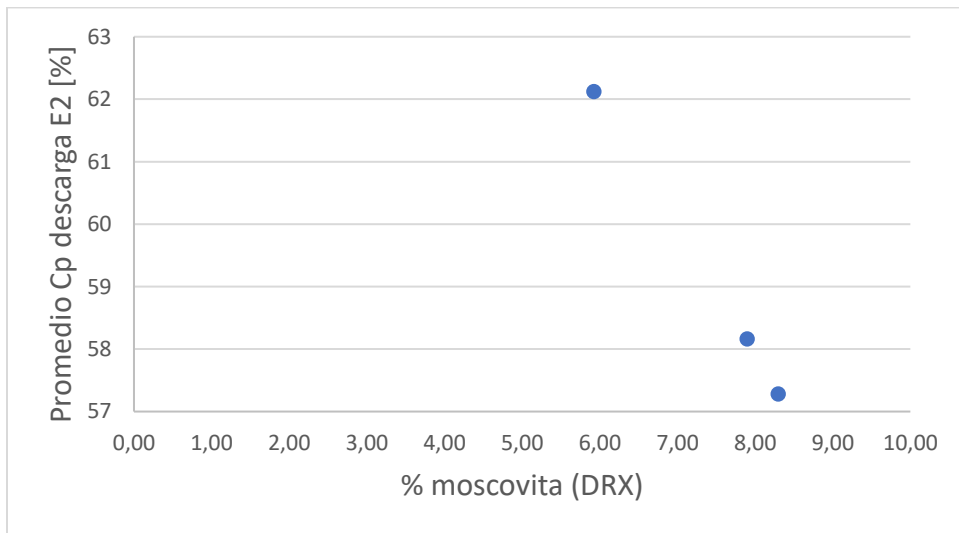


Figura 75. Promedio Cp descarga E2 vs % Moscovita (DRX).

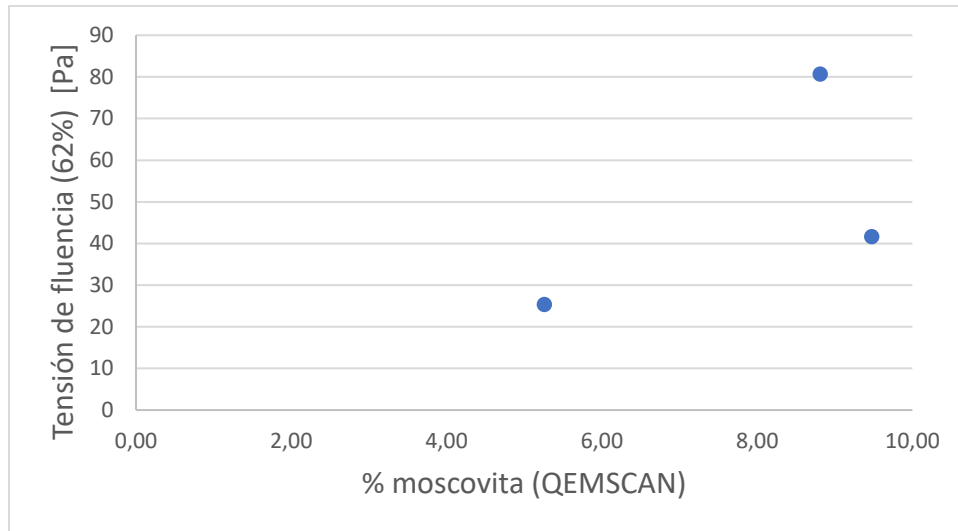


Figura 76. Tensión de fluencia Cp:62% vs % moscovita (QEMSCAN).

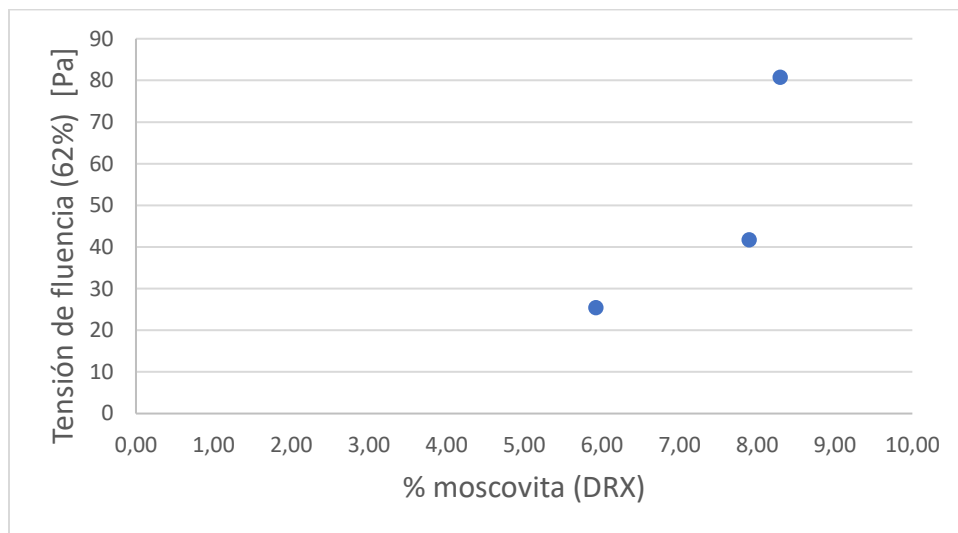


Figura 77. Tensión de fluencia Cp:62% vs % moscovita (DRX).

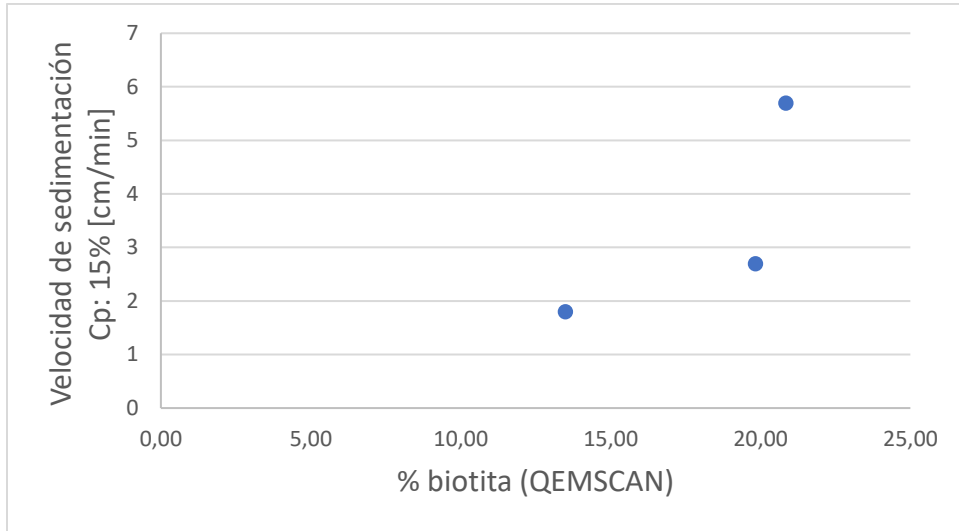


Figura 78. Velocidad de sedimentación Cp: 15% vs % biotita (QEMSCAN).

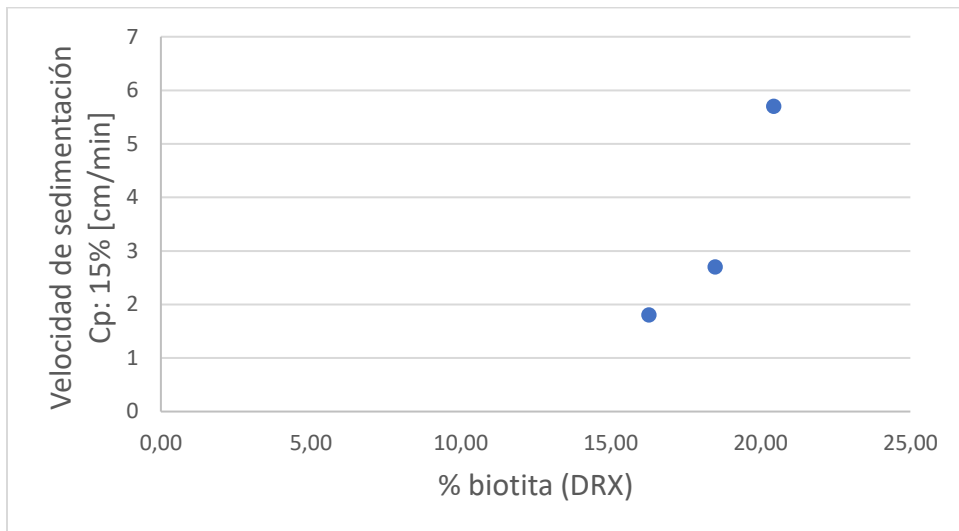


Figura 79. Velocidad de sedimentación Cp:15% vs % biotita (DRX).

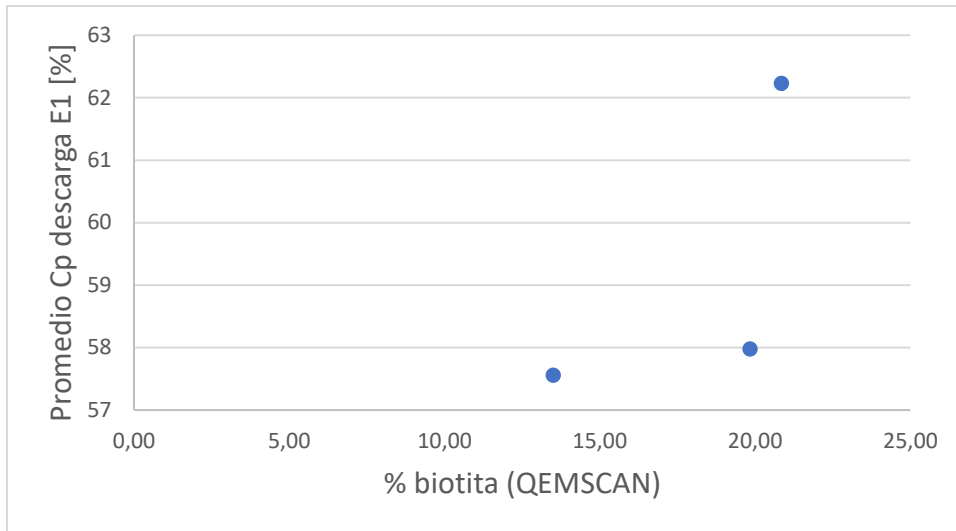


Figura 80. Promedio Cp descarga E1 vs % biotita (QEMSCAN).

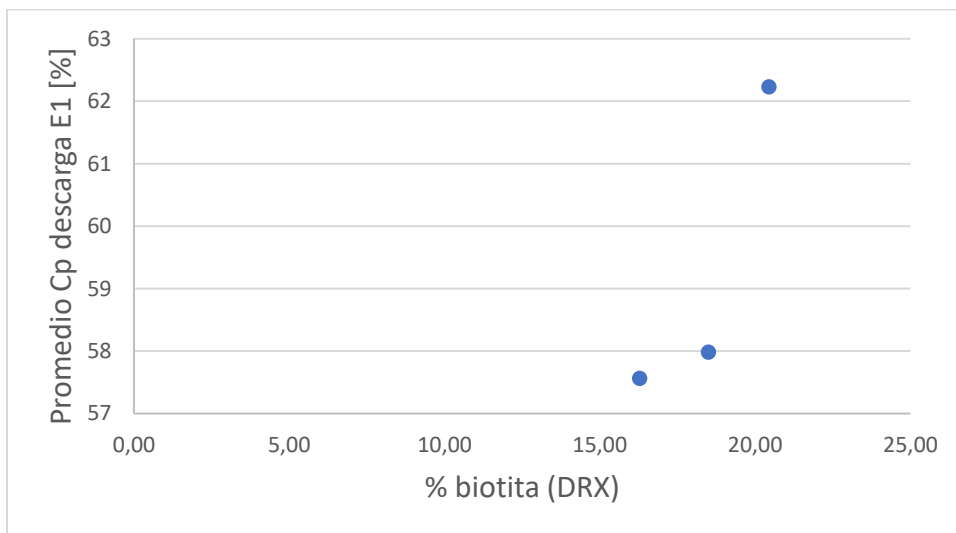


Figura 81. Promedio Cp descarga E1 vs % biotita (DRX).

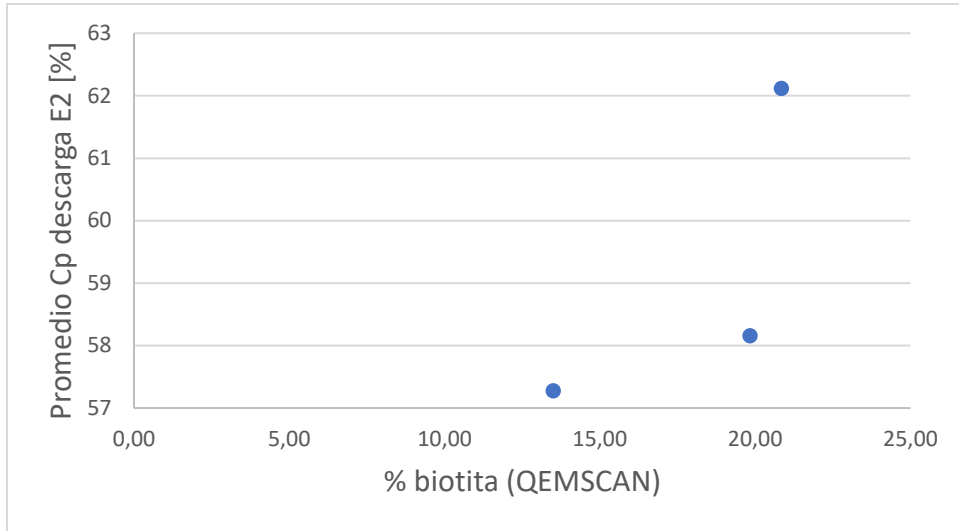


Figura 82. Promedio Cp de descarga E2 vs % biotita (QEMSCAN).

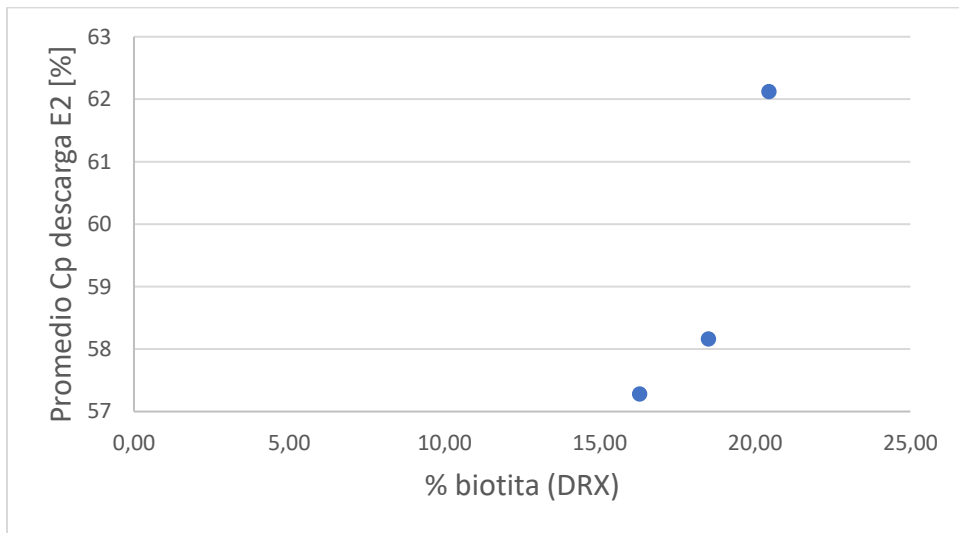


Figura 83. Promedio Cp de descarga E2 vs % biotita (DRX).

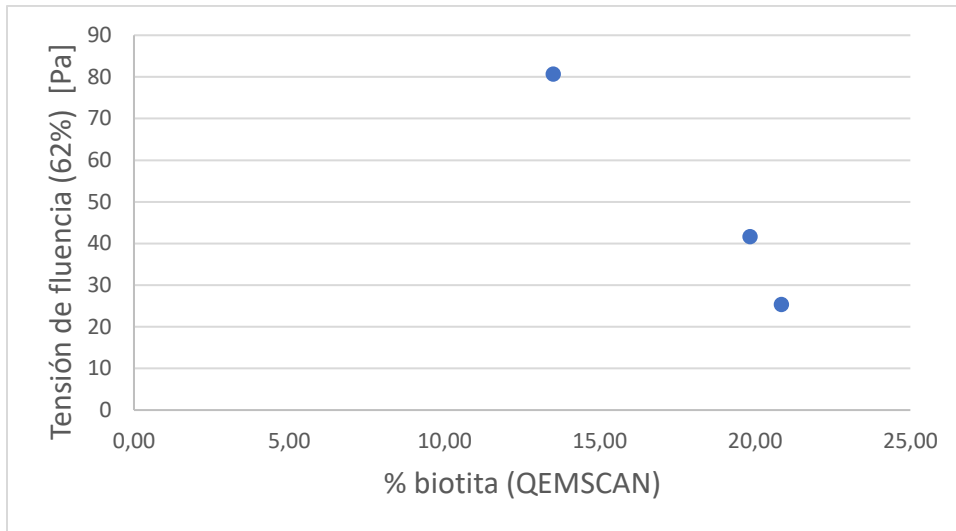


Figura 84. Tensión de fluencia Cp: 62% vs % biotita (QEMSCAN).

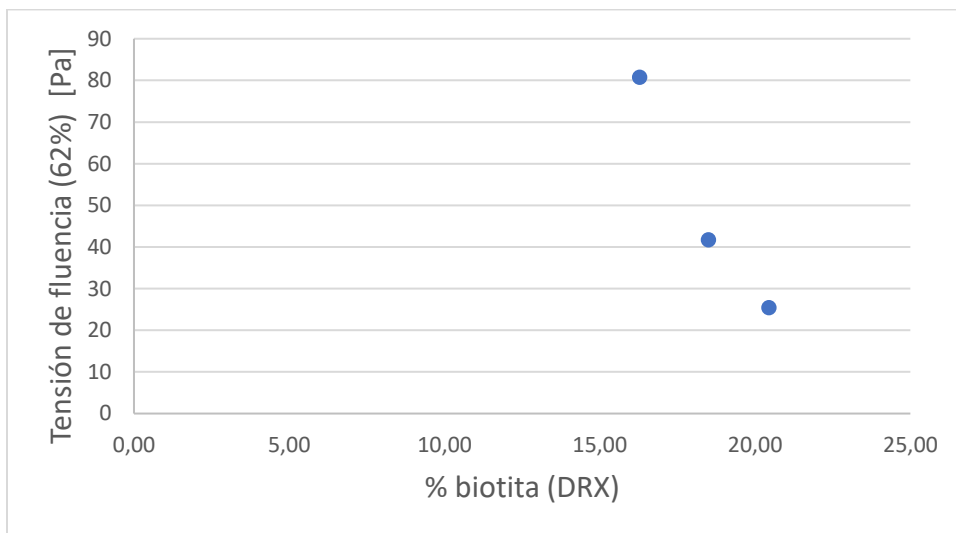


Figura 85. Tensión de fluencia Cp: 62% vs % biotita (DRX).

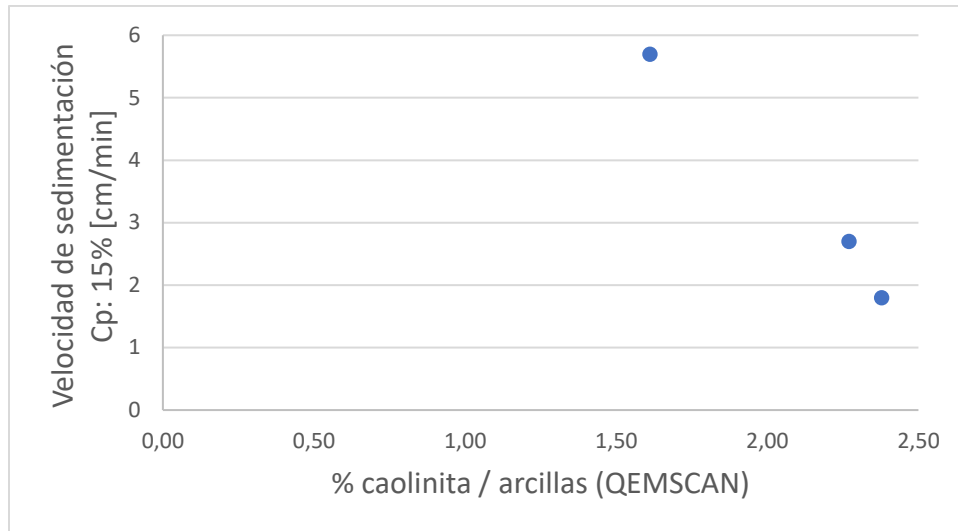


Figura 86. Velocidad de sedimentación Cp:15% vs % caolinita / arcillas (QEMSCAN).

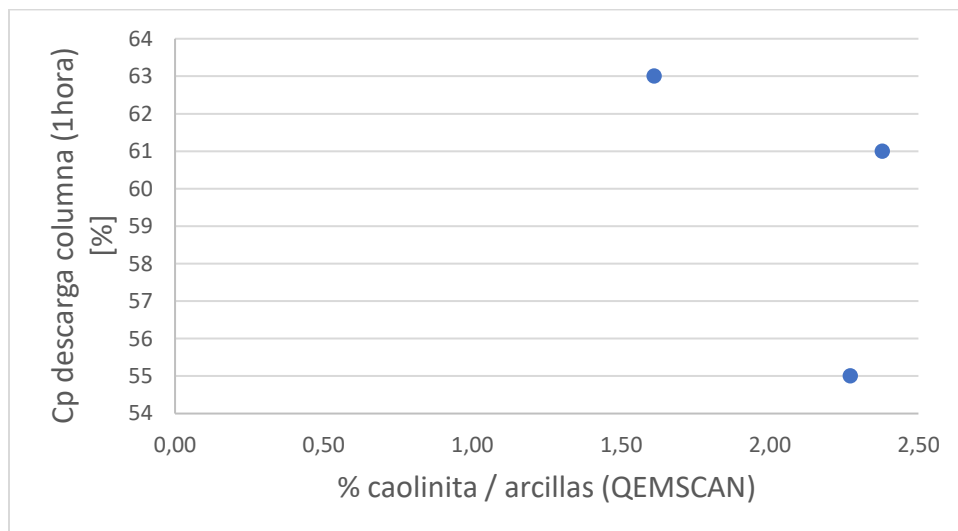


Figura 87. Cp de descarga columna (1 hora) vs % Caolinita / arcillas (QEMSCAN).

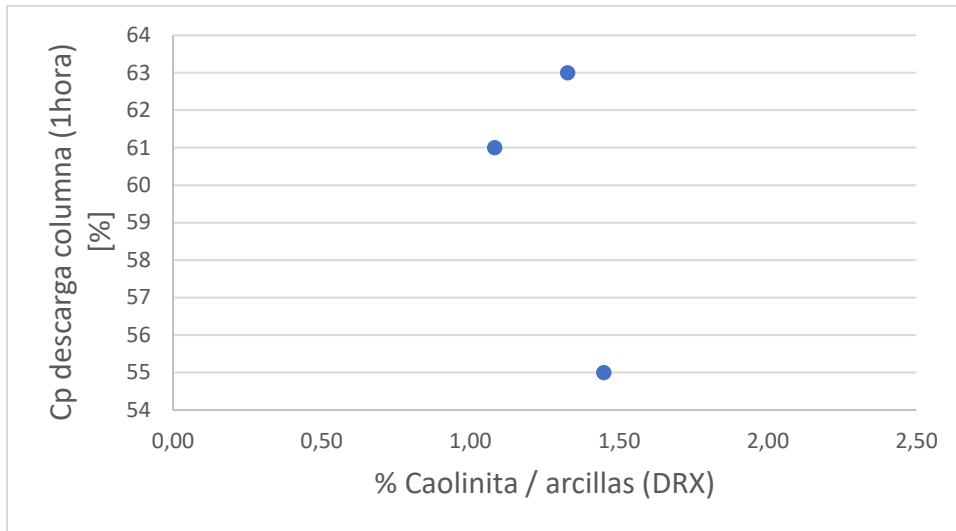


Figura 88. Cp de descarga columna (1 hora) vs % Caolinita / arcillas (DRX).

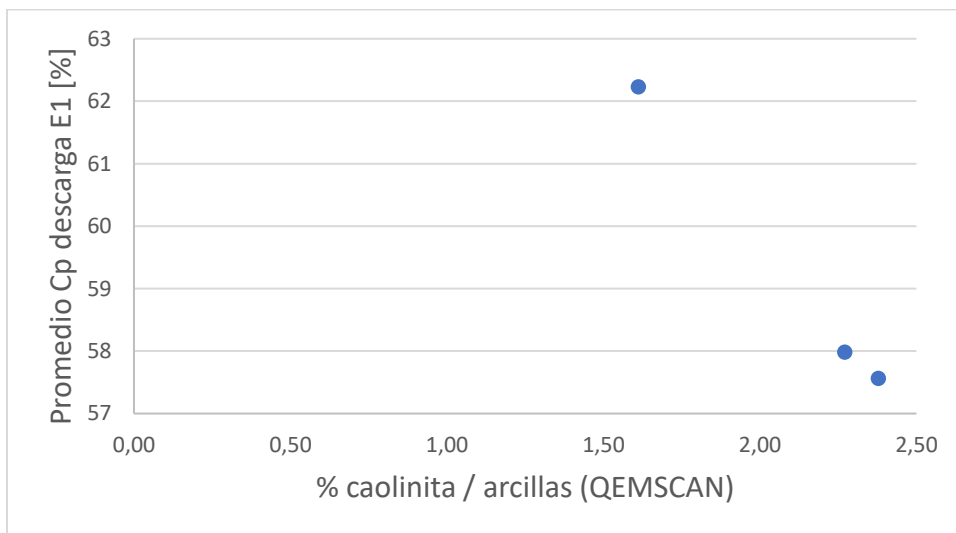


Figura 89. Promedio Cp descarga E1 vs % Caolinita / arcillas (QEMSCAN).

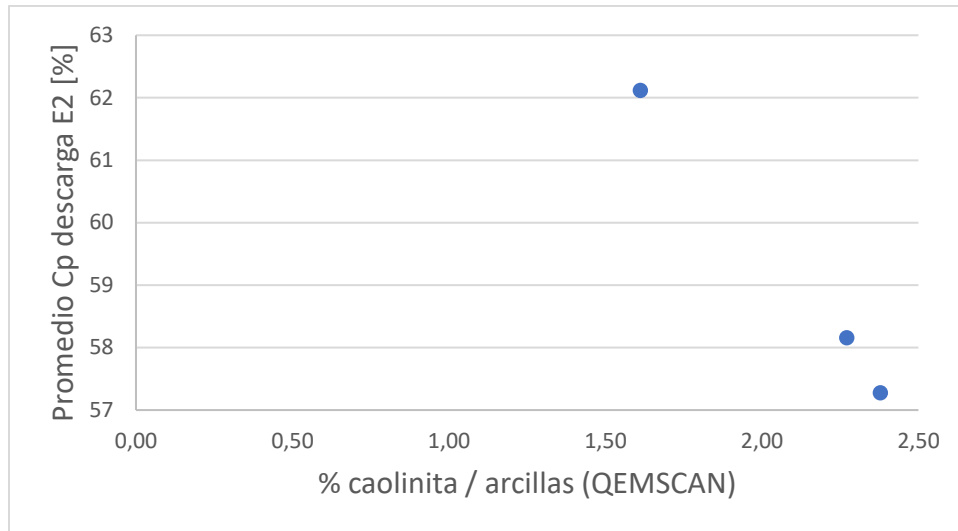


Figura 90. Promedio Cp descarga E2 vs % Caolinita / arcillas (QEMSCAN).

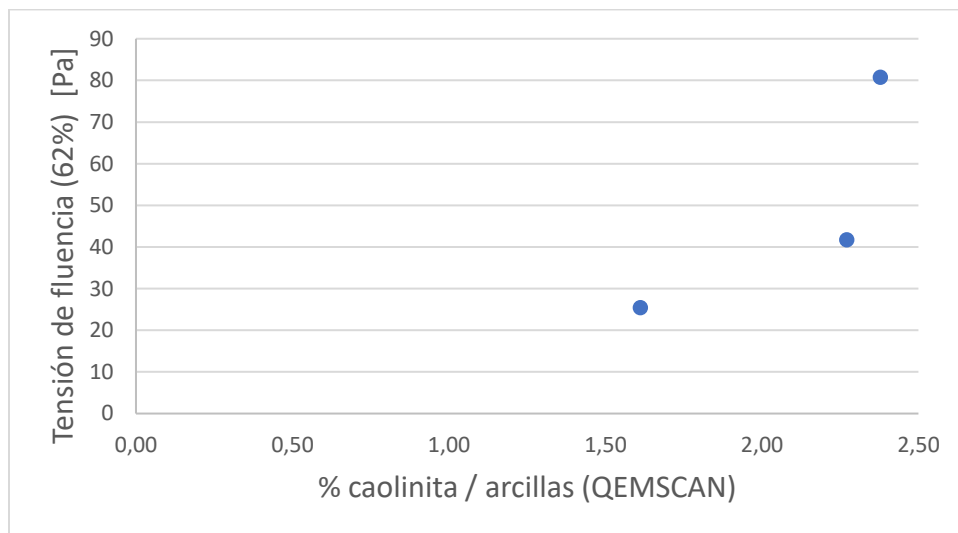


Figura 91. Tensión de fluencia Cp: 62% vs % Caolinita / arcillas (QEMSCAN).

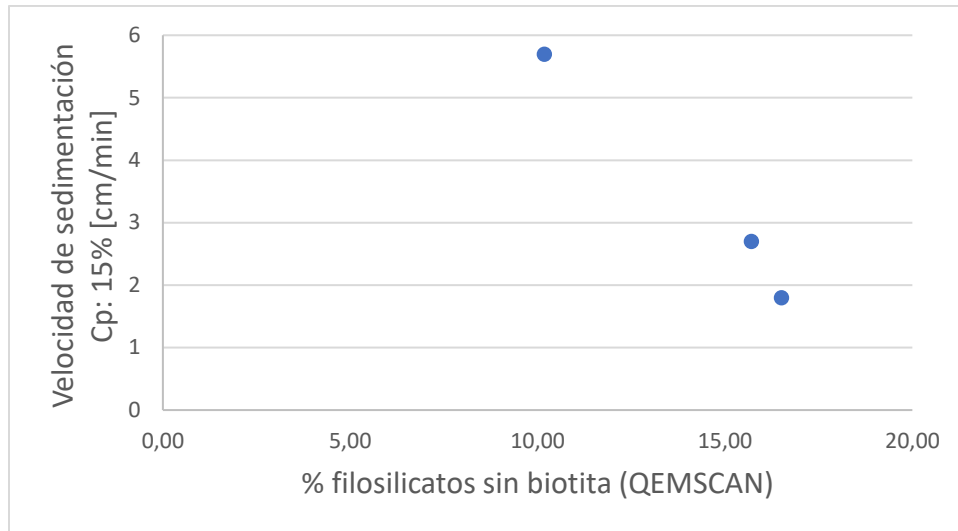


Figura 92. Velocidad de sedimentación Cp: 15% vs % filossilicatos sin biotita (QEMSCAN).

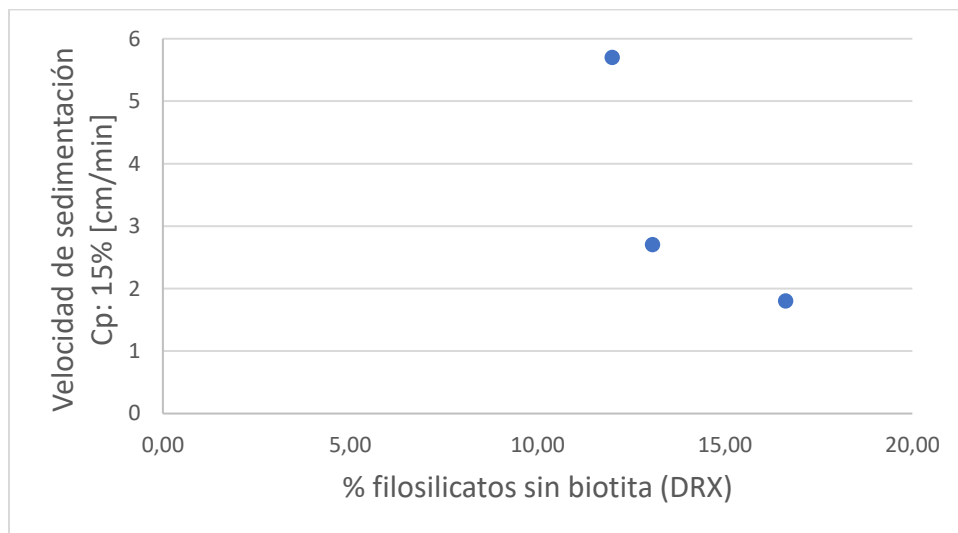


Figura 93. Velocidad de sedimentación Cp: 15% vs % filossilicatos sin biotita (DRX).

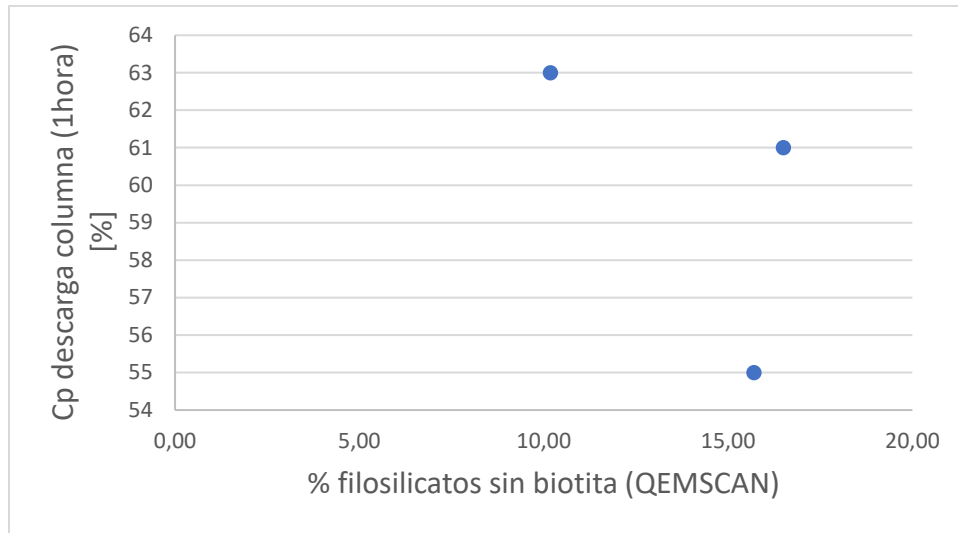


Figura 94. Cp de descarga columna (1 hora) vs % filosilicatos sin biotita (QEMSCAN).

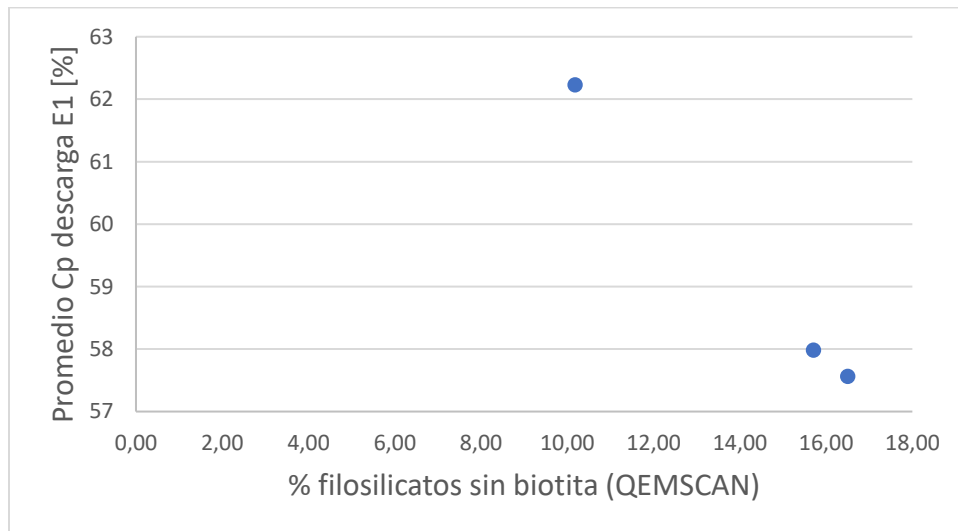


Figura 95. Promedio Cp de descarga E1 vs % filosilicatos sin biotita (QEMSCAN).

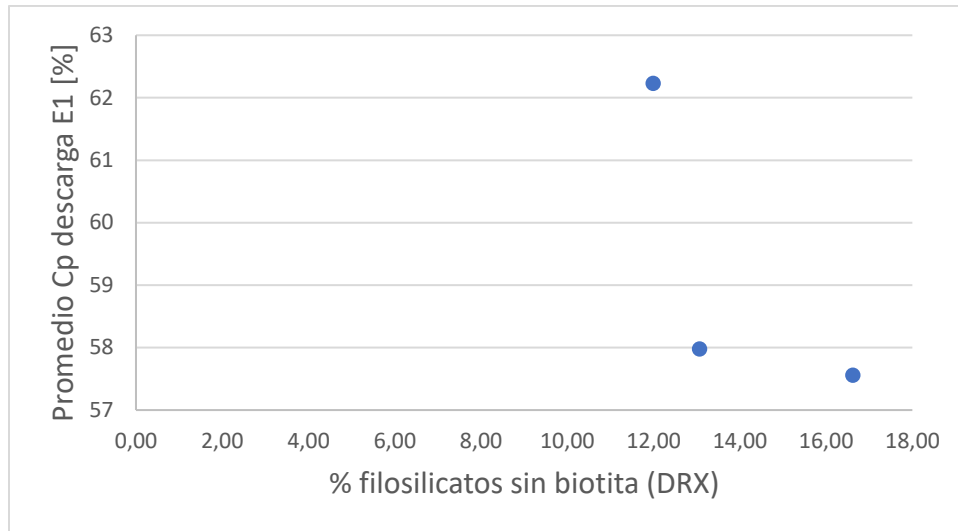


Figura 96. Promedio Cp de descarga E1 vs % filossilicatos sin biotita (DRX).

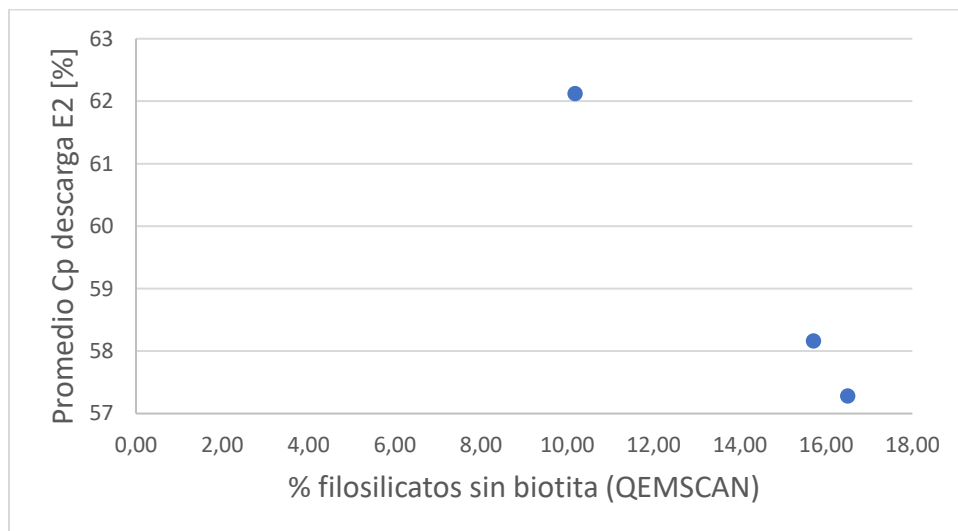


Figura 97. Promedio Cp de descarga E2 vs % filossilicatos sin biotita (QEMSCAN).

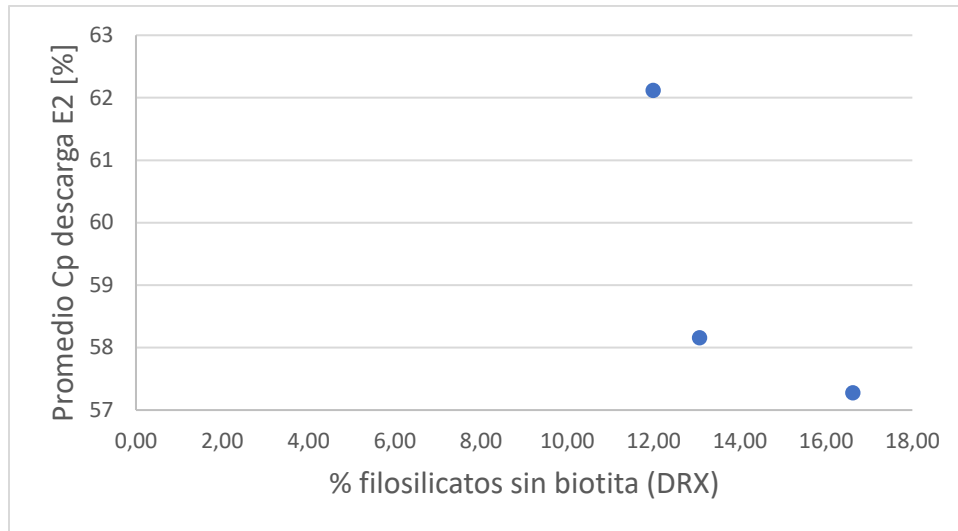


Figura 98. Promedio Cp de descarga E2 vs % filosilicatos sin biotita (DRX).

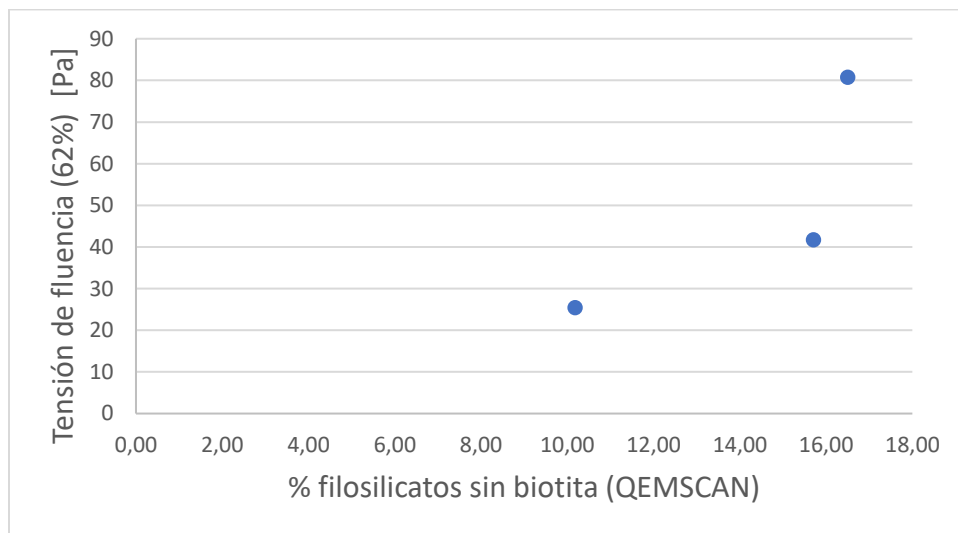


Figura 99. Tensión de fluencia Cp:62% vs % filosilicatos sin biotita (QEMSCAN).

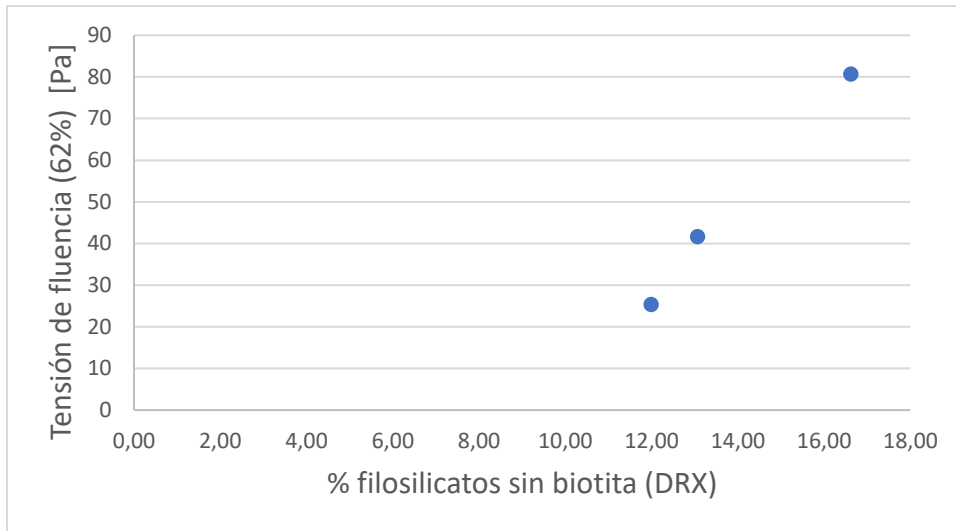


Figura 100. Tensión de fluencia Cp:62% vs % filossilicatos sin biotita (DRX).

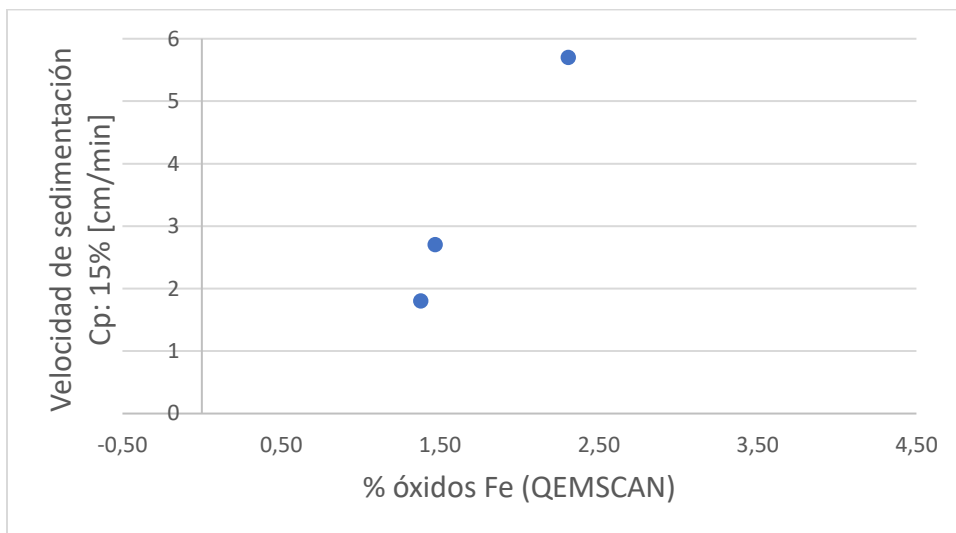


Figura 101. Velocidad de sedimentación Cp: 15% vs % óxidos de Fe (QEMSCAN).

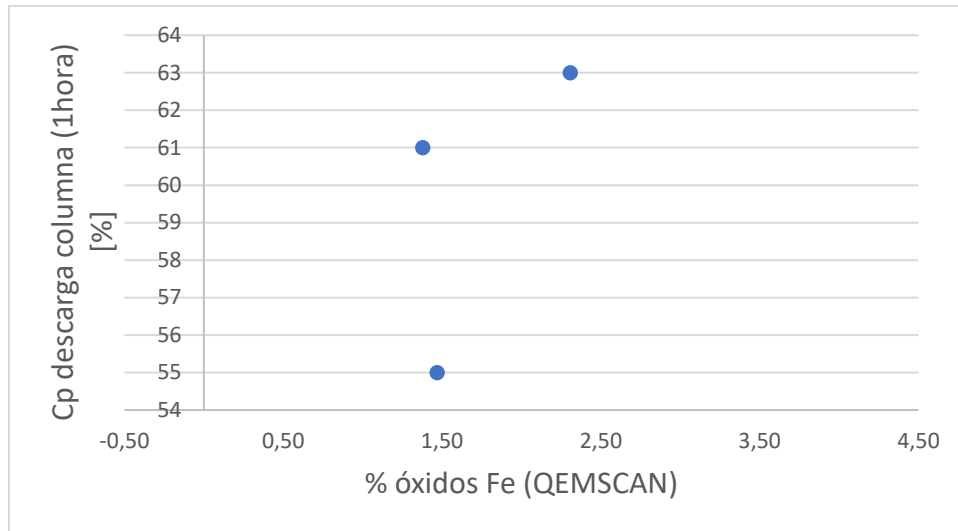


Figura 102. Cp de descarga columna (1 hora) vs % óxidos de Fe (QEMSCAN).

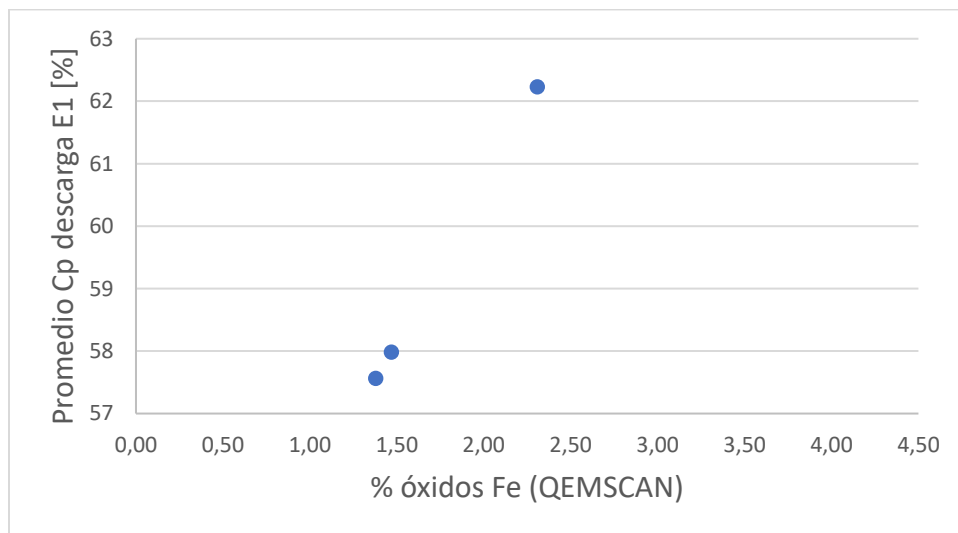


Figura 103. Promedio Cp de descarga E1 vs % óxidos de Fe (QEMSCAN).

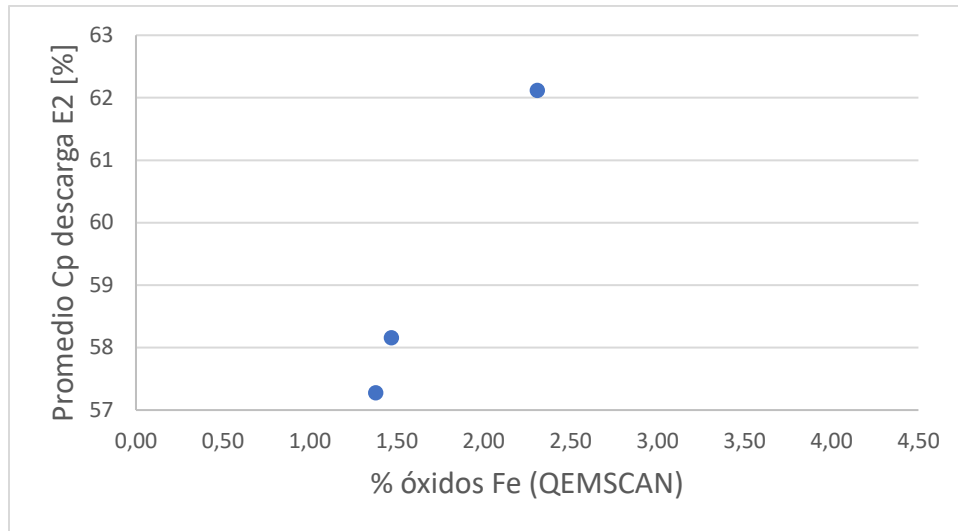


Figura 104. Promedio Cp de descarga E2 vs % óxidos de Fe (QEMSCAN).

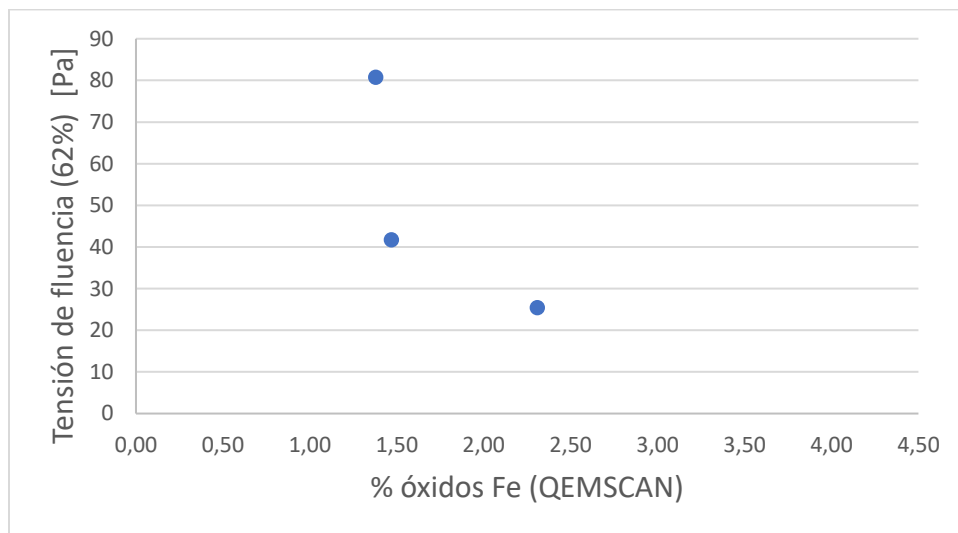


Figura 105. Tensión de fluencia Cp: 62% vs % óxidos de Fe (QEMSCAN).

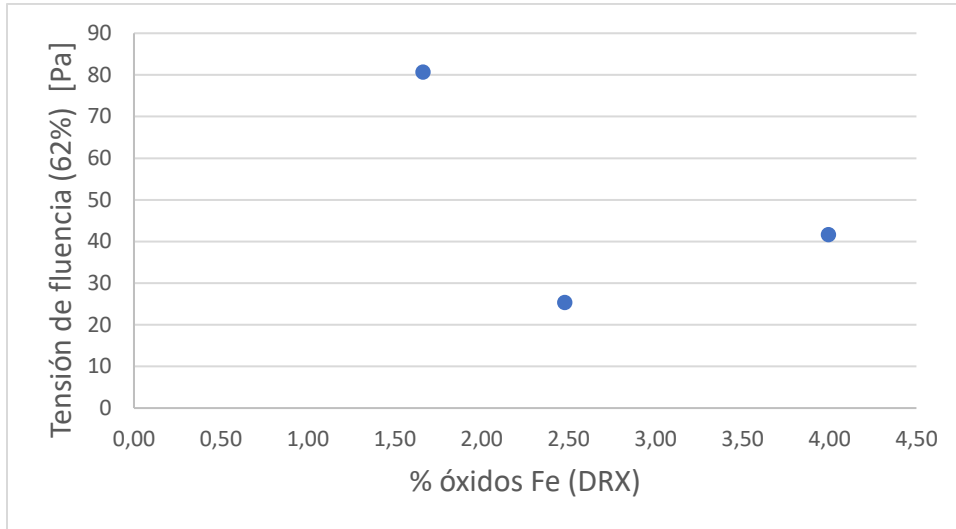


Figura 106. Tensión de fluencia Cp: 62% vs % óxidos de Fe (DRX).

ANEXO 5. Distribución granulométrica**Tabla 13. Resumen de distribución granulométrica de las muestras estudiadas.**

ID Muestra	D10 [μm]	D50 [μm]	D80 [μm]
MA1	3,2	34,9	149,7
MA2	3,7	33,2	146,7
MA3	3,9	29,4	130,6
MA5	3,0	28,0	95,6
MA6	3,1	31,9	104,2
MA7	3,3	36,7	151,0
MA8	2,8	19,6	108,5
MA9	2,8	19,1	105,4
MA10	3,4	46,2	162,2
MA11	3,5	46,7	172,3
MA12	3,3	37,1	135,9
MA13	3,2	24,6	118,4
MA14	3,5	53,3	167,9
MA15	3,8	59,4	186,0
MA16	4,1	61,1	182,3
MA17	3,9	49,4	167,0
MA18	3,0	25,2	119,4
MA19	3,3	28,9	139,2
MA20	3,2	33,6	133,2
MA21	3,3	31,5	133,5