

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería

Metalúrgica

Profesor(es) Patrocinante(s)

Leopoldo Gutiérrez Briones

Ingeniero Supervisor

Nicolás Miranda Moreno

ANÁLISIS OPERACIONAL Y ESTUDIO EXPERIMENTAL BASE PARA EL DESARROLLO DE HERRAMIENTA ESTIMATIVA DE CONSUMO DE CAL, DIVISIÓN ANDINA- CODELCO

Eduardo Alejandro Luengo González

Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Diciembre 2018

AGRADECIMIENTOS

Parece que fue ayer en que tomé mis cosas y me vine a estudiar a Concepción, 6 años de vida universitaria que parecían interminables y que ahora parecen momentos llenos de emoción, esfuerzo y dedicación, estrés y malos ratos pero que sin embargo también tuvo buenos momentos llenos de risa.

Hoy me gustaría agradecer a todos los que hicieron posible que yo esté aquí , en primer lugar, a mi familia, mis padres; mis tías y primos, que siempre me alentaron a dar lo mejor de mí, que siempre estuvieron presentes en los buenos y malos momentos de mi vida, cuidándome o dándome una palabra de aliento, apoyándome en todo tipo de situaciones, indudablemente sin ellos no sería la persona que soy hoy.

A mis amigos Karina y Arturo por siempre estar presentes a pesar de la lejanía, a mis grandes y mejores amigos, Esteban, Negro, Lili, Mati, Pableke, Pauli, Jara entre muchos otros; mención especial a mi compadre Enzo, muchas gracias por acompañarme, por siempre estar ahí en los mejores momentos y los no tan buenos como las sesiones de estudio a las 4 am con bajón de manhattan incluido, doy gracias a la vida por darme la dicha de conocer personas como ustedes, gracias por hacer de esta etapa la mejor de mi vida hasta ahora.

A mi tutor Nicolas Miranda, por sus consejos, preocupación y confianza en mis capacidades al momento de escogerme; a mi profesor guía, Leopoldo Gutiérrez, por su paciencia y disposición a resolver mis dudas, por los consejos recibidos durante el desarrollo de mi memoria.

A las personas que conocí en División Andina, las cuales me hicieron parte de su grupo de trabajo, Fernando Castañeda, Mario Castañeda, Juan Nuñez, Luis Salinas, Darío Concha, Piero Reyes, Bastián Meneses; mención especial al maestro y amigo, el cual no solo me apoyo dándome consejos desde su experiencia y sabiduría sino que además me recibió como uno más en su casa, el grotesco, don Patricio Gaete, indudablemente no estaría acá sino fuera por él; también destacar a una gran persona que coincidió con mi llegada a la división, el perri Antonio Candia, cuya amistad no solo se vio reflejada en el ámbito laboral, sino también fuera de este.

"El futuro recompensa a los que siguen adelante"

RESUMEN

El presente trabajo fue desarrollado en las dependencias del laboratorio metalúrgico de División Andina Codelco, cuyo objetivo general fue realizar un análisis de la operación de las plantas de cal y además generar una herramienta de estimación a escala laboratorio de consumo de cal, a través de datos operacionales o datos de laboratorio.

Este trabajo surge de la necesidad de una forma de estimar el consumo de cal y además de identificar las variables que poseen mayor trascendencia tanto en el consumo, como en la variabilidad, así de este modo plantear mejoras que permitan disminuir el consumo.

Las pruebas de preparación de lechada a escala laboratorio y las pruebas de flotación indican que hay presencia de aguas altamente iónicas que impactan en el consumo de cal y también en el funcionamiento de las plantas de preparación de cal.

En torno al agua, la mayor influencia en la dosificación de cal, tanto en las variables operacionales como de control, es el tipo de agua; en variables como calidad química, presencia de iones como HCO_3^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} generan problemas de sobreconsumo por la precipitación de compuestos al interactuar con el Ca(OH)_2 ; además iones como SO_4^{2-} hacen que la operación de hidratación de cal sea deficiente por la formación de CaSO_4 , por otro lado, en relación a la cantidad de agua a utilizar en el proceso de hidratación de cal, los resultados revelan que no operar con una cantidad fija de agua por cantidad de cal viva (100 g) a hidratar genera un aumento en la cantidad de rechazo, variaciones significativas en la granulometría de lechada de cal junto con un aumento en el consumo, estos resultados muestran que la mejor proporción es 100 g de cal viva con 300 mL de agua, además de ratificar que alimentar el proceso de hidratación con agua bajo 25°C produce una disminución de la ley de Ca(OH)_2 en la lechada.

Según la data operacional disponible, se tienen resultados favorables respecto a la relación entre la mineralogía de alimentación planta y el consumo de cal a nivel planta, sin embargo, los resultados del modelo multivariable son pobres, con un

coeficiente de determinación (R^2) de 0.17, cuyo resultado es atribuido al nulo control en los puntos de adición de lechada al sistema molienda-flotación.

Por último, el análisis llevado a cabo en la planta de preparación de lechada muestra que la planta posee bastantes falencias, sin embargo las más relevantes en torno al consumo de reactivo se atribuyen al nulo control, tanto de la temperatura de agua de alimentación a ambas plantas de preparación con agua a temperatura ambiente, como también al poco control de la cantidad de cal adicionada a los hidratadores, los cuales no tienen lectores de flujo másico; además de sistemas de preparación de lechada deficientes, cuyo parámetro actual de funcionamiento es en función de la temperatura del reactor, sin tomar en consideración la temperatura del agua de alimentación.



ABSTRACT

This work was developed in the facilities of metallurgical laboratory of División Andina Codelco, whose general objective was to carry out an analysis of the operation of lime plants and also to generate a scale estimation tool for the lime consumption, through operational data or laboratory data.

This work arises from the need for a way to estimate the consumption of lime as well as to identify the variables that have greater importance both in consumption and in the variability that it generates, and thus propose improvements to reduce consumption.

Laboratory-scale slurry preparation tests and flotation test indicate that there is presence of highly ionic water that have impact on lime consumption and also on the operation of lime preparation plants.

Regarding water, the greatest influence on lime dosage, in operational and control variables is the type of water; in variables such as chemical quality, the presence of ions such as HCO_3^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} produces problems of overconsumption due to precipitation of certain compounds when interaction with $\text{Ca}(\text{OH})_2$, also ions such as SO_4^{2-} make lime hydration process deficient by the formation of CaSO_4 . On the other hand, in relation to the amount of water used in the hydration process, the results reveal that not operating with a fixed amount of water per quantity of quick lime (100 g) to hydrate, generates an increase in the amount of rejection, significant variations in the granulometry of lime milk together with an increase in consumption, these results show that the best proportion is 100 g of quick lime with 300 mL of water, in addition, it was confirmed that feeding the hydration process with water under 25°C produces a decrease in the law of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the slurry.

According to the available operational data, there are favorable results regarding the relationship between the mineralogy of plant feed and consumption of lime at plant level, however, the results of the multivariate model are poor (R^2) of 0.17, whose result is attributed to the null control in points of addition of slurry to the grinding-flotation system.

Finally, the analysis carried out in the slurry preparation plants show that plants have many shortcomings, however the most relevant around the consumption of reagent are attributed to the null control, both of the water supply temperature to

both preparation plants with water at room temperature, as well as little control of the amount of lime added to the hydrators, which do not have mass flow readers; In addition to deficient slurry preparation systems, whose current operating parameter is a function of the temperature of the reactor, without taking into consideration the temperature of the feed water, for these reasons it is recommended to add water at 25 ° C and set the ratio lime :Water.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos Específicos	2
2. ANTECEDENTES PLANTA	3
2.1 Descripción General Empresa	3
2.2 Descripción de División Andina	4
2.3 Descripción de la Planta	5
3. ANTECEDENTES TEÓRICOS	18
3.1 Concepto de Flotación	18
3.2 Reactivos de Flotación	19
3.2.1 Colectores	19
3.2.2 Espumantes	19
3.2.3 Modificadores	20
3.3 Factores mineralógicos	22
3.3.1 Dolomita	22
3.3.2 Turmalina	23
3.3.3 Cuarzo	23
3.3.4 Molibdenita	24
3.3.5 Jarosita	25
3.3.6 Minerales de Hierro	26
3.3.7 Caolinita	27
3.4 Factores cualitativos	28
3.5 Cal	29
3.5.1 Dolomita	31
3.5.2 Magnesita	31
3.5.3 Calcita	31

3.6	Hidratación o Apagado	32
3.7	Caracterización Geológica División Andina	33
3.7.1	Alteración y Mineralización	33
3.7.2	Descripción Geometalúrgica	34
3.7.3	Modelo de Recuperación Geometalúrgico	35
3.8	Herramientas matemáticas y estadísticas	37
3.8.1	Coeficiente de correlación	37
3.8.2	Análisis de la varianza ANOVA	37
3.8.3	Regresión lineal múltiple	38
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	40
4.1	Muestras y reactivos	40
4.1.1.	Muestras para pruebas de flotación y consumo de reactivo en función de la calidad de agua	40
4.1.2.	Muestras para pruebas de calidad y cantidad de agua en la reactividad de cal y el consumo de lechada.	43
4.2	Equipos y procedimientos	46
4.2.1	Pruebas de flotación y consumo de reactivo en función de la calidad de agua.	46
4.2.2	Prueba de reactividad de cal en función de la calidad y cantidad de agua	49
5.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	55
5.1	Recopilación y análisis información planta	55
5.1.1	Información histórica cal viva y datos planta	55
5.1.2	Data operacional de plantas de lechada e información relevante	59
5.2	Flotación y consumo de reactivo	62
5.3	Pruebas de reactividad en función de la calidad y cantidad de agua	67

5.4	Formulación aproximación calculo IP cal	75
5.5	Preparación y distribución lechada de cal	78
6	CONCLUSIONES	82
7	RECOMENDACIONES	83
8	BIBLIOGRAFIA	84
9	ANEXOS	88
9.1	Filtro datos IP histórico	88
9.2	Comportamiento pH natural	89
9.3	Requerimientos cal viva SIBELCO requeridas por contrato	90
9.4	Arreglo datos QUEMSCAM junto con tratamiento	92
9.5	Distribución mineralógica DAND	92
9.6	Composición histórica agua haulage	93
9.7	Condiciones de precipitación elementos agua haulage	94
9.8	Condiciones de precipitación de sulfato de calcio pruebas de reactividad de cal	94
9.9	Análisis económico hidratación de cal viva.	95
9.10	Arreglo calculo IP cal	96
9.11	Datos pruebas de flotación calidad de agua	98
9.12	Datos pruebas de calidad y cantidad de agua en la reactividad de cal y consumo de lechada.	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Vista Aérea de la distribución del yacimiento Rio-Blanco-Los Bronces, la línea roja delimita la zona propiedad de División Andina (Spiess, 2017)	4
Figura N° 2 Ubicación geográfica de la zona de operación de División Andina, específicamente el yacimiento Rio Blanco (Spiess, 2017).....	5
Figura N° 3 Diagrama de flujos planta concentradora División Andina (Seco, 2014).	6
Figura N° 4 Diagrama de flujos molienda convencional (Candia, 2016).....	6
Figura N° 5 Diagrama de flujos molienda unitaria I (Candia, 2016).	7
Figura N° 6 Diagrama de flujos molienda unitaria II (Candia, 2016).....	7
Figura N° 7 Diagrama de flujos molienda SAG (Candia, 2016).....	8
Figura N° 8 Diagrama de flujos flotación colectiva cobre-molibdeno DAND (Seco, 2014).	9
Figura N° 9 Cortador terciario sección SAG.	10
Figura N° 10 Cortador cuaternario sección SAG.....	10
Figura N° 11 Cortador terciario sección convencional A.	11
Figura N° 12 cortador cuaternario convencional A.	11
Figura N° 13 Cortador primario convencional E.	12
Figura N° 14 Cortador terciario convencional E.	12
Figura N° 15 Esquema de distribución alimentación cortadores metalúrgicos y alimentación sección de flotación.	13
Figura N° 16 Diagrama de flujos planta de cal N°1 (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).	14
Figura N° 17 Descripción en detalle hidratador de cal planta de cal N°2, línea completa (Morales, 2003).	14
Figura N° 18 Diagrama de flujos planta de cal N°2 (Morales, 2003).	15
Figura N° 19 Corte transversal y distribución equipos planta de cal N°2 (Morales, 2003).	15
Figura N° 20 Esquema de adición y control de pH línea SAG y unitario II (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).	16
Figura N° 21 Esquema de adición de lechada y control de pH sección molienda convencional (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).....	16
Figura N° 22 Esquema de adición de lechada y control de pH molienda unitaria I (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).	17
Figura N° 23 Esquema de adición de lechada y control de pH etapa de flotación colectiva (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).	17
Figura N° 24 Esquema de procesos de flotación en máquina de flotación (Gutiérrez, 2015).	18
Figura N° 25 Esquema de adsorción de colector sobre partícula mineral (Gutiérrez, 2015).	19
Figura N° 26 Esquema de adsorción de espumantes en interfaz agua/gas (Gutiérrez, 2015).	20
Figura N° 27 Esquema de formación de especies hidrofílicas sobre la superficie de la pirita (Gutiérrez, 2015).	21

Figura N° 28 Recuperación de pirita en función del pH con distinto modificador de pH (Gutiérrez, 2015).	22
Figura N° 29 pH de la solución en función del tiempo de agitado (Chen, 2004).	23
Figura N° 30 Variación en la cantidad de calcio adsorbido en cuarzo (Ahmed and Van Cleave, 1965).	24
Figura N° 31 Dependencia del pH en la adsorción de calcio en cuarzo, $K_{ps}(Ca(OH)_2) = 10 - 5.2$. pH de la superficie de precipitación para diferentes valores supuestos de grosor de la capa de adsorción (δ): $\delta (35 \text{ \AA})$: pH = 11.4, $\delta (10 \text{ \AA})$: pH = 11.5, $\delta (4 \text{ \AA})$: pH = 10.96 (Clark and Cooke, 1968)	24
Figura N° 32 Adsorción de iones de calcio por método de trazado radioactivo en función de la cantidad de $Ca(OH)_2$ libre en la pulpa (mg/L) y el pH (ajustado con ácido sulfúrico e hidróxido de sodio) (Lenkovskaya and Stepanov, 1968; Hoover, 1980).	25
Figura N° 33 Combinación de $CaCO_3$ con $Ca(OH)_2$ para el tratamiento de soluciones de drenajes ácidos de mina (Hariani, Salni and Riyanti, 2017)	27
Figura N° 34 Esquema de reacción entre mineral sulfurado y medio de molienda (Buckard, 2011).	27
Figura N° 35 Distribución de especies carbonáceas en función del pH para el agua de mar, $K_{ps1} = 4.46 * 10 - 7$, $K_{ps2} = 4.69 * 10 - 11$, $P=1 \text{ atm}$.	28
Figura N° 36 Diagrama de flujo de producción de cal viva (Coloma, 2008)	30
Figura N° 37 Efecto del tamaño de partícula en el proceso de fabricación de cal viva (Hassibi, 1999).	31
Figura N° 38 Esquema de adición de lechada de cal DAND (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).	33
Figura N° 39 Sección longitudinal esquemática de definición de UGM para recuperación rougher de cobre (MicGale, 2018: INFORME DE MODELO E INVENTARIO DE RECURSOS GEOLOGICOS)	36
Figura N° 40 Sólidos sedimentados muestra de agua haulage.	43
Figura N° 41 Sólidos sedimentados agua recuperada.	43
Figura N° 42 Perfil granulométrico cal viva pruebas de cantidad y calidad de agua.	44
Figura N° 43 Molino de bolas laboratorio metalúrgico DAND.	47
Figura N° 44 a)Mallas ASTM, b)Equipo Ro-Tap para realización de análisis granulométrico.	47
Figura N° 45 Maquina de flotación escala laboratorio DAND.	48
Figura N° 46 a) Equipo completo de hidratación de cal; b) Sensor de temperatura utilizado.	50
Figura N° 47 a) Proceso de obtención de rechazo reactividad de cal; b) Rechazo de la reactividad de cal	51
Figura N° 48 Fracción -400# lechada de cal en papel base filtro.	51
Figura N° 49 Ejemplo de almacenaje lechada de cal post proceso de homogeneización.	52
Figura N° 50 Comportamiento IP cal periodo noviembre 2010 a mayo 2018 (líneas segmentadas color verde indican término del año).	55

Figura N° 51 Comportamiento tratamiento mensual a nivel planta y por cada cortador metalúrgico.	56
Figura N° 52 Temperatura agua de alimentación hidratador de cal N°4, planta de cal N°2.	59
Figura N° 53 Temperatura agua de alimentación hidratador de cal N°5, planta de cal N°2.	59
Figura N° 54 Comportamiento razón cal:agua hidratador N°4, planta de cal N°2.	60
Figura N° 55 Comportamiento razón cal:agua hidratador N°5, planta de cal N°2.	60
Figura N° 56 Efecto de la temperatura del agua de alimentación en la calidad química de le lechada de cal, CaO alimentación [%]: 82.4, Codelco DAND (Cárdenas, 2015)	61
Figura N° 57 Temperatura reactor de hidratación de cal para dos temperaturas de agua de alimentación, con razón cal:agua 1:4 (Cárdenas, 2015).	61
Figura N° 58 Efecto del tipo de agua en la recuperación a pH 10.5 a) cobre; b) hierro; c) insoluble; d) molibdeno.	62
Figura N° 59 Efecto del tipo de agua en la ley de concentrado a pH 10.5 a) cobre; b) hierro; c) insoluble; d) molibdeno.	63
Figura N° 60 Efecto del tipo de agua en la recuperación a pH 12.2 a) cobre; b) hierro; c) insoluble; d) molibdeno.	64
Figura N° 61 Efecto del tipo de agua en la ley de concentrado a pH 12.2 a) cobre; b) hierro; c) insoluble; d) molibdeno.	65
Figura N° 62 Variación del consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en función del tipo de agua a) pH=10.5; b) pH=12.2.	66
Figura N° 63 Distribución granulométrica lechada de cal en función del tipo y cantidad de agua en la reactividad de cal, a) agua fresca; b) agua recuperada; c) agua desmineralizada.	68
Figura N° 64 Temperatura del reactor de hidratación en función del tipo y cantidad de agua. a) t=3 min; b) t=6 min.	69
Figura N° 65 Masa de rechazo del proceso de hidratación de cal en función de la cantidad y calidad de agua.	69
Figura N° 66 Masa de rechazo reactividades de cal y cantidad de CaO perdido en cada prueba; Eje izquierdo masa rechazo y masa de CaO, eje derecho Ley de rechazo.	70
Figura N° 67 Recuperación en función del tipo de lechada preparada con distintos tipos de agua y distinta cantidad de agua a) cobre; b) hierro; c) molibdeno.	71
Figura N° 68 Recuperación en función del tipo de lechada preparada con distintos tipos de agua y distinta cantidad de agua. d) peso; e) insoluble.	72
Figura N° 69 Ley de concentrado en función de lechada de cal hidratada con distinta cantidad y calidad de agua. a) cobre; b) molibdeno; c) hierro; d) insoluble.	72
Figura N° 70 Consumo de lechada de cal hidratada con distinta calidad y cantidad de agua.	73
Figura N° 71 Aglomerados ultrafinos razón cal:agua 1:2. a) agua fresca; b) agua recuperada; c) agua desmineralizada	74

Figura N° 72 Distribución aguas de alimentación a sección molienda-flotación. (Fuente: Operadores panel de flotación DAND).	75
Figura N° 73 Planilla de cálculo IP de cal a escala laboratorio.	76
Figura N° 74 Resultados simulación de IP de	77
Figura N° 75 Cañerías de alimentación de agua a estanques de hidratación de cal. a) slaker N°5; b) slaker N°4; c) slaker N°1; b) slaker N°2.....	79
Figura N° 76 Alimentación agua slaker N°1, planta de cal N°1.	80
Figura N° 77 Válvula de adición de lechada de cal utilizada actualmente en planta concentradora DAND.	81
Figura N° 78 Análisis de dispersión y comportamiento atípico antes de filtro para datos de IP de cal histórico a nivel planta. a) Caja y Bigotes b) Histograma con ajuste normal.....	88
Figura N° 79 Análisis de dispersión y comportamiento atípico después de filtro para datos de IP de cal histórico a nivel planta. a) Caja y bigotes; b) Histograma con ajuste normal.	88
Figura N° 80 Variación histórica pH natural mineral línea rajo y subterránea. ...	89
Figura N° 81 Distribución del arreglo para la formulación de una aproximación lineal al IP de cal.	92
Figura N° 82 Composición histórica agua haulage. a) ion SO_4^{2-} ; b) ion HCO_3^-	93
Figura N° 83 Composición histórica agua haulage. a) ion Ca^{2+} ; b) ion Mg^{2+} ; c) ion Cu^{2+}	93
Figura N° 84 Resultados balance de masa reactividad de cal para la determinación de calidad de lechada. a) Masa de Lechada de Cal; b) Masa de $Ca(OH)_2$; c) Ley de $Ca(OH)_2$ lechada de cal.....	95
Figura N° 85 Perdida en miles de dólares por concepto de rechazo en el proceso de hidratación de cal, Precio: 0.205 [kusd/t], Masa[t]=2452.07.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Minerales de ganga y su efecto en el procesamiento de minerales (Baum, 2014)	26
Tabla N° 2 Mineral carbonáceo de alimentación al proceso de fabricación de cal viva (Coloma, 2008: La cal es un reactivo químico).	30
Tabla N° 3 Características geológicas que afectan directamente la recuperación rougher de cobre (MicGale, 2018: INFORME DE MODELO E INVENTARIO DE RECURSOS GEOLOGICOS).	35
Tabla N° 4 Caracterización química muestra mineral	40
Tabla N° 5 Caracterización QEMSCAN mineral pruebas de flotación y consumo de reactivo calidad de agua.	41
Tabla N° 6 Característica química mineral pruebas de flotación y consumo de reactivo.	42
Tabla N° 7 Caracterización química agua	42
Tabla N° 8 Resultados análisis químicos y físico cal viva pruebas calidad y cantidad de agua.	44
Tabla N° 9 Caracterización química agua utilizada en pruebas calidad y cantidad de agua.	44
Tabla N° 10 Análisis químico muestra mineral para pruebas de calidad y cantidad de agua en reactividad y flotación.	45
Tabla N° 11 Caracterización QEMSCAN mineral pruebas de reactividad de cal y flotación, línea rajo, correa A-3.	45
Tabla N° 12 Resultados tiempo de molienda requerido mineral línea rajo y línea subterránea.	47
Tabla N° 13 Distribución de condiciones pruebas de flotación y consumo de reactivo en función de la calidad de agua.	49
Tabla N° 14 Descripción de condiciones pruebas de reactividad de cal.	53
Tabla N° 15 Descripción de condiciones pruebas de flotación.	53
Tabla N° 16 Resultados análisis estadístico variables mineralógicas de impacto en variabilidad tanto IP como tonelaje de cal viva ($\alpha = 95 \%$).	57
Tabla N° 17 Variación en la recuperación de insoluble con respecto a la utilización de agua fresca a pH 10.5.	63
Tabla N° 18 Distribución de tamaño del 97% de la masa pasante en micrones.	68
Tabla N° 19 Distribución de alimentación agua a estanques de almacenamiento interno, (Fuente: Operadores de panel flotación DAND).	76
Tabla N° 20 Promedio anual según la data disponible en torno al pH natural de la muestra.	89
Tabla N° 21 Distribución Mineralógica de alimentación DAND.	92
Tabla N° 22 Datos escala laboratorio de IP de cal por la línea de trabajo, pH y tipo de agua utilizada	96
Tabla N° 23 Ley de concentrado pruebas de flotación y consumo de reactivo línea rajo	98
Tabla N° 24 Masa de concentrado y cola pruebas de flotación y consumo de reactivo línea rajo.	98

Tabla N° 25 Recuperación pruebas de flotación y consumo de reactivo línea rajo.....	99
Tabla N° 26 Ley de concentrado pruebas de flotación y consumo de reactivo línea subterránea.....	99
Tabla N° 27 Masa de concentrado y cola pruebas de flotación y consumo de reactivo línea subterránea.....	100
Tabla N° 28 Recuperación pruebas de flotación y consumo de reactivo línea rajo.....	100
Tabla N° 29 Ley de concentrado pruebas en función de lechada de cal a distinta cantidad y calidad de agua.....	101
Tabla N° 30 Masa de concentrado y cola de pruebas en función de lechada de cal a distinta cantidad y calidad de agua.....	102
Tabla N° 31 Recuperación pruebas en función de lechada de cal a distinta cantidad y calidad de agua.....	103



NOMENCLATURA

ASTM	: American Society for Testing and Materials
Cal viva	: Óxido de Calcio
cm ³	: Centímetros cúbicos
Compósito	: Muestra que contiene una mezcla de muchos componentes
DAND	: División Andina
ft	: Pie
g	: Gramo
HP	: Caballo de fuerza
IP	: Variable que cuantifica los gramos de cal por tonelada métrica seca procesada (dosificación)
km	: Kilómetros
K _{ps}	: Producto de solubilidad
kt	: Kilo toneladas
Loop	: Sistema con retorno de alimentación
m.s.n.m	: Metros sobre el nivel del mar
m ³	: Metros cúbicos
mm	: Milímetros
OK	: Outokumpu
PiSystem	: Sistema de control, visualización y almacenamiento de datos en línea
PPM	: Partes por millón (miligramos por litro)
QEMSCAN	: Evaluación cuantitativa de materiales mediante microscopio electrónico de barrido
RAF	: Refinado a fuego

RPM	: Revoluciones por minuto
SAG	: Molienda semi-autogena
Set point	: Punto de referencia
Slaker	: Hidratador
Tmf	: Tonelada métrica fina
μm	: Micrones



1. INTRODUCCIÓN

La optimización de recursos en la industria minera es un eje fundamental en el cual se sustenta el objetivo de hacer rentable económicamente el negocio, lograr este objetivo manteniendo el estándar operacional y los resultados mínimos que requiere el proceso no es tarea fácil. Es por esto que las empresas se encuentran en constante mejoramiento y en la búsqueda de formas de estimar la cantidad de recursos que requieren de la mejor manera posible para realizar sus operaciones.

Inserto en esto, destaca un reactivo en particular, la cal, cuyo consumo actual es 727.6 [g/t] el cual es estimado con un promedio de lo obtenido anteriormente por la superintendencia de planta y procesos, es por esto que Codelco División Andina plantea estudiar una forma de predecir y optimizar el consumo de cal, junto con plantear mejoras que permitan disminuir el consumo de este reactivo.

El trabajo para lograr el objetivo planteado por DAND se fundamenta en 5 pilares, los cuales son una recopilación de información disponible en torno al tema, recopilación y análisis de datos de la planta disponibles, planteamiento de pruebas escala laboratorio, las cuales se encuentren orientadas en torno a lo encontrado en los puntos anteriores, planteamiento base de la herramienta que permita estimar el consumo de cal y finalmente un análisis operacional de planta que permita disminuir el consumo de cal a través de recomendaciones basadas en lo encontrado en el desarrollo del tema.

1.1 **Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo es generar una herramienta de estimación del consumo de cal y una evaluación de la planta de cal para la disminución del consumo.

1.2 **Objetivos Específicos**

1. Análisis estadístico de la información disponible y evaluación de la factibilidad de realización de un modelo en base a data operacional.
2. Análisis cualitativo y cuantitativo de insumos que impactan en el consumo de cal.
3. Análisis del funcionamiento de plantas de cal, desde los insumos hasta la operación.
4. Planteamiento de herramienta experimental de estimación de consumo de cal.
5. Plantear recomendaciones que permitan disminuir el consumo de cal.

2. ANTECEDENTES PLANTA

2.1 Descripción General Empresa

La Corporación Nacional del Cobre de Chile Codelco, es una empresa de carácter autónomo, propiedad del estado chileno, cuyo negocio radica en la exploración, desarrollo, procesamiento y explotación de recursos mineros de cobre y subproductos, para la obtención y comercialización de cobre refinado.

Codelco es el productor de cobre de mina más grande del mundo y la empresa que más contribuye a la economía chilena, con una producción durante el 2017 de 1,842 miles de tmf de cobre, incluyendo su participación en minera El Abra y Anglo American Sur, esta cifra representa el 9% de la producción mundial y el 33% nacional, además es el segundo productor mundial de molibdeno y el primero a nivel nacional, con una producción de 28,674 tmf durante el 2017.

Codelco concentra aproximadamente el 7% de las reservas mundiales de cobre, además cuenta con una participación del 10% en la producción de molibdeno. La compañía cuenta con siete divisiones; Radomiro Tomic, Chuquicamata, Gabriela Mistral, Ministro Hales, Salvador, Andina y El Teniente, además se suma División Ventanas respectiva fundición y refinería de la corporación.

El principal producto comercializado por Codelco es el cobre refinado a la forma de cátodos de cobre, con un 99.99% de pureza, sin embargo, también produce concentrado de cobre, cobre blíster, ánodos de cobre y lingotes RAF, y subproductos como concentrados y óxidos de molibdeno, barras anódicos y ácido sulfúrico.

2.2 Descripción de División Andina

División Andina opera el yacimiento¹ Rio Blanco, cuya riqueza es conocida desde 1920, pero sin embargo comienza su explotación en 1970.

El yacimiento Rio Blanco-Los Bronces (Figura N°1) corresponde a un depósito del tipo pórfido² de cobre y molibdeno, se ubica en el sector de las nacientes de los ríos Blancos y San Francisco, cuya propiedad se encuentra dividida entre la filial Sur Andes de Anglo American y División Andina, con más de dos tercios del total de recursos ubicados en el sector Andina. En el sector Andina se explotan tres cuerpos mineralizados principales denominados Rio Blanco, don Luis y Sur Sur, adicionalmente resultados recientes de exploración han identificado recursos geológicos al sur de Sur Sur, cuyas operaciones se desarrollan mediante la explotación del yacimiento Rio Blanco y Sur Sur.

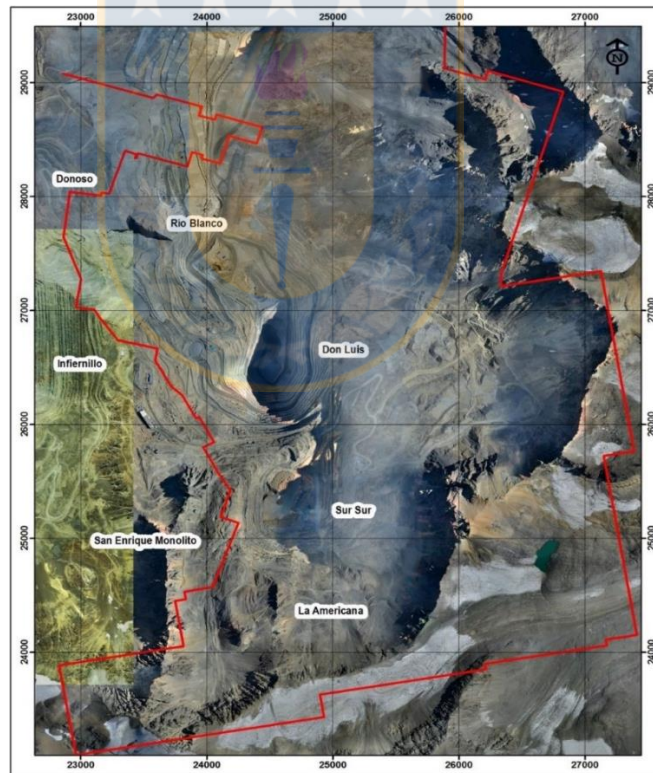


Figura N° 1 Vista Aérea de la distribución del yacimiento Rio-Blanco-Los Bronces, la línea roja delimita la zona propiedad de División Andina (Spiess, 2017)

1.- Sitio donde se encuentra naturalmente una roca o mineral

2.- Son esencialmente depósitos minerales de baja ley y alto tonelaje, se asocian frecuentemente con rocas ígneas intrusivas con fenocristales de feldespato en una masa fundamental de grano fino.

Las instalaciones de División Andina se ubican a 38 km de la ciudad de Los Andes, Región de Valparaíso, aproximadamente a 50 km de la ciudad de Santiago entre los 3700-4200 m.s.n.m (Figura N°2).



Figura N° 2 Ubicación geográfica de la zona de operación de División Andina, específicamente el yacimiento Río Blanco (Spiess, 2017).

2.3 Descripción de la Planta

División Andina cuenta con una variedad amplia de procesos para cumplir su objetivo, los cuales comienzan con etapas de prechancado y chancado, transporte de mineral, molienda convencional y semi-autógena, flotación colectiva y selectiva, espesamiento para finalizar con filtrado y secado. Posterior a todo este proceso, el producto es transportado vía tren al puerto Ventanas donde es despachado o bien alimentado a la fundición Ventanas. Un diagrama de flujos de todo el proceso global se encuentra dispuesto en la Figura N°3.

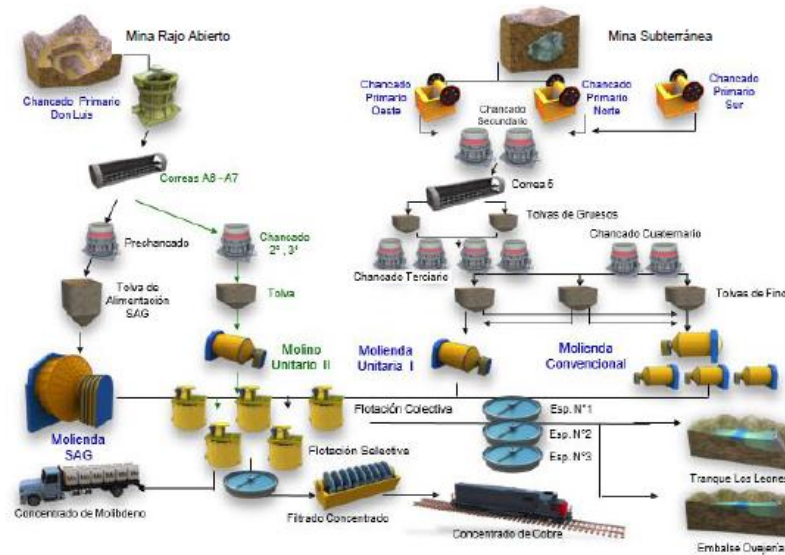


Figura N° 3 Diagrama de flujos planta concentradora División Andina (Seco, 2014).

En las siguientes secciones se describen las etapas de molienda-flotación y los equipos que componen cada una de estas junto a la configuración que poseen.

I. Molienda convencional

Etapa alimentada mediante tolvas, compuesto por 3 molinos de barra (16 pies largo y 11.5 pies diámetro) con una potencia de 1000 HP, cada uno además cuenta con tres molinos de bolas (16 pies largo y 13 pies diámetro), excepto sección C que cuenta con 4, cuya etapa de clasificación cuenta de 9 baterías de hidrociclones, cada una compuesta por 6 ciclones (Figura N°4).

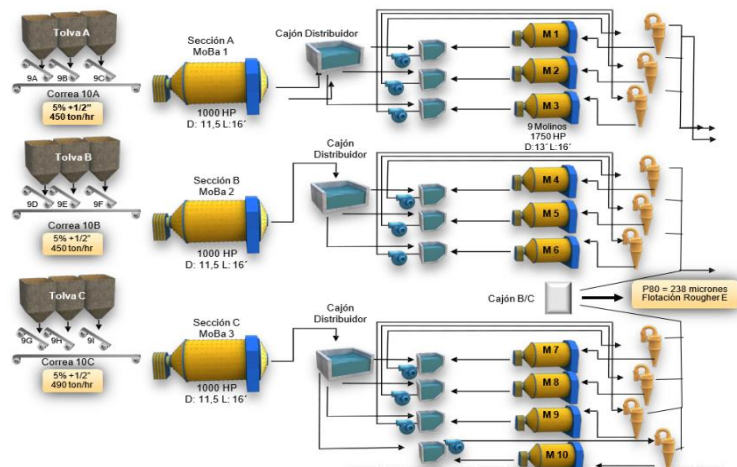


Figura N° 4 Diagrama de flujos molienda convencional (Candia, 2016).

II. Molienda unitaria I y II

La molienda unitaria I consta de un molino de bolas (24 pies largo y 16 pies diámetro) con una potencia de 3800 HP, el cual es alimentado mediante tolvas y correas, además una etapa de clasificación que consta de una batería de hidrociclones compuesta por 10 hidrociclones CAVEX 400 (Figura N°5).

Por otro lado, la molienda unitaria II consta de un molino de bolas (37.5 pies largo y 25 pies diámetro) con una potencia de 17500 HP, cuya etapa de clasificación consta de una batería de hidrociclones compuesta por 13 hidrociclones CAVEX CVX (Figura N°6).

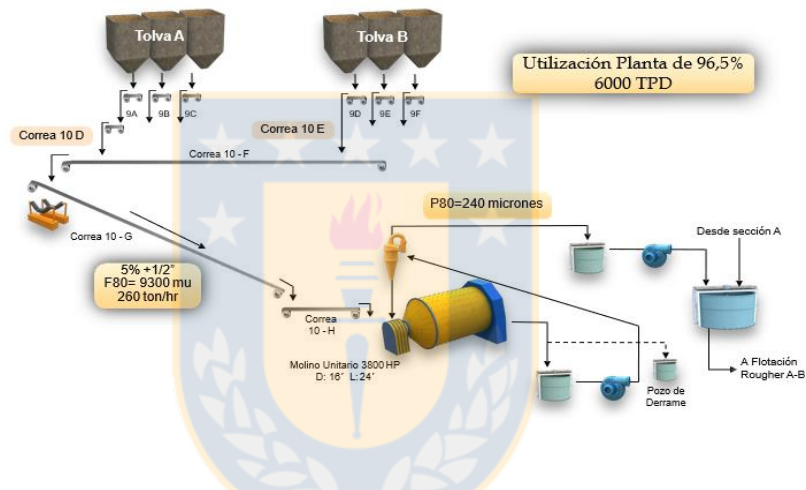


Figura N° 5 Diagrama de flujos molienda unitaria I (Candia, 2016).

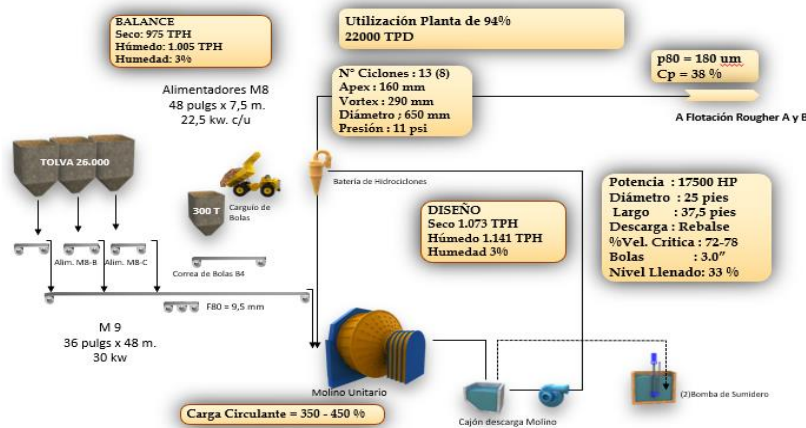


Figura N° 6 Diagrama de flujos molienda unitaria II (Candia, 2016).

III. Molienda SAG

Esta cuenta con un molino SAG (16.9 pies largo y 36 pies diámetro), con 16000 HP de potencia, seguido de dos molinos de bolas (30 pies largo y 20 pies diámetro) con 7500 HP de potencia, adicionalmente 2 chancadores de pebbles de 7 pies de diámetro, además cuenta con una sección de clasificación compuesta por 4 baterías de hidrociclones, donde cada una se compone por 6 y 10 hidrociclones respectivamente, tipo CAVEX 800 CVX y KREBS DS 26 (Figura N°7).

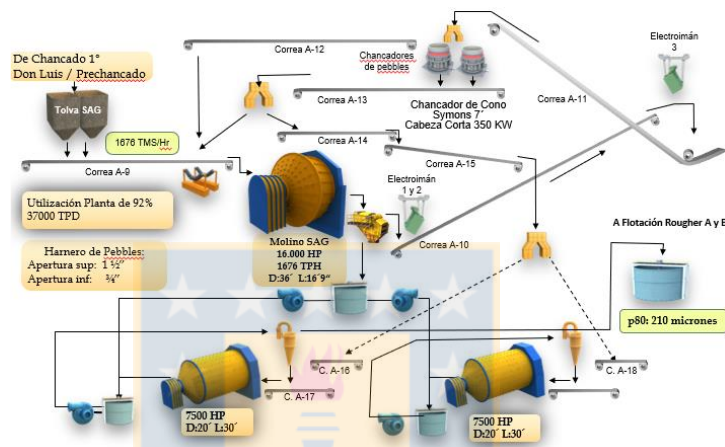


Figura N° 7 Diagrama de flujos molienda SAG (Candia, 2016).

Todo lo descrito anteriormente se desarrolla de forma paralela, donde la sección molienda unitaria II y SAG es alimentada con mineral proveniente del rajo, mientras que el resto procesa mineral proveniente de la mina subterránea.

IV. Flotación

Etapa está compuesta por tres líneas de flotación

- Sección A-B

Cada una compuesta por dos líneas de flotación, con 8 celdas tipo OK de 100 m³ en arreglo 2x3x3.

- Sección E

Compuesta por dos líneas de flotación, cada una con 4 celdas tipo OK de 100 m³ en arreglo 2x3x3.

El concentrado pasa directamente a la etapa de remolienda compuesta por dos molinos Vertimill junto a su respectiva batería de hidrociclones compuesta de 9 hidrociclones CAVEX 500CVX, posteriormente ingresa a una etapa cleaner compuesta por 4 columnas (2 de 13.4 metros de alto y dos de 13 metros de alto con 13 y 16 m² respectivamente) donde el concentrado pasa a etapa de recuperación de agua para ser enviado a la flotación selectiva (Figura N°8).

Las colas de flotación cleaner ingresan a la sección scavenger, la cual consta de 2 líneas de flotación con 16 celdas OK de 38 m³ con arreglo 2x2x3x2x3x4, cuyas colas constituyen parte del flujo de cola total, el cual ingresa a etapa de recuperación de agua para ser transportado al tranque de relaves (Figura N°8).

La distribución de alimentación a flotación rougher está distribuida como sigue:

Rougher sección A

- Molienda SAG
- Molienda unitaria II

Rougher sección B

- Molienda unitaria I
- Molienda convencional sección A

Rougher sección E

- Molienda convencional sección B-C

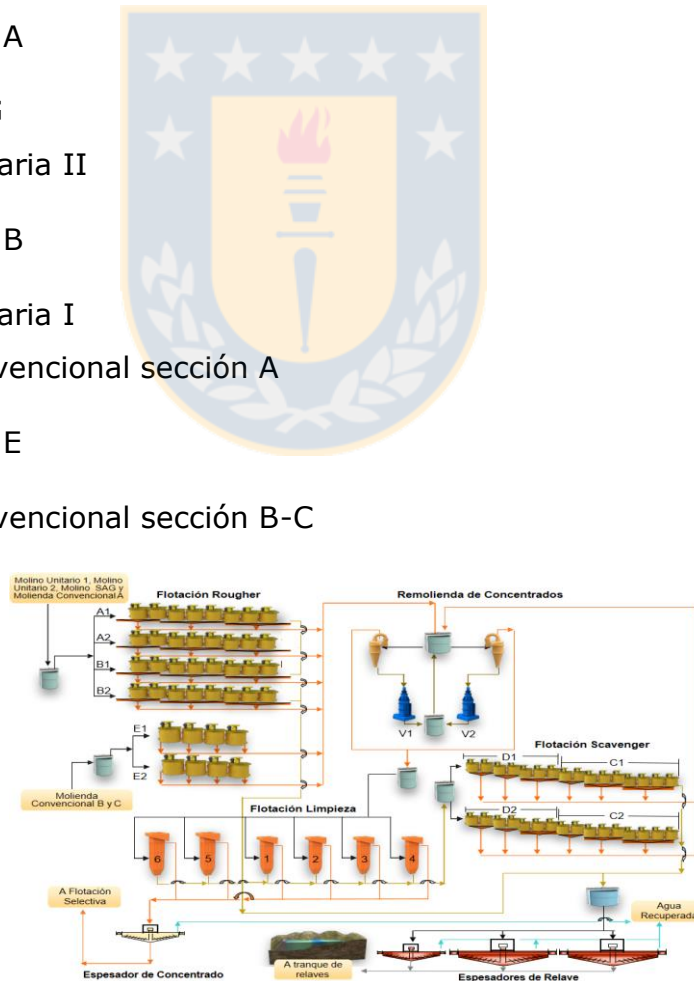


Figura N° 8 Diagrama de flujos flotación colectiva cobre-molibdeno DAND (Seco, 2014).

Donde la alimentación de la sección A-B en primer lugar ingresa a un cajón distribuidor centralizado que posteriormente reparte el flujo a la etapa de flotación, sin embargo, existe un control metalúrgico mensual, el cual se realiza con el fin de llevar un control de la mineralogía y ley de alimentación mediante análisis QEMSCAN, para esto se realiza un compósito mensual representativo de la alimentación mediante cortadores metalúrgicos automáticos los cuales realizan un corte de la muestra en forma diaria con una frecuencia de dos horas, estos cortadores se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

- Cortador Sección SAG

Este se encuentra en parte del cajón centralizado y reúne el producto de molienda de la sección SAG y unitaria II (Figuras N°9-10).



Figura N° 9 Cortador terciario sección SAG.



Figura N° 10 Cortador cuaternario sección SAG.

- Cortador convencional A

Este cortador se encuentra en el cajón centralizado y reúne el producto de molienda de las secciones molienda convencional sección A y molienda unitaria I (Figuras N°11-12).



Figura N° 11 Cortador terciario sección convencional A.



Figura N° 12 cortador cuaternario convencional A.

- Cortador Convencional E

Este cortador se encuentra en el cajón centralizado que alimenta a la sección rougher E y reúne el producto de molienda de las secciones convencional B-C.



Figura N° 13 Cortador primario convencional E.



Figura N° 14 Cortador terciario convencional E.

Cabe mencionar que los cortadores están distribuidos desde cortador primario hasta cuaternario, sin embargo, solo se posee acceso de manera segura a las zonas antes descritas. Cada cortador recibe el producto de alimentación descritos con anterioridad, por lo tanto, trabaja con las líneas mineral propuestas en el esquema de la Figura N°15.

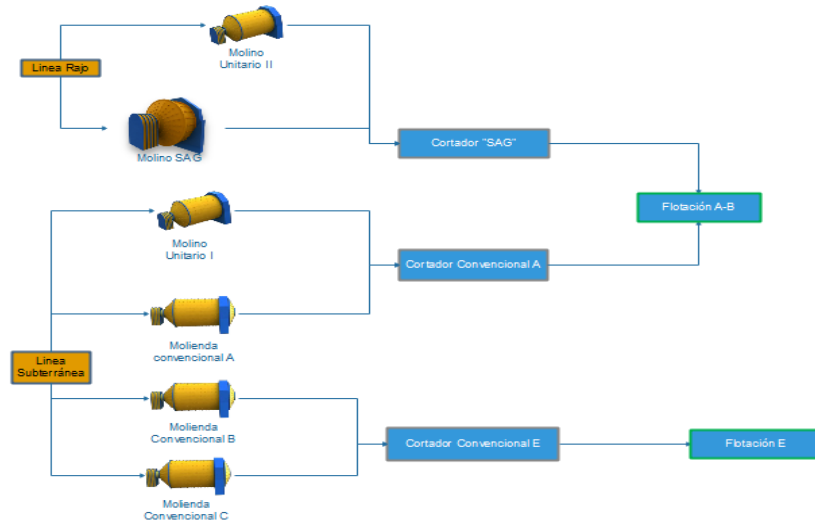


Figura N° 15 Esquema de distribuci3n alimentaci3n cortadores metalúrgicos y alimentaci3n secci3n de flotaci3n.

A continuaci3n, se realiza una descripci3n tanto de los equipos como la disposici3n de las plantas de preparaci3n de lechada de cal.

Para suplir la demanda de un insumo clave como la lechada de cal en el manejo de las condiciones operacionales de pH en el proceso de flotaci3n. DAND posee dos plantas de preparaci3n de lechada de cal y un sistema de adici3n de lechada al proceso.

I. Planta de cal N°1

Esta planta cuenta con dos apagadores de cal marca ZI portec, serie 800 modelo M-55, con agitador de paleta, revestimiento interno y chaqueta de agua, cada uno con 12 kW, con sistema de extracci3n de gases, adem3s el producto de ambos hidratadores ingresa a un separador de arenillas de 60 pulgadas de diámetro, con malla 16# Tyler de acero inoxidable. El sistema cuenta con un estanque intermedio de 10 m³ y 1.5 metros de diámetro junto con un agitador marca MIXTEC serie 100 modelo 1108 (Figura N°16).

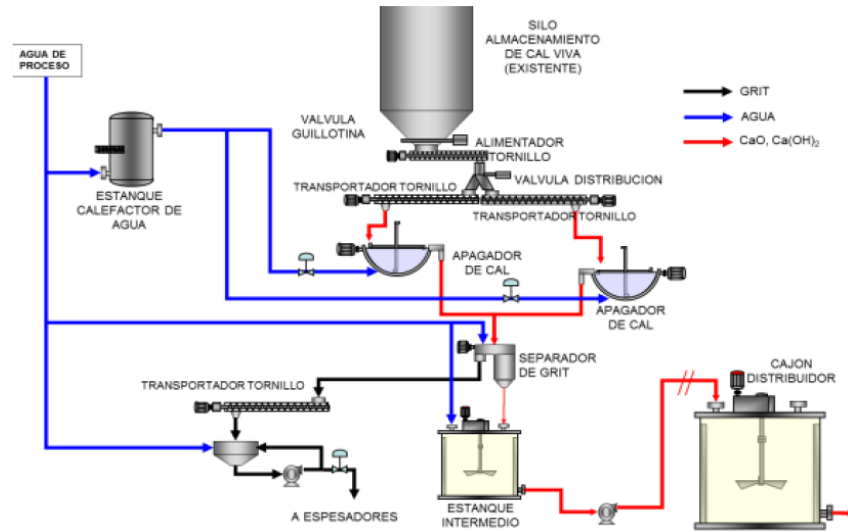


Figura N° 16 Diagrama de flujos planta de cal N°1 (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).

II. Planta de cal N°2

Esta planta consta de dos hidratadores de cal de 2.2 metros de altura y capacidad de 2.59 m^3 , cada uno con sistema propio de extracción de grit constituido por un tornillo sin fin marca SEW con potencia de 3.7 kW (Figura N°17), estos hidratadores son alimentados mediante tornillos transportadores de cal viva. La lechada de cal es separada por rebose y acción del sistema de extracción de grit, y transportada mediante bombas centrífugas al estanque de dilución y posteriormente al estanque de distribución. La Figura N°18 ofrece un diagrama de flujo de la planta de cal N°2, mientras que la Figura N°19 expone un corte transversal y la disposición de equipos.

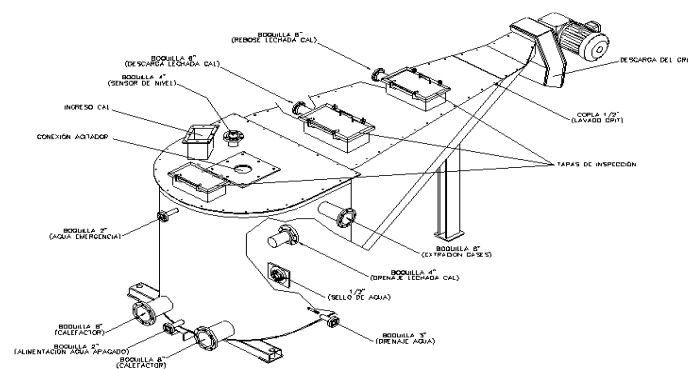


Figura N° 17 Descripción en detalle hidratador de cal planta de cal N°2, línea completa (Morales, 2003).

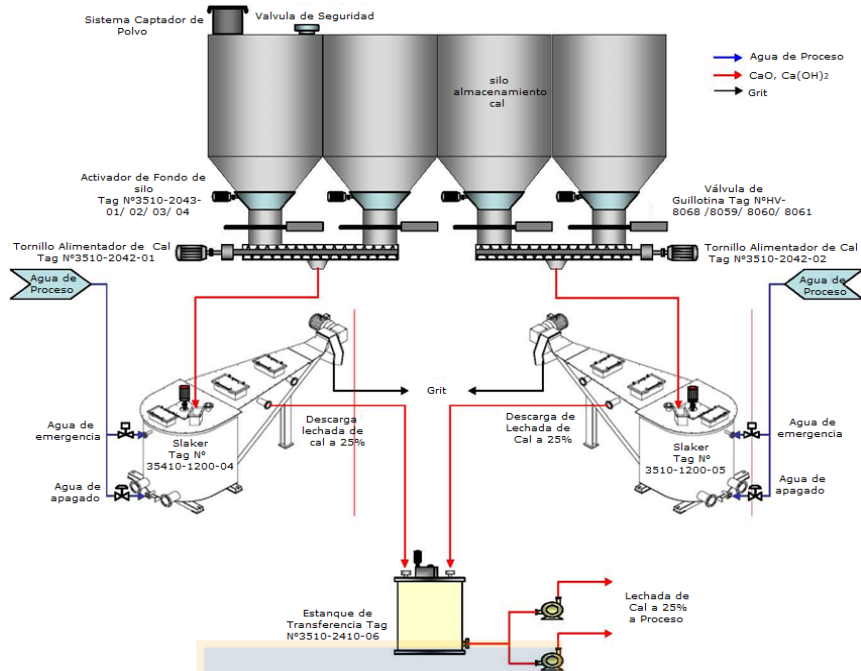


Figura N° 18 Diagrama de flujos planta de cal N°2 (Morales, 2003).

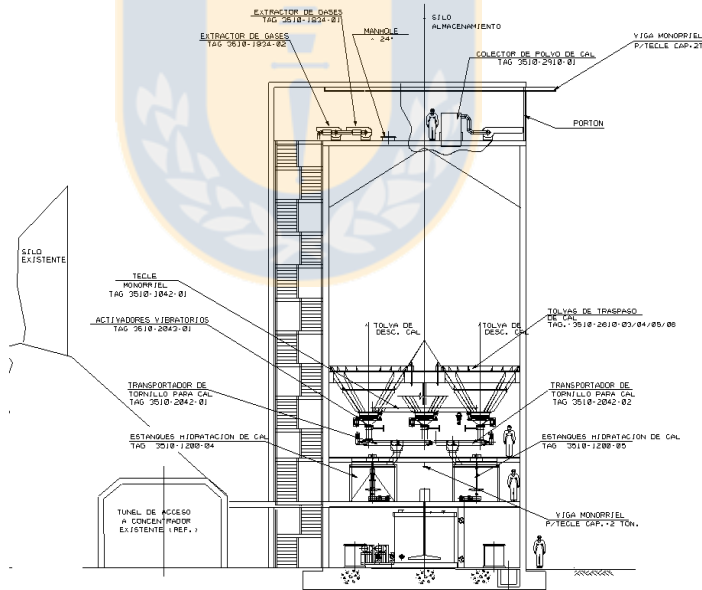


Figura N° 19 Corte transversal y distribución equipos planta de cal N°2 (Morales, 2003).

Estas plantas distribuyen su producto a los diferentes puntos de adición dispuesto a través de las líneas de flotación con el fin de controlar el pH del proceso, cuyos puntos son descritos a continuación.

El control de pH junto a la adición de cal en la molienda unitaria II y la molienda SAG, basa su funcionamiento en medición del pH en el cajón centralizado y lo compara con un set point preestablecido, donde la adición de lechada ocurre en la alimentación al molino SAG y en el underflow de la batería de hidrociclones (Figura N°20).

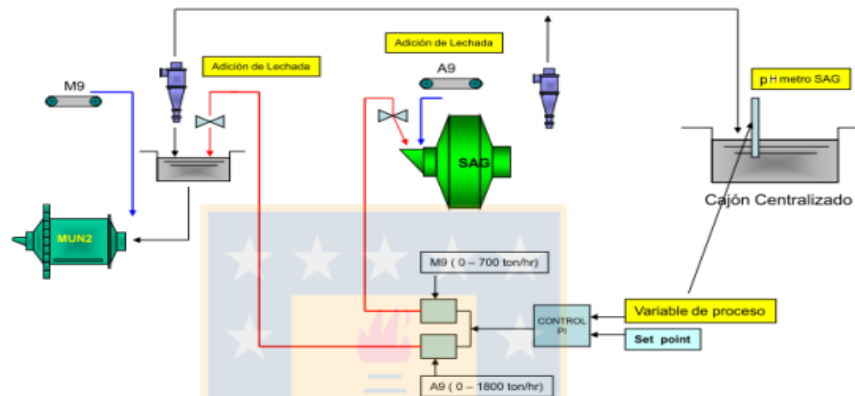


Figura N° 20 Esquema de adición y control de pH línea SAG y unitario II (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).

La molienda convencional, realiza mediciones en el cajón centralizado que recoge el overflow de las baterías de hidrociclones y la adición ocurre en la alimentación de los molinos de barra (Figura N°21).

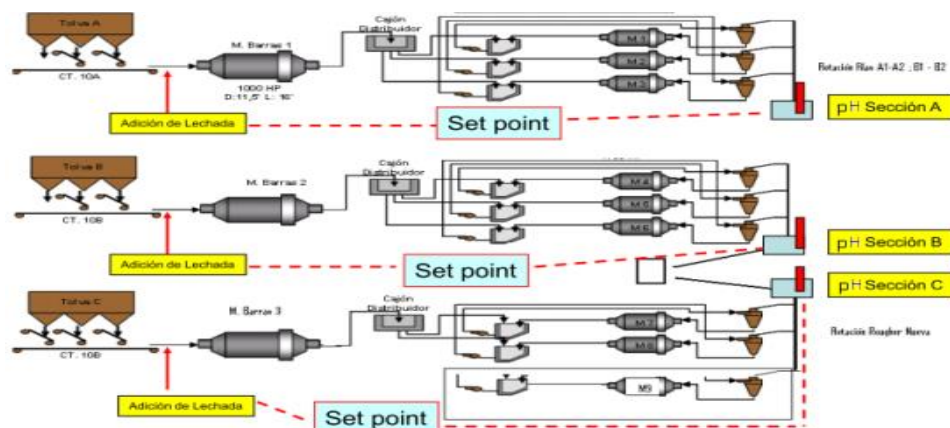


Figura N° 21 Esquema de adición de lechada y control de pH sección molienda convencional (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).

La molienda unitaria I, es similar a la molienda unitaria II, con adición en la alimentación al molino de bolas y medición en el cajón que reúne el overflow de la batería de hidrociclones (Figura N°22).

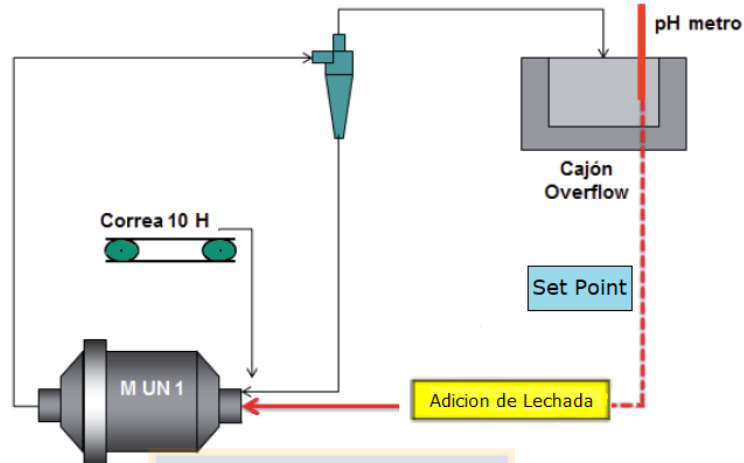


Figura N° 22 Esquema de adición de lechada y control de pH molienda unitaria I (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).

Adicionalmente, en la sección de flotación existen puntos de adición para además ajustar el pH en caso de desviación, estos se encuentran en los puntos de adición indicados en la Figura N°23.

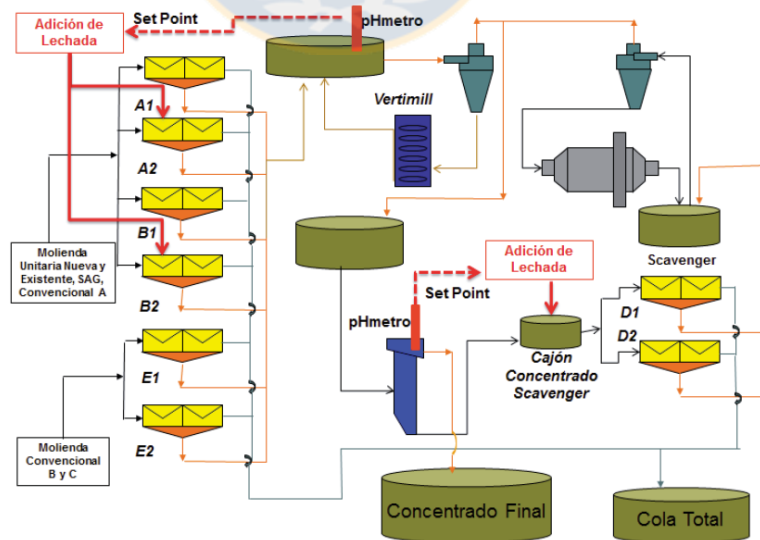


Figura N° 23 Esquema de adición de lechada y control de pH etapa de flotación colectiva (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).

3. ANTECEDENTES TEÓRICOS

3.1 Concepto de Flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico que consiste en adherir selectivamente burbujas de gas (aire, nitrógeno) a partículas minerales valiosas, las que son colectadas como un "concentrado" rico en el elemento de interés (ej, Cobre), la corriente de partículas no valiosas o ganga se denomina "cola" (relave) de flotación y tiene una baja concentración de elemento valioso.

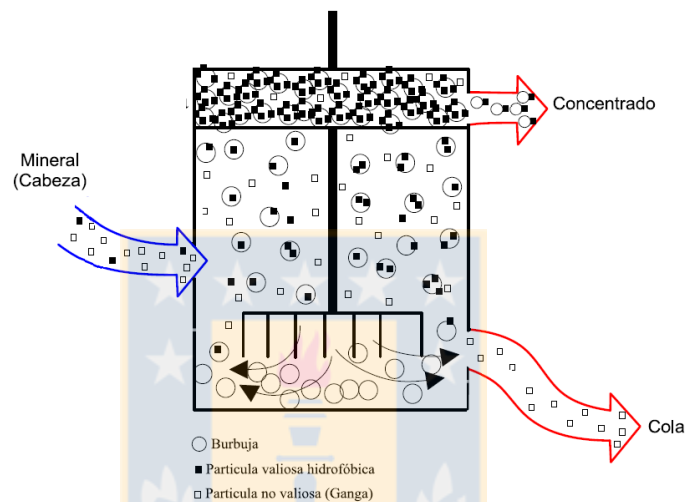


Figura N° 24 Esquema de procesos de flotación en máquina de flotación (Gutiérrez, 2015).

Conceptos claves en el proceso de flotación son los siguientes:

- **Hidrofobicidad:** propiedad de un material que impide la interacción de este con las moléculas de agua (no se moja), una partícula de un material hidrofóbico tiene más tendencia a adherirse a una burbuja de aire que a una gota de agua. Metales nativos, sulfuros de metales o especies como el grafito, carbón bituminoso u otros son poco mojables.
- **Hidrofilicidad:** propiedad de un material que otorga a este la capacidad de interactuar con el agua, este material tiene más tendencia a adherirse a una gota de agua que a una burbuja de aire. Minerales como óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos son fácilmente mojables.

La adhesión partícula valiosa-burbuja se produce como resultado de la hidrofobicidad (natural o inducida) de las partículas valiosas que se quieren separar de la ganga, por lo tanto, la hidrofobicidad es la fuerza impulsora de la flotación.

3.2 Reactivos de Flotación

Para cumplir los principios básicos de flotación y hacer eficiente el proceso, se usan reactivos químicos, los cuales reciben distintos tipos de clasificación en función del efecto que juegan estos en el proceso.

3.2.1 Colectores

Los colectores son compuestos químicos orgánicos heteropolares que permiten inducir hidrofobicidad en partículas de minerales en forma selectiva o incrementar la hidrofobicidad natural de estos. Poseen una estructura compuesta por una parte polar, la cual se adsorbe sobre la superficie hidrofílica del mineral, y otra parte no polar orientada hacia la fase acuosa induciendo propiedades hidrofóbicas al mineral. En general la hidrofobicidad del mineral está relacionada con el largo de la cadena de hidrocarburos del colector. Los colectores se pueden dividir en dos grupos principales; no ionizables (diesel, keroseno) y los ionizables, donde estos últimos se pueden subclasificar en función de su composición química.

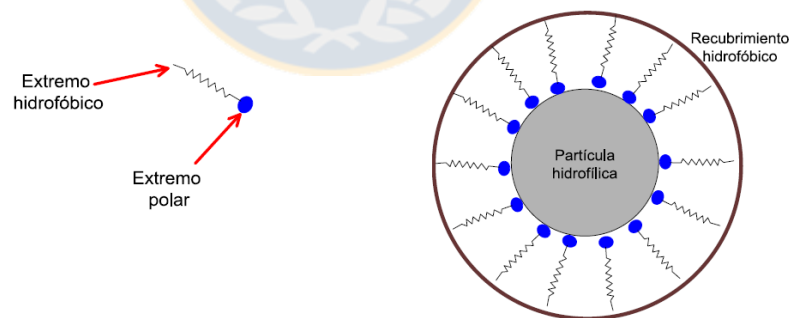


Figura N° 25 Esquema de adsorción de colector sobre partícula mineral (Gutiérrez, 2015).

3.2.2 Espumantes

Son agentes tensoactivos que se adicionan a la pulpa y cuyo objetivo es disminuir la tensión superficial del agua para formar y estabilizar la espuma, para la

adherencia y levantamiento de la partícula. Este reactivo permite que la burbuja mantenga su forma sin deshacerse por efecto de las presiones.

Aumentan el área de contacto burbuja-partícula, estabilizan la espuma y reducen el tiempo de inducción (adhesión partícula-burbuja), lo que permite la formación de burbujas de tamaño y calidad adecuada cuando se utiliza de forma correcta.

Poseen una estructura heteropolar, lo que les facilita la adsorción en la interfaz agua/gas, y cuya distribución se esquematiza en la Figura N°26:

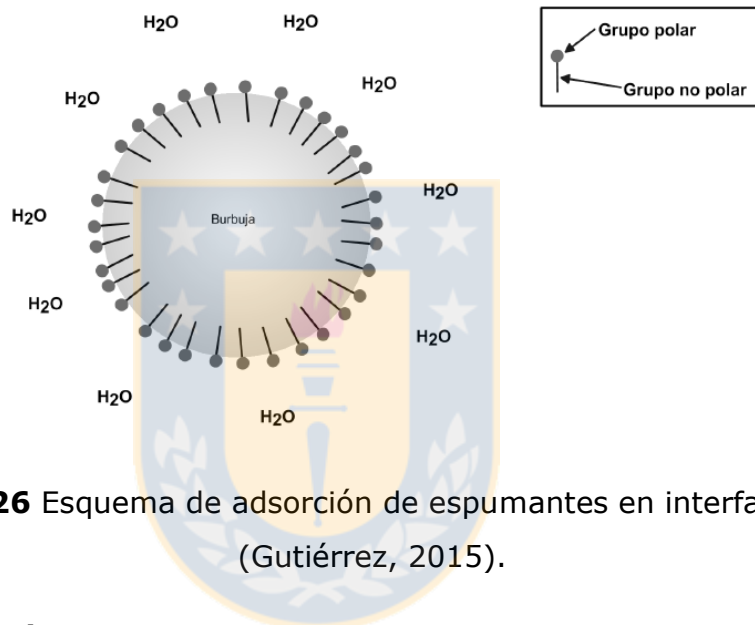


Figura N° 26 Esquema de adsorción de espumantes en interfaz agua/gas (Gutiérrez, 2015).

3.2.3 Modificadores

Son reactivos que permiten manejar las condiciones fisicoquímicas del sistema sólido-líquido-gas para mejorar la eficiencia del proceso, se utilizan para crear condiciones favorables en la superficie de los minerales, principalmente para el funcionamiento selectivo de los colectores, dentro de esta clasificación se encuentran:

Activadores: Son reactivos que facilitan la adsorción de colectores sobre la superficie de los minerales, estos reactivos forman condiciones favorables para que los colectores actúen sobre la superficie de un mineral, por ejemplo, surfactantes catiónicos, cationes y aniones polivalentes.

Dispersantes: Facilitan la dispersión de ciertas partículas que la pulpa contiene en suspensión o sobre la superficie de las partículas y que producen problemas como

saturación de burbujas entre otros. Existen tanto del tipo orgánico como del tipo inorgánico.

Depresantes: Son reactivos tanto orgánicos como inorgánicos que cumplen la función de disminuir la flotabilidad de un mineral, haciendo que la superficie de esta sea más hidrofílica, iones polivalentes, silicatos y cianuros cumplen esta función, como también polisacáridos o ácidos húmicos.

Reguladores de pH: Son reactivos que controlan la acidez o alcalinidad de la pulpa, lo que permite generar las condiciones óptimas para la interacción de los reactivos con la pulpa y permite trabajar en condiciones que resulten óptimas para el proceso.

Inserto en los reguladores de pH, DAND hace uso de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2). Este insumo es utilizado a la forma de lechada de cal, el cual consiste en Ca(OH)_2 junto con agua en exceso, para formar una pulpa al 16-18% aproximadamente, la cual es transportada mediante cañerías a los puntos de adición antes expuestos en la Sección 2.3. Este reactivo en particular es ampliamente utilizado en el proceso de flotación de cobre a nivel nacional, pues además de regular la alcalinidad del proceso, posee un costo relativamente bajo en comparación a otros reactivos como el (Na(OH)_2) y adicionalmente juega un papel depresor de pirita ya que los iones calcio se adsorben selectivamente en la superficie de la pirita, formando precipitados hidrofílicos que inhiben la flotabilidad de esta y disminuyen la adsorción de colectores evitando la formación de dixantógeno en su superficie (Figura N°27-28).

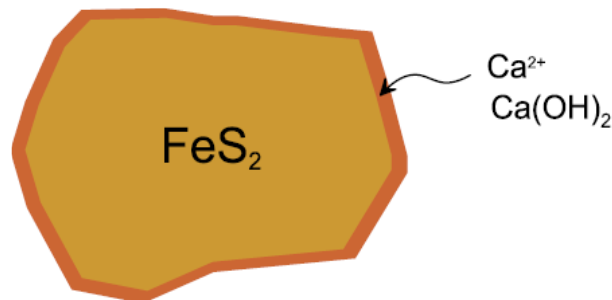


Figura N° 27 Esquema de formación de especies hidrofílicas sobre la superficie de la pirita (Gutiérrez, 2015).

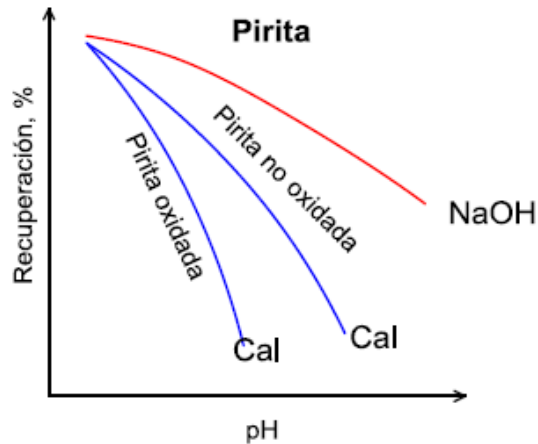


Figura N° 28 Recuperación de pirita en función del pH con distinto modificador de pH (Gutiérrez, 2015).

Existen múltiples factores que afectan tanto la preparación del hidróxido de calcio, como la efectividad de utilización en torno al objetivo específico que cumple el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el procesamiento de minerales de cobre, entre los cuales se documentan tantos factores mineralógicos que participan de procesos de adsorción de iones de forma selectiva, formación de precipitados, hasta la utilización de soluciones electrolíticas concentradas que generan variados resultados.

3.3 Factores mineralógicos

Ya que el objetivo de utilizar cal es modificar el pH, en donde una parte se utiliza para neutralizar los componentes ácidos de la ganga (Coloma, 2008), otra para precipitar algunos iones en la pulpa y finalmente la modificación del pH. Además de proporcionar un efecto depresor de pirita, existe la posibilidad que se lleven a cabo interacciones de otro tipo como adsorción superficial por un efecto de potencial, entre otros efectos cuyos resultados están asociados a la mineralogía de interacción.

3.3.1 Dolomita

Estudios del efecto de la disolución de dolomita (Chen et al, 2004) en la química de soluciones muestran que, bajo agitación constante de una muestra de dolomita en agua destilada, existe una disolución de estos elementos, en particular magnesita y dolomita, los cuales incrementan el pH de la solución para hacerlo más básico (Figura N°29), lo que en conjunto con el proceso de molienda incluido

en el procesamiento de minerales hace plausible este comportamiento y genere pulpas de carácter más básico.

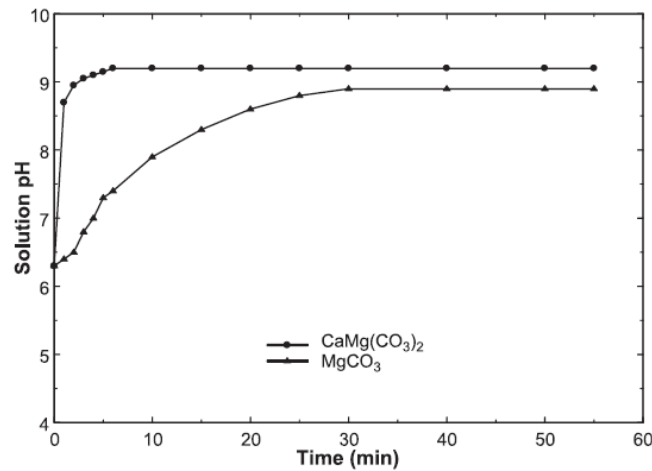


Figura N° 29 pH de la solución en función del tiempo de agitado (Chen, 2004).

3.3.2 Turmalina

Se ha estudiado (Jiang and Sun, 2006; Zhang and Wu, 2013) la capacidad que poseen los polvos de turmalina de adsorber iones desde soluciones acuosas, en particular iones divalentes, atribuido principalmente al comportamiento del potencial Z de los polvos de turmalina.

3.3.3 Cuarzo

Se ha estudiado la interacción entre el cuarzo e iones calcio y su capacidad de adsorción de estos en la superficie del cuarzo (Ahmed and Van Cleave, 1965; Ananthapadmanabhan and P. Somasundaran, 1985), se plantea que existen mecanismos de adsorción de estos iones en la superficie de este mineral en particular y no solo de ion calcio, sino que además de productos de hidrólisis como $\text{Ca}(\text{OH})^+$ en un rango de pH entre 4 y 12 (Figuras N°30-31).

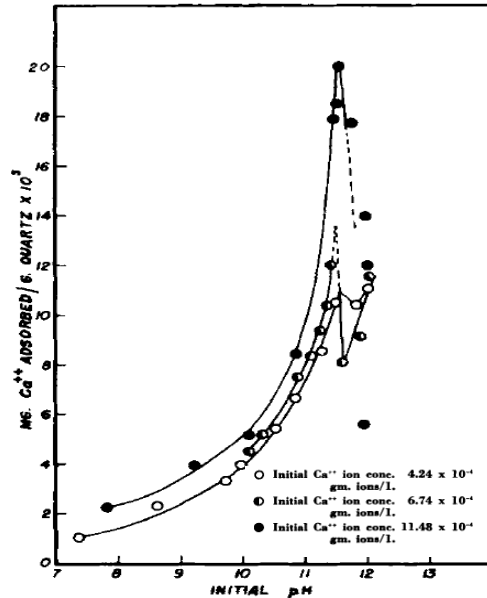


Figura N° 30 Variación en la cantidad de calcio adsorbido en cuarzo (Ahmed and Van Cleave, 1965).

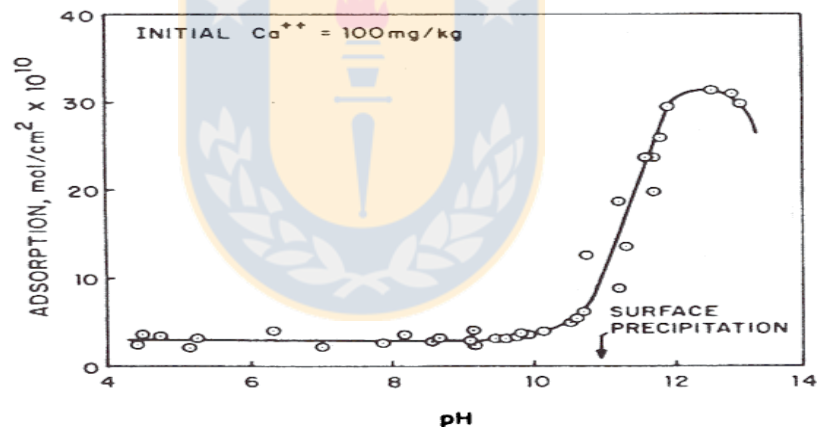


Figura N° 31 Dependencia del pH en la adsorción de calcio en cuarzo, $K_{ps}(Ca(OH)_2) = 10^{-5.2}$. pH de la superficie de precipitación para diferentes valores supuestos de grosor de la capa de adsorción (δ): δ (35 Å): $pH = 11.4$, δ (10 Å): $pH = 11.5$, δ (4 Å): $pH = 10.96$ (Clark and Cooke, 1968)

3.3.4 Molibdenita

Este mineral en específico constituye un foco importante en el procesamiento de minerales de cobre, ya que comúnmente constituye un subproducto bastante atractivo. Según estudios para la molibdenita (Lenkovskaya and Stepanov, 1968; Hoover, 1980), se ha encontrado que interactúa no solo con iones Ca^{2+} sino que

además con productos de la disociación de la lechada de cal como $\text{Ca}(\text{OH})^+$ sobre todo en el rango de pH alcalino ($\text{pH} > 8$), atribuido principalmente a que las especies cálcicas son adsorbidas en la cara superficial de carga negativa (Figura N°32). Adicionalmente ha sido reportado (Lopez-Valdivieso, 2012) que los planos basales son bastante heterogéneos y no son totalmente hidrofóbicos, donde iones Ca^{2+} o $\text{Ca}(\text{OH})^+$ pueden ser adsorbidos.

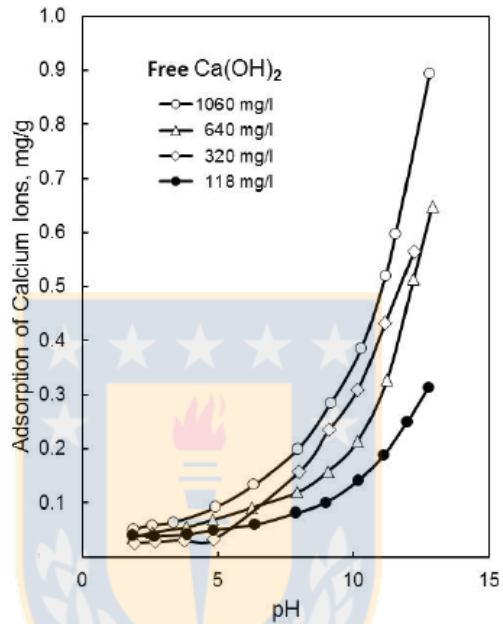


Figura N° 32 Adsorción de iones de calcio por método de trazado radioactivo en función de la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libre en la pulpa (mg/L) y el pH (ajustado con ácido sulfúrico e hidróxido de sodio) (Lenkovskaya and Stepanov, 1968; Hoover, 1980).

3.3.5 Jarosita

Existe también documentos (Baum, 2014) que afirman que existe una relación entre la presencia de ciertos minerales de ganga y variados resultados de la presencia de estos en el procesamiento de minerales, cuyos efectos y los minerales relacionados a estos efectos, se encuentran expuestos en la Tabla N°1, aquí en particular se encuentra la jarosita como consumidora de reactivos además de modificador de pH.

Tabla N° 1 Minerales de ganga y su efecto en el procesamiento de minerales
(Baum, 2014)

Efecto	Origen
Dureza y Abrasión	cuarzo, feldespato, turmalina, magnetita, granate
Sliming	arcillas, mica, talco, sulfato, óxidos de hierro, hidróxidos, carbonatos
Flotación Natural	talco, pirofilita, serpentina, clorita, sericita
Fases solubles en agua	sulfatos de cobre, sales de sodio/potasio, óxidos de molibdeno, sulfatos de calcio/aluminio/magnesio
Consumidores de Reactivos	arcillas, micas, carbonatos, zeolitas, óxidos de hierro, jarosita
Modificadores de pH	alunitas, jarosita, sulfatos de cobre/aluminio/magnesio, cloruros
Estabilizadores de Espuma	arcillas, sulfatos, sericita, talco, hornoblenda

3.3.6 Minerales de Hierro

Se ha estudiado el efecto de la presencia de iones Fe^{+3} (Hariani, Salni and Riyanti, 2017). En este estudio enfocado al tratamiento de los drenajes ácidos de mina, se estipula que estos iones reaccionan con los iones hidroxilo proporcionados por la disociación del $Ca(OH)_2$ para formar precipitados de $Fe(OH)_3$ debido a que estos poseen baja solubilidad ($K_{ps}(Fe(OH)_3) = 6.10^{-3.8}$) (Figura N° 33).

Más aún, según estudios realizados en torno a la disolución de los medios de molienda (Buckard, 2011) estipulan que existen mecanismos de disolución electroquímica (Figura N° 34) que produce la adición de iones Fe^{+2} en desmedro de los medios de molienda, lo cual hace posible que estas especies de hierro se sigan oxidando o reaccionen con los iones hidroxilo generando $Fe(OH)_2$ y $Fe(OH)_3$.

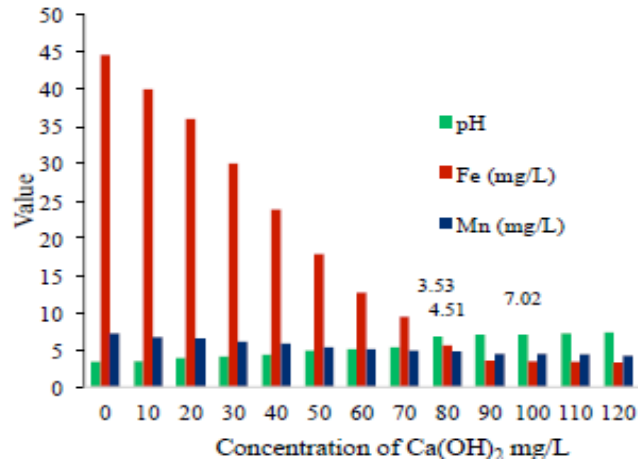


Figura N° 33 Combinación de CaCO_3 con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para el tratamiento de soluciones de drenajes ácidos de mina (Hariani, Salni and Riyanti, 2017)

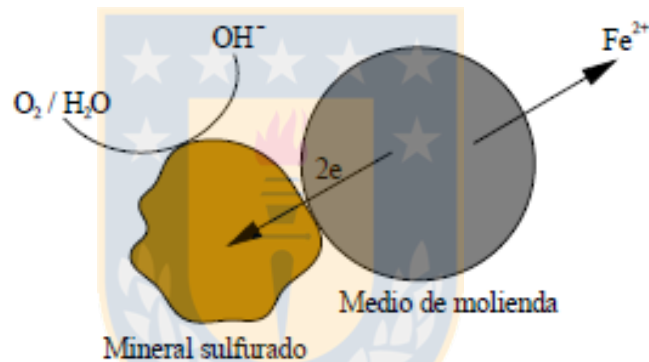


Figura N° 34 Esquema de reacción entre mineral sulfurado y medio de molienda (Buckard, 2011).

Por otro lado, estudios (White, 1994) sobre la disolución de magnetita e ilmenita en función del pH, existe una disolución de estos elementos, sin embargo, más asociados a un pH 4 o menor y además a las condiciones de potencial del sistema.

3.3.7 Caolinita

Se ha estudiado el comportamiento de la caolinita en ámbitos reológicos (Chemedá, 2015), encontrándose que es posible la adsorción en alguna de sus caras de productos de precipitación como $\text{Ca}(\text{OH})^+$ y otros precipitados a base de magnesio, más aun, estudios sobre la sílice (Ozkan, 2008) sugieren que especies como $\text{Ca}(\text{OH})^+$ y $\text{Mg}(\text{OH})^+$ se adsorben específicamente en las superficie de sílice cargadas negativamente en un rango de pH entre 9-11, eliminando las fuerzas de

repulsión, este comportamiento se espera también para el caso de la caolinita ya que se cree que una de las caras de la caolinita posee un comportamiento similar al de la sílice.

3.4 Factores cualitativos

Entre estos factores se encuentra el tipo de agua utilizada en el proceso, en donde se documentan muchos estudios (Laskowski and Castro,2013; Veki, 2013; Landero, 2010; Morales, 2017) de agua altamente iónica como el agua de mar, en donde se habla del efecto buffer por la presencia de iones como HCO_3^- el cual se debe al equilibrio entre el dióxido de carbono (CO_2), bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}), el cual en función de pH genera una distribución de especies como lo indica la Figura N°35, evitando que los iones OH^- cambien efectivamente el pH.

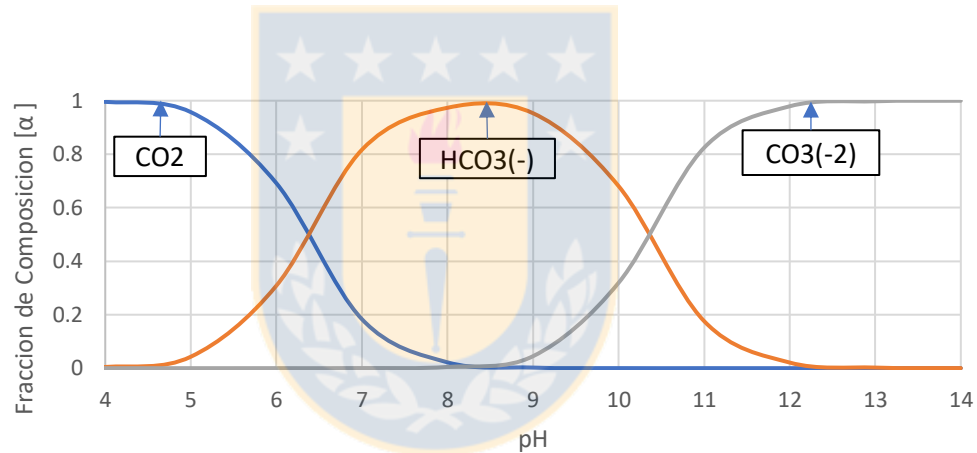
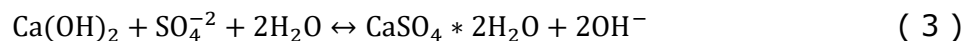
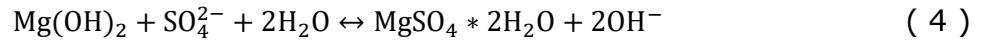


Figura N° 35 Distribución de especies carbonáceas en función del pH para el agua de mar, $K_{ps1} = 4.46 \cdot 10^{-7}$, $K_{ps2} = 4.69 \cdot 10^{-11}$, $P=1$ atm.

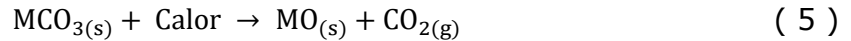
Además, exponen que la presencia de ciertos iones como magnesio, calcio o sulfatos también generan problemas relacionados al uso de cal, ya que generan precipitados en las condiciones de operación utilizadas en el procesamiento de minerales.



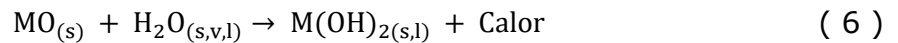


3.5 Cal

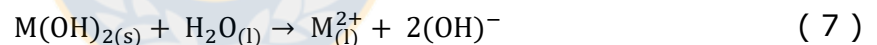
Químicamente la cal es un óxido de calcio, y recibe la denominación de "cal viva". La cal viva es un reactivo que se obtiene por descomposición, mediante calcinación, del carbonato contenido en las calizas, según la siguiente reacción global (Coloma, 2008):



Donde además si al óxido obtenido se le agrega agua, en cualquier estado, o se deja expuesto al medioambiente, ocurrirá la reacción 6:



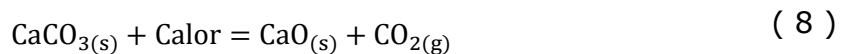
La cantidad de agua requerida por la reacción química anterior es la necesaria para obtener un polvo químico seco, en caso de agregar más agua de la necesaria, el producto obtenido recibe la denominación de lechada de cal, si se agrega más agua hasta lograr la total solubilidad del hidróxido metálico, es factible lograr la disociación del catión (M^{2+}) y los aniones (OH^-), siendo estos últimos los que permiten modificar la alcalinidad del sistema.



Donde:

M = calcio, magnesio

En particular la cal viva es producida bajo la reacción 8.



Sin embargo, el óxido de calcio es inestable en presencia de anhídrido carbónico (CO_2), razón por la cual el hidróxido de calcio representa la forma más estable de almacenamiento. La Figura N°36 ofrece un diagrama de flujo del proceso de fabricación de cal viva.

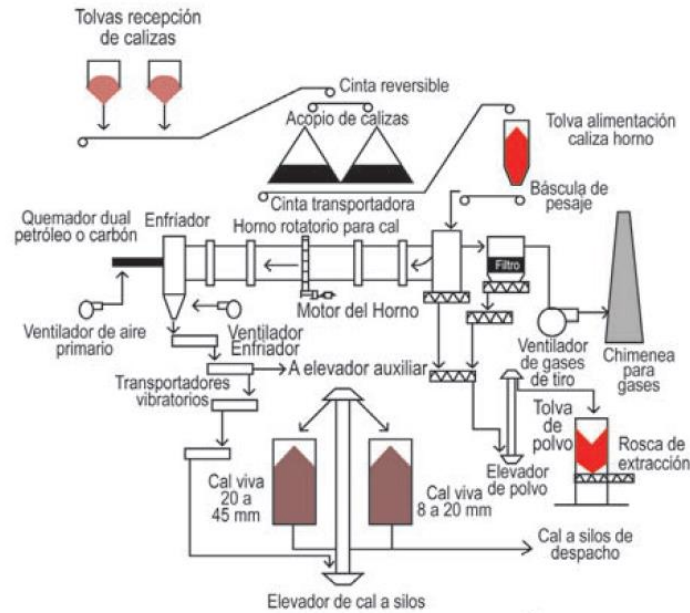


Figura N° 36 Diagrama de flujo de producción de cal viva (Coloma, 2008)

Las calizas son rocas sedimentarias en forma de calcita, magnesita o dolomita mineral, cuya descripción se encuentra disponible en la Tabla N°2.

Tabla N° 2 Mineral carbonáceo de alimentación al proceso de fabricación de cal viva (Coloma, 2008: La cal es un reactivo químico).

Nombre Mineralógico	Formula química	Peso molecular [g/mol]	Peso Específico [g/cm ³]	Dureza [escala Mohs]	Forma de los cristales
Dolomita	CaCO ₃ * MgCO ₃	184.4	2.84	3.5-4.0	Romboédrica
Aragonita	CaCO ₃	100.1	2.94	3.5-4.0	Ortorrómbica
Calcita	CaCO ₃	100.1	2.72	3	Romboédrica
Magnesita	MgCO ₃	84.3	3	3.5-4.5	Romboédrica

Por lo tanto, de acuerdo con el material carbonáceo utilizado para la fabricación, la cal viva recibe distintas denominaciones y posee distinta calidad, dentro de las cuales se encuentran:

3.5.1 Dolomita

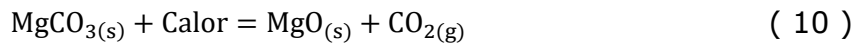
Este es el carbonato doble de calcio y magnesio, que al calcinarlo, produce los siguientes productos según la reacción 9:



Cuya cal recibe el nombre de cal viva dolomítica.

3.5.2 Magnesita

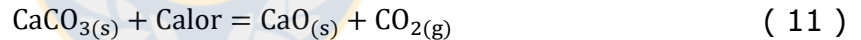
Este es el carbonato de magnesio que al calcinarlo se disocia en los siguientes productos según la reacción 10:



Cuya cal viva recibe el nombre de magnesiana, magnesia o periclusa.

3.5.3 Calcita

Este es el carbonato de calcio que al calcinarlo se descompone en óxido de calcio según la reacción 11:



Cuya cal viva recibe el nombre de cal viva calcítica y posee la mayor calidad, es la que actualmente alimenta la planta de preparación de lechada DAND.

El proceso de preparación de cal viva a partir del carbonato depende de múltiples factores, sin embargo, uno de los más importantes es el tamaño de partícula de la caliza, en la Figura N°37 se esquematiza el efecto del tamaño de partícula en el proceso de calcinación.

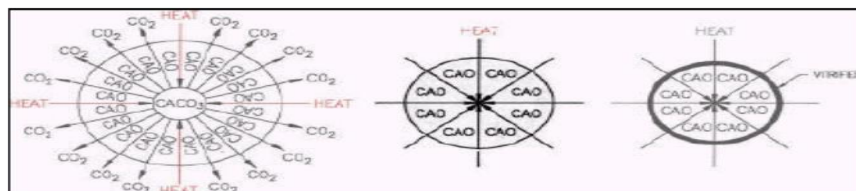
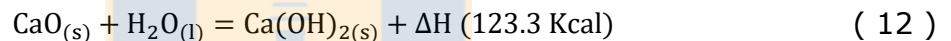


Figura N° 37 Efecto del tamaño de partícula en el proceso de fabricación de cal viva (Hassibi, 1999).

Una partícula grande en el que el calor no penetra completamente en la partícula quedando carbonato sin reaccionar, el centro de esta partícula se conoce como arenilla o rechazo, una partícula de medio tamaño en que el calor penetra en toda la partícula completando la conversión en su totalidad y finalmente una partícula pequeña en que el calor rápidamente penetra al corazón de la partícula, produciendo un sobrecalentamiento de la superficie de la partícula formando una capa dura no permitiendo la penetración del agua. Las partículas de tamaño grande y mediano son clasificadas como alta reactividad o "soft burned" mientras que a las partículas de pequeño tamaño como baja reactividad o "hard burned".

3.6 Hidratación o Apagado

La hidratación o apagado, se produce al poner en contacto la cal viva (CaO) junto con agua en exceso para la formación de hidróxido de calcio, liberación de calor al ambiente y además un rechazo debido a factores de preparación, según la reacción 12 (Hassibi, 1999):



Idealmente 1 kg de CaO junto a 0.32 kg de agua producen 1.32 kg de lechada de cal, esta es la cantidad mínima de agua para la reacción y produce un polvo seco, así el hidróxido de calcio contiene 75.7% de CaO y 24.3% de agua.

Sin embargo, cuando se utiliza un exceso de agua en la hidratación, el proceso se conoce como apagado, en este caso el producto resultante de la hidratación tiene la forma de una lechada. El proceso antes descrito ocurre en los reactores y estanques de apagado, los que sirven de almacenamiento y de traspaso a los sistemas de traspaso hidráulico de lechada que posee la planta. El proceso produce lechada de cal con una granulometría más fina que su predecesor la cal viva, esto ya que cuando la partícula de CaO es expuesta a la acción del agua, esta penetra por las grietas y llena las cavidades porosas del CaO, la hidratación se produce rápidamente, liberando una gran cantidad de energía. Este calor hace hervir el agua generando vapor, haciendo que las partículas revienten, exponiendo la superficie interna, este proceso continua hasta que la hidratación se completa.

La distribución de lechada a los distintos puntos de adición descritos en la sección 2.3 se realiza por medio de un “loop” de distribución, el cual consta de cañerías de retorno de lechada de cal a los estanques de almacenamiento interiores, como lo describe la Figura N°38.

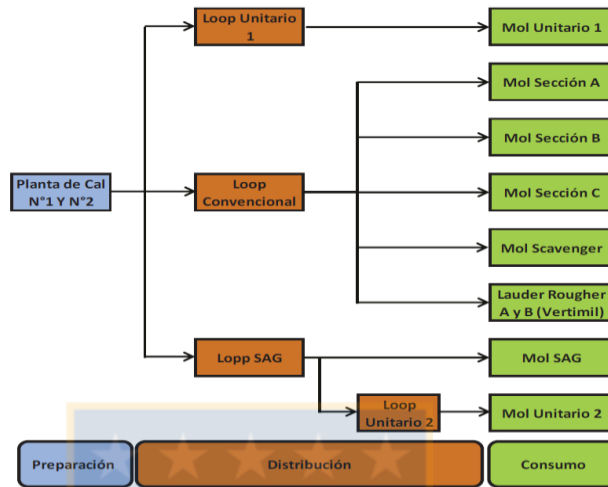


Figura N° 38 Esquema de adición de lechada de cal DAND (Hecker Electroquímica Industrial, 2012).

3.7 Caracterización Geológica División Andina

El yacimiento Rio Blanco tiene su origen en el emplazamiento de diversos pórfidos y brechas hidrotermales, en rocas de caja predominantemente intrusivas de composición granodiorítica y diorítica perteneciente a la unidad geológica de distribución distrital denominada Plutón Rio Blanco-San Francisco, con mineralización predominante de calcopirita y algo de bornita (MicGale, 2018).

3.7.1 Alteración y Mineralización

Respecto a los eventos de alteración y mineralización que afectaron a las rocas, son reconocidas como alteraciones de fondo una amplia biotización de las rocas relacionadas a vetillas y guías de biotita, una asociación biotita-clorita en sectores muy restringidos y externamente en los sondajes de borde, la asociación de clorita-epidota. Todas estas asociaciones de alteración preservan la textura original de la roca y acompañan las primeras manifestaciones de mineralización en las rocas de caja (granodioritas, andesitas). Por otra parte, se presentan asociaciones de

alteración destructivas de la textura de la roca, dentro de las cuales se puede señalar que las principales alteraciones tardimagmáticas comprenden el desarrollo de biotita, feldespatos potásicos y sericita, estrechamente ligada al emplazamiento de pórfidos, manifestada en halos de vetillas tempranas tipo A y EBT, recristalización de brechas preexistentes o invadiendo la textura primaria de la roca. La mineralización desarrollada en estas asociaciones corresponde a calcopirita y menores proporciones de bornita y molibdenita. Posterior a esta se manifiesta sobreimpuesta una asociación hidrotermal temprana, cuyo principal componente es el desarrollo de sericita gris verde, afectando clastos de brechas, y en forma masiva reemplazado a la mineralogía primaria de las rocas, principalmente desarrollada en brechas de turmalina y de polvo de roca y en la porción media de los pórfidos. A este evento se atribuye el desarrollo de especies mineralógicas de calcopirita-bornita y calcopirita-pirita respectivamente en granodioritas, pórfidos y brechas tempranas. Finalmente se reconoce un evento de alteración hidrotermal tardía con la presencia de cuarzo-sericita tardía manifestada principalmente en halos de vetillas tipo D y E, y obliterando selectivamente la textura de la roca, con desarrollo de pirita-calcopirita, pirita-sulfosales de cobre.

3.7.2 Descripción Geometalúrgica

La información más importante que debe obtenerse y tenerse dentro de una planta de tratamiento son las características del mineral de alimentación. En un yacimiento donde las características del mineral varían en función a la zona de explotación, es necesario tener identificados tales características en términos de localización, interpretación geológica, explotación, y desde el punto de vista metalúrgico, antes de su tratamiento en planta. Aquí entra en juego un nuevo concepto "Geometalurgia", el cual busca involucrar las características tanto geológicas como metalúrgicas del mineral, que tenga incidencia directa en su tratamiento en términos como recuperación, entre otros, por lo tanto, es una disciplina que integra a la geología y metalurgia, de esta forma se consigue planificar y dirigir más eficientemente la explotación minera y consecuentemente se maximiza el valor económico del negocio minero.

3.7.3 Modelo de Recuperación Geometalúrgico

DAND junto a su superintendencia de geología y haciendo uso de 4,137 pruebas de recuperación a muestras de sondajes tipo diamantino y de aire reverso, posee un modelo de recuperación que se basa en los controles geológicos expuestos en la Tabla N°3:

Tabla N° 3 Características geológicas que afectan directamente la recuperación rougher de cobre (MicGale, 2018: INFORME DE MODELO E INVENTARIO DE RECURSOS GEOLOGICOS).

N°	Características
1	Efectos de acción de agentes supérgenos
2	Oxidados de cobre
3	Mineralización secundaria
4	Limonita
5	Arcillas
6	Contenido de cobre en cabeza
7	Ocurrencia de mineralización

Desde aquí se definen 6 zonas que constituyen la base de las unidades geometalúrgicas de recuperación (Figura N°39):

- I. **UGM-1:** roca primaria, contiene a todas las unidades litológicas bajo el techo de sulfatos (superficie geotécnica primario-secundario), exceptuando a todos los pórfidos. En esta unidad se encuentran en forma dominante las ocurrencias de vetillas aisladas y enrejado de vetillas, cúmulos y sulfuros masivos en matriz de brechas. Esta unidad no presenta efecto de alteración supérgena. Presenta una recuperación promedio de 95%.
- II. **UGM-2:** Roca secundaria con bajo efecto de alteración supérgena con contenidos de limonitas <0.5 % del total de la roca. Presenta fracturas abiertas y abarca a todas las unidades litológicas sobre el techo de sulfatos y bajo la superficie de piso de limonitas y arcillas supérgenas, exceptuando el sector de rocas estériles. Presenta una recuperación promedio de 93%.
- III. **UGM-3:** Pórfidos en roca primaria, donde la ocurrencia principal es de sulfuros diseminados muy finos. Esta unidad, asociada a zonas de bajas

leyes de cobre, está debajo del techo de sulfatos y posee porcentajes de recuperación promedio de 94%.

- IV. **UGM-4:** Roca secundaria con mayor efecto de alteración supérgena. Presentan evidencias de escurrimiento frecuente de aguas de superficie, limonitas (jarosita-goethita-hematita) $\geq 0.5\%$ del total de la roca y eventualmente algún grado de enriquecimiento secundario. Su alteración principal es cuarzo-sericitica con sectores restringidos con alteración argilica-sericitica. Esta unidad presenta porcentajes de recuperación de orden de 91-92%.
- V. **UGM-5:** Incluye las unidades de roca chimeneas riolítica y chimenea dacítica, unidades estériles o de muy baja ley, si bien cuenta con un bajo número de ensayos, presenta una recuperación promedio de 88%.
- VI. **UGM-6:** Incluye material no consolidado denominado sobrecarga y que cubre la roca in-situ, corresponde a una unidad estéril o de muy baja ley y cuenta con un número bajo de ensayos. Presenta una recuperación promedio de 63%.

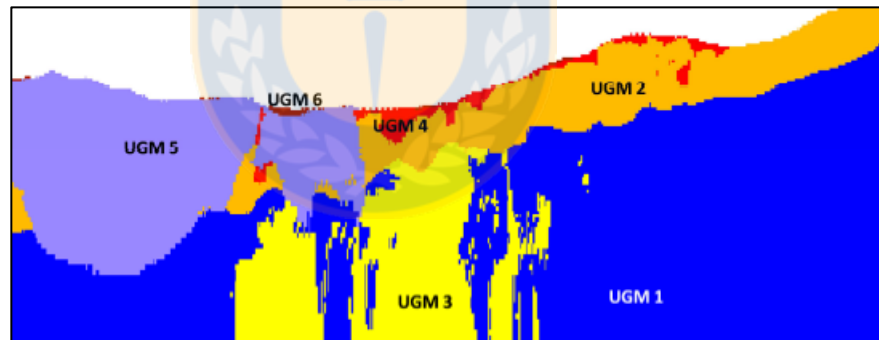


Figura N° 39 Sección longitudinal esquemática de definición de UGM para recuperación rougher de cobre (MicGale, 2018: INFORME DE MODELO E INVENTARIO DE RECURSOS GEOLOGICOS).

3.8 Herramientas matemáticas y estadísticas

3.8.1 Coeficiente de correlación

En el estudio descriptivo de sistemas multivariantes, la matriz de correlación es la representación matricial de los coeficientes de correlación (R) conjuntos de una variable i con otra variable j, por ejemplo, si se tienen n datos (Montgomery, 1996):

$$\begin{array}{cccc}
 & x_1 & x_2 & \dots & x_n \\
 x_1 & 1 & R_{12} & \dots & R_{1n} \\
 x_2 & R_{21} & 1 & \dots & R_{2n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 x_n & R_{n1} & R_{n2} & \dots & 1
 \end{array}$$

Si $|R_{ij}| = 1$, entonces decimos que la correlación entre la variable x_i y x_j es exacta, en cambio si $|R_{ij}| = 0$ decimos que las variables son completamente no correlacionadas, valores intermedios ($0 < |R_{ij}| < 1$, indican un grado de correlación que requerirá algún tipo de criterio para evaluar si es buena o mala correlación, más aún un valor cercano a -1, indica una relación exacta inversa, es decir si una variable aumenta la otra disminuye y viceversa, mientras que un valor cercano a +1 indica correlación positiva, es decir si una variable aumenta, la otra lo hace también y viceversa.

3.8.2 Análisis de la varianza ANOVA

Se utiliza para definir el efecto de uno o más factores sobre una variable dependiente y determinar si su interacción es relevante. Se basa en analizar las varianzas de las medidas de interacción entre los factores sobre sí mismos y pruebas de hipótesis

Para un Factor A:

$$H_0: \alpha_1 = \dots = \alpha_0 = 0 \text{ (el factor A no influye)}$$

$$H_1: \text{algún } \alpha_1 \neq 0 \text{ (el factor A influye)}$$

Para lo cual si el valor p es menor o igual a un nivel predeterminado de significancia (α), se rechaza la hipótesis nula y da crédito a la alterna.

3.8.3 Regresión lineal múltiple

Una variable dependiente o respuesta "y" puede estar relacionada con "k" variables independientes o regresores según:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$$

Donde:

β_j , para $j=1, 2, 3, \dots, k$ representan los coeficientes de regresión.

ϵ , es un término de error aleatorio.

Ahora bien, si existen k variables de regresión y n observaciones ($x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, y_i$, para $i=1, 2, \dots, n$), es un sistema de n ecuaciones que puede expresarse en notación matricial como (Goñi, 2012):



Donde:

$$\bar{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \bar{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$\bar{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \bar{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, luego se desea encontrar el vector de estimadores de acuerdo con el método de los mínimos cuadrados $\hat{\beta}$, que minimiza:

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \bar{\epsilon}' * \bar{\epsilon} = (\bar{y} - \bar{X} * \bar{\beta})' * (\bar{y} - \bar{X} * \bar{\beta})$$

Haciendo

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = 0$$

Se obtiene

$$(\bar{X}' * \bar{X}) * \hat{\beta} = (\bar{X}' * \bar{y})$$

Desde donde luego se obtiene la siguiente expresión:

$$\hat{\beta} = (\bar{X}' * \bar{X})^{-1} * (\bar{X}' * \bar{y})$$



4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el cumplimiento de los objetivos trazados durante el desarrollo de la presente memoria, se debe realizar un plan de trabajo que involucre la toma y preparación de muestras, donde la preparación consiste en etapas de reducción de tamaño, junto con homogeneización y partición de muestras, determinación de curvas cinéticas de molienda para obtener un tamaño determinado por DAND, seguido de pruebas de flotación escala laboratorio y pruebas de consumo de reactivos definidas según el laboratorio metalúrgico

4.1 Muestras y reactivos

4.1.1. Muestras para pruebas de flotación y consumo de reactivo en función de la calidad de agua

Las muestras utilizadas en este set de pruebas fueron obtenidas mediante un corte de correa representativo de cada línea de tratamiento, para el caso particular la línea mina rajo fue obtenida mediante la correa C-52 que alimenta la molienda SAG, mientras que la línea subterránea fue obtenida mediante la correa 10-B que alimenta la molienda convencional sección B. Se preparan mediante chancado a escala laboratorio con un tamaño objetivo 100% -12# ASTM, para luego llevar el producto a proceso de homogeneización y cuarteo mediante paleo manual alternado y fraccionado junto con mezclado en paño roleador adecuado, luego volver a homogeneizar la muestra con un cortador de chutes, lo que finalmente es llevado a una etapa de división mecánica mediante un cortador vibratorio para conformar muestras de 1180 g. Además, se envía una muestra representativa de todo el lote a análisis químico y análisis QEMSCAN, donde se incluye una medición del pH y potencial de pulpa asociado. Estos resultados se encuentran en las Tablas N°4-N°6 respectivamente.

Tabla N° 4 Caracterización química muestra mineral

Mineral	Cobre [%]	Molibdeno [%]	Hierro [%]	Arsénico [%]	Insoluble [%]	Cobre Soluble [%]
Rajo	0.74	0.020	3.7	0.006	80.1	< 0.01
Subterránea	0.74	0.023	3.8	0.009	76.7	0.03

Tabla N° 5 Caracterización QEMSCAN mineral pruebas de flotación y consumo de reactivo calidad de agua.

Especie	Línea Rajo	Línea Subterránea	Especie	Línea Rajo	Línea Subterránea
Calcopirita	2.093	2.067	Sericita-Moscovita	15.528	20.835
Bornita	0.006	0.017	Biotita	4.076	1.698
Covelina	0.002	0.003	Kaolinita	0.117	0.132
Calcosina	0.000	0.007	Montmorillonita	0.090	0.229
Tenantita	0.004	0.021	Otras Arcillas	0.006	0.004
Enargita	0.014	0.040	Cloritas	1.701	1.667
Tetrahedrita	0.000	0.000	Circón	0.027	0.062
Bournonita	0.000	0.000	Titanita/Esfeno	0.028	0.020
Seligmanita	0.000	0.000	Calcita	0.084	0.233
Pirita	2.030	2.426	Dolomita	0.211	0.412
Esfalerita	0.007	0.020	Siderita (Mn)	1.510	1.100
Arsenopirita	0.000	0.000	Yeso-Anhidrita	0.233	0.389
Molibdenita	0.026	0.023	Jarosita	0.000	0.006
Galena	0.000	0.014	Otros Sulfatos	0.004	0.106
Otros Sulfuros	0.001	0.001	Apatita	0.205	0.210
Cuarzo	35.604	41.195	Otros Fosfatos	0.004	0.002
Feldespato Potásico	15.935	10.696	Otros	0.001	0.003
Plagioclasa-Albita	17.291	12.576	Magnetita-Hematita-Goethita	1.561	1.598
Epidota-Zoisita	0.028	0.019	Goethita(Al)-Harrisonita	0.044	0.028
Turmalina	0.986	1.407	Rutilo	0.418	0.566
Anfíbola	0.027	0.040	Ilmenita	0.100	0.130

Tabla N° 6 Característica química mineral pruebas de flotación y consumo de reactivo.

Origen Mineral	pH Natural	Potencial de Pulpa Mineral[mV/AgCl]
Rajo	7.46	-31
Subterránea	7.32	-27.4

Por otro lado, el agua utilizada fue obtenida desde tres puntos diferentes, en primer lugar, agua fresca desde el laboratorio metalúrgico, agua recuperada desde el trómel de alimentación al molino unitario I y finalmente agua haulage, esta última muestra es obtenida desde canaleta refugio haulage el cual es el punto de recolección de agua de percolación proveniente de la mina subterránea, donde la Tabla N°7 muestra la composición química de las aguas antes mencionadas en función de los análisis químicos disponibles.

Tabla N° 7 Caracterización química agua

Tipo Agua	pH	Cu²⁺ [$\frac{mg}{L}$]	SO₄⁻² [$\frac{mg}{L}$]	Cl⁻ [$\frac{mg}{L}$]
Fresca	8.25	0.02	66	12
Recuperada	11.05	0.52	1622	75
Haulage	7.08	36.2	1807	30

La cal utilizada fue obtenida de muestra en planta, con una ley de alimentación de cal viva de 79%, ley de lechada de cal 61.1 % de CaO, lo que se traduce en una ley de Ca(OH)₂ de 80.74%.

Los reactivos utilizados para las pruebas de flotación fueron metil isobutil carbinol a una dosificación de 13 g/t, colector HOSTAFLOT X-23 con una concentración de 22 g/t y finalmente diesel con una concentración de 10 g/t, todo adicionado a temperatura ambiente, además cada una de las pruebas se realizó utilizando los distintos tipos de agua proporcionados, cuya agua fue adicionada desde el proceso de molienda hasta la flotación propiamente tal, además fue adicionada con una homogeneización adecuada para evitar la segregación, ya que se observó que posee bastante sólido en suspensión (Figuras N°40 y N°41).



Figura N° 40 Sólidos sedimentados muestra de agua haulage.



Figura N° 41 Sólidos sedimentados agua recuperada.

4.1.2. **Muestras para pruebas de calidad y cantidad de agua en la reactividad de cal y el consumo de lechada.**

Para las pruebas de reactividad de cal, se obtuvo muestra de cal viva procedente del silo que alimenta la planta de cal N°2, mediante un muestreo a los tornillos de alimentación de los hidratadores de cal, cuya caracterización física y química se expone en la Figura N°42 y Tabla N°8; además, el agua utilizada fue caracterizada químicamente para analizar la cantidad de ion SO_4^{-2} , cuyos resultados se encuentran en la Tabla N°9.

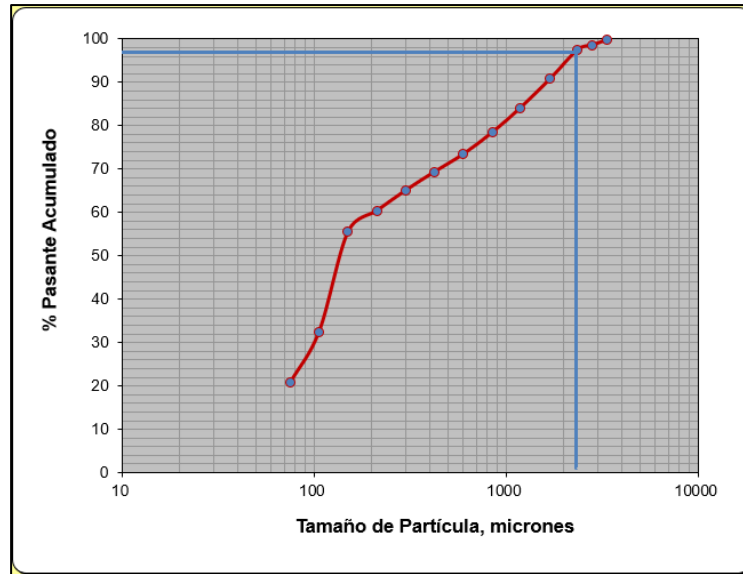


Figura N° 42 Perfil granulométrico cal viva pruebas de cantidad y calidad de agua.

Tabla N° 8 Resultados análisis químicos y físico cal viva pruebas calidad y cantidad de agua.

Característica	Valor
Ley CaO [%]	85.9
D97 [um]	2309
D50 [um]	140

Tabla N° 9 Caracterización química agua utilizada en pruebas calidad y cantidad de agua.

Tipo de Agua	SO_4^{-2} [$\frac{mg}{l}$]
Fresca	95
Recuperada	1587
Desmineralizada	0

Por otro lado, para las pruebas de flotación se utilizó un mineral de alta ley de hierro, proveniente de la correa A-3, la cual reporta a la tolva de alimentación molienda SAG, por lo tanto, es mineral proveniente del rajo. Estas muestras fueron llevadas a análisis químico y análisis QEMSCAN, cuyos resultados se encuentran en las Tablas N°10-11 respectivamente.

Tabla N° 10 Análisis químico muestra mineral para pruebas de calidad y cantidad de agua en reactividad y flotación.

Mineral	Cobre [%]	Molibdeno [%]	Hierro [%]	Arsénico [%]	Insoluble [%]
Rajo	0.8	0.009	5.1	0.003	76.9

Tabla N° 11 Caracterización QEMSCAN mineral pruebas de reactividad de cal y flotación, línea rajo, correa A-3

Especie	Cantidad [%]	Especie	Cantidad [%]
Calcopirita	2.458	Sericita-Moscovita	11.978
Bornita	0.008	Biotita	5.157
Covelina	0.000	Kaolinita	0.247
Calcosina	0.000	Montmorillonita	0.559
Tenantita	0.003	Otras Arcillas	0.019
Enargita	0.003	Cloritas	3.903
Tetrahedrita	0.000	Circón	0.062
Bournonita	0.000	Titanita/Esfeno	0.097
Seligmanita	0.000	Calcita	0.172
Pirita	2.896	Dolomita	0.031
Esfalerita	0.014	Siderita (Mn)	0.379
Arsenopirita	0.000	Yeso-Anhidrita	0.151
Molibdenita	0.006	Jarosita	0.001
Galena	0.009	Otros Sulfatos	0.002
Otros Sulfuros	0.012	Apatita	0.247
Cuarzo	30.005	Otros Fosfatos	0.002
Feldespatos Potásico	13.387	Otros	0.057
Plagioclasa-Albita	23.043	Magnetita-Hematita-Goethita	1.692
Epidota-Zoisita	0.149	Goethita(Al)-Harrisonita	0.008
Turmalina	2.571	Rutilo	0.617
Anfíbola	0.021	Ilmenita	0.035

Los reactivos utilizados para las pruebas de flotación posteriores a la reactividad de cal fueron metil isobutil carbinol a una dosificación de 13 g/t, colector

HOSTAFLOT X-23 con una concentración de 22 g/t y finalmente diesel con una concentración de 10 g/t, todo adicionado a temperatura ambiente.

4.2 Equipos y procedimientos

4.2.1 Pruebas de flotación y consumo de reactivo en función de la calidad de agua.

Para poder cuantificar el efecto de la calidad de agua en el consumo de cal y en los resultados metalúrgicos que estos reportan, se realizaron pruebas de flotación de tipo estándar según criterios laboratorio DAND, con agua recuperada, agua haulage y agua fresca para dos pH distintos (10.5 y 12.2) utilizando dos líneas minerales de trabajo (mina rajo y mina subterránea). Como etapa previa a la flotación es necesaria la determinación del tiempo de molienda óptimo para un tamaño determinado con cada línea mineral de trabajo.

En primer lugar, se realizaron 3 pruebas de molienda para cada línea mineral a trabajar, en la cual se testearon 3 tiempos de molienda (10, 12 y 14 min). La molienda consistió en utilizar una muestra de la línea mineral (1180 g), la cual debe poseer un tamaño 100% -12# ASTM, vaciar la masa de mineral seco al molino de bolas (Figura N°43) y agregar 590 cm³ de agua fresca, para obtener una pulpa con un 67% p/p de sólidos. Una vez cumplido el tiempo de molienda estipulado, realizar proceso de deslamado en malla 200# ASTM, filtrar y secar el producto +200#, para esto disponer la masa en bandeja y almacenar en horno de secado convectivo durante 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo de secado, llevar a análisis granulométrico por mallas (20#, 30#, 40#, 50#, 70#, 100#, 140#, 200#) en equipo Ro-Tap (Figura N°44) por 15 min, con los resultados obtenidos de las masas retenidas por malla, calcular el % retenido y el % pasante, con estos datos realizar interpolación para obtener el P80 de dicho tiempo de molienda. Este procedimiento repetirlo con los tres tiempos de molienda antes mencionados, y finalmente con los resultados obtenidos realizar interpolación semilogarítmica para determinar el tiempo de molienda necesario para un P80 objetivo con cada línea mineral. La Tabla N°12 muestra los tiempos de molienda y el tamaño objetivo requerido para las dos líneas minerales de trabajo.



Figura N° 43 Molino de bolas laboratorio metalúrgico DAND.



Figura N° 44 a)Mallas ASTM, b)Equipo Ro-Tap para realización de análisis granulométrico.

Tabla N° 12 Resultados tiempo de molienda requerido mineral línea rajo y línea subterránea.

Mineral	Tamaño Objetivo [um]	Tiempo de molienda [min]
Rajo	210	12.69
Subterránea	240	11.72

La prueba de flotación y consumo se compone en primer lugar de un proceso de molienda, el cual consiste en agregar una muestra de mineral de las líneas de trabajo a evaluar (1180 g) al molino, 590 cm³ de agua a evaluar según

corresponda, junto con 22 g/t de mezcla colectora y 10 g/t de Diesel por un tiempo de molienda determinado según la muestra a evaluar. Luego continua el proceso de flotación y consumo de reactivo propiamente tal, el cual se llevó a cabo en una celda tipo Denver con capacidad útil de 2300 cm³ con inyección forzada de aire a una tasa máxima de 20 L/min (Figura N°45). Para esto, una vez completado el proceso de molienda, se deposita el producto en la celda de flotación y se agrega el tipo de agua según sea el caso hasta completar el volumen útil (para obtener una pulpa al 38% sólidos), se ajusta el rotor a una velocidad de operación de 1500 RPM y se enciende, en este punto ajustar el pH de la pulpa a 10.5 ú 12.2 según sea el caso agregando cal apagada hasta obtener el pH deseado; una vez ajustado el pH, agregar 13 g/t de espumante MIBC y acondicionar por 3 min. Luego se abre la válvula de adición de aire a $\frac{3}{4}$ de su capacidad y se flota durante 4 min, para finalmente abrir la válvula totalmente y flotar por 3 min, durante todo el proceso se mantiene un paleteo continuo cada 10 segundos junto con adición de cal y agua para mantener tanto pH como nivel de celda.



Figura N° 45 Maquina de flotación escala laboratorio DAND.

Completado el proceso, el concentrado y cola se filtran y se ubican en el horno de secado convectivo a una temperatura de 100°C (con un máximo de 105°C). Una vez secas ambas muestras, se obtiene mediante homogeneización el peso total de ambas muestras y además una muestra suficiente para análisis químico, donde la recuperación de los elementos se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\% R_{\text{Elemento}} = \frac{m_{\text{Elemento conc}}}{m_{\text{Elemento alimentación}}} * 100 \quad (13)$$

Las condiciones de cada prueba realizada se encuentran descritas en la Tabla N°13, donde cada prueba descrita se realizó por duplicado.

Tabla N° 13 Distribución de condiciones pruebas de flotación y consumo de reactivo en función de la calidad de agua.

N° Prueba	Mineral	Agua Molienda	Agua Flotación	pH
1	Rajo	Recuperada	Recuperada	10.5
2	Rajo	Fresca	Fresca	10.5
3	Rajo	Haulage	Haulage	10.5
4	Rajo	Recuperada	Recuperada	12.2
5	Rajo	Fresca	Fresca	12.2
6	Rajo	Haulage	Haulage	12.2
7	Subterránea	Recuperada	Recuperada	10.5
8	Subterránea	Fresca	Fresca	10.5
9	Subterránea	Haulage	Haulage	10.5
10	Subterránea	Recuperada	Recuperada	12.2
11	Subterránea	Fresca	Fresca	12.2
12	Subterránea	Haulage	Haulage	12.2

4.2.2 Prueba de reactividad de cal en función de la calidad y cantidad de agua

Para la realización de estas pruebas, en primer lugar, se determinó la muestra de cal viva a utilizar, la cual se caracterizó físicamente mediante análisis granulométrico por mallas (20#, 30#, 40#, 50#, 70#, 100#, 140#, 200#) en equipo Ro-Tap por 15 min, cuyo fin es determinar el perfil granulométrico para comprobar que constituía una muestra representativa de cal. Una vez comprobado, se obtuvieron incrementos de 100 g de cal viva, las que constituyeron las muestras a utilizar en las pruebas de reactividad de cal, según norma internacional ASTM C110-16 "Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone".

Las pruebas constan de 3 subclases en total, constituidas por reactividad de cal, análisis granulométrico de la lechada producida y finalmente flotación estándar a escala laboratorio utilizando la lechada caracterizada.

Para la prueba de reactividad de cal, se dispone de un reactor aislado térmicamente junto con un sensor de temperatura además de un sistema de agitación mecánica (Figura N°46). Al reactor se agrega la muestra de agua según corresponda e inmediatamente los 100 g de cal viva (manteniendo la agitación automática en 400 RPM), inmediatamente se aísla completamente y se registra la temperatura que alcanza en intervalos de tiempo definidos (0.5 min, después desde el minuto 1 en intervalos de 1 minuto hasta observar una variación de 0.5°C en tres valores consecutivos).

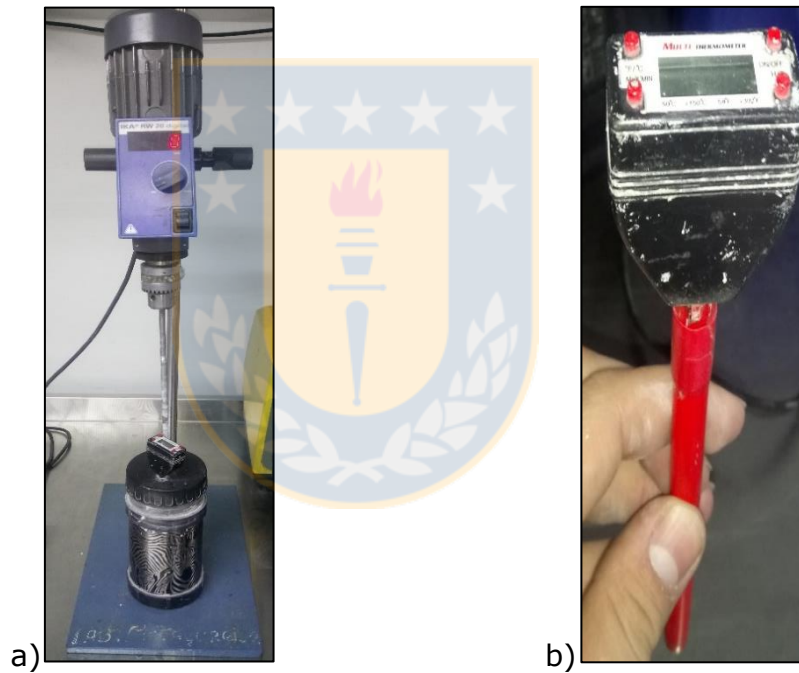


Figura N° 46 a) Equipo completo de hidratación de cal; b) Sensor de temperatura utilizado.

Completado el punto anterior, depositar el producto sobre malla ASTM 50# y lavar con agua suavemente (Figura N°47a). El producto +50# ASTM se almacena y seca en horno, este producto constituye el rechazo de la reactividad de cal (Figura N°47b) y no forma parte de la lechada de cal, mas bien es un desecho del proceso.

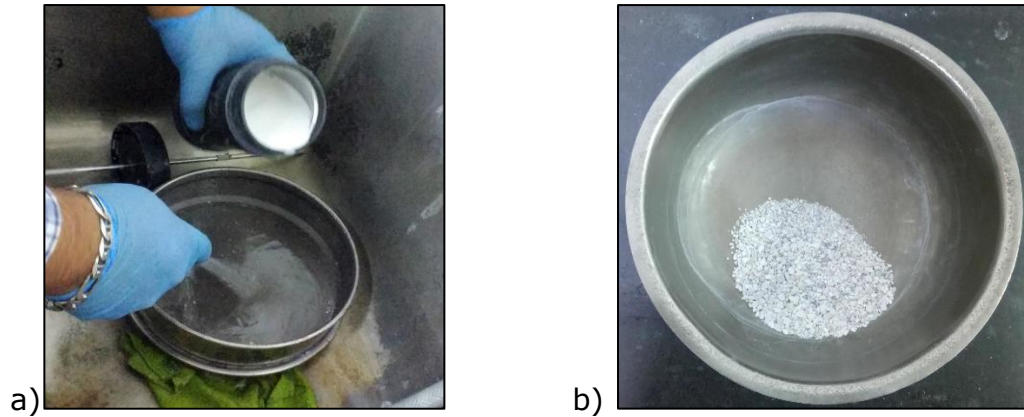


Figura N° 47 a) Proceso de obtención de rechazo reactividad de cal; b) Rechazo de la reactividad de cal

El producto -50# ASTM, fue almacenado y dispuesto en recipiente de plástico. Este producto recibe un proceso de deslamado con el fin de poder realizar análisis granulométrico a la lechada de cal producida; para esto se utiliza una malla 400# ASTM en la cual se deposita el producto y se realiza proceso de deslamado, donde el producto -400# ASTM se almacena en bandeja con papel base filtro pesado previamente (Figura N°48), lo cual se repite con la fracción +400# ASTM. Ambas bandejas se trasladan al horno de secado donde se mantienen el tiempo suficiente para eliminar toda el agua. Una vez se tiene el producto seco, se realiza análisis granulométrico parcial (20#,30#,40#,50#,70#,100#,140#,200#,270#,325#) a la fracción +400#, el cual se completa utilizando la masa -400# separada previamente en el proceso de deslamado.



Figura N° 48 Fracción -400# lechada de cal en papel base filtro.

Una vez se tiene caracterizada la lechada de cal de los distintos experimentos, se realiza un proceso de homogeneización reuniendo las fracciones $\pm 400\#$ ASTM, a manera de obtener una muestra representativa para las pruebas de flotación. Esto se realiza, ya que, debido al análisis granulométrico, la lechada queda segregada por tamaño; para esto se realiza un proceso de roleo en paño con un mínimo de 40 veces por punta, para posteriormente ser almacenada en bolsas plásticas (Figura N°49) con la menor cantidad de aire para evitar la degradación del producto.

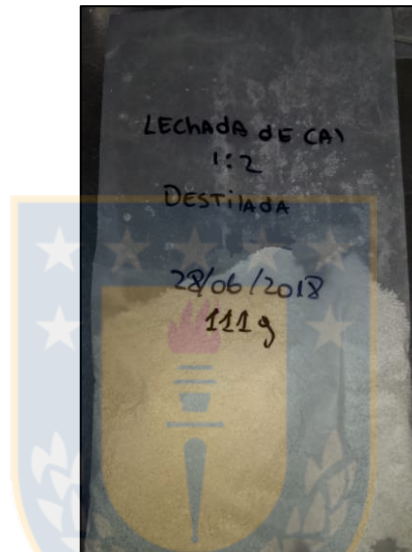


Figura N° 49 Ejemplo de almacenaje lechada de cal post proceso de homogeneización.

Para la realización de las pruebas de flotación, lo primero fue obtener el tiempo de molienda de la muestra mineral a utilizar, sin embargo, este valor fue previamente obtenido por el laboratorio DAND por lo tanto no se requiere mayor. Las pruebas de flotación poseen un procedimiento similar al descrito en la Sección 4.2.1, sin embargo, el pH utilizado en todo el set de pruebas es de 10.5 utilizando lechada de cal según sea el caso. Una descripción de las condiciones utilizadas para cada prueba se describe en las Tablas N°14-15, donde cabe mencionar que dichas pruebas fueron realizadas por duplicado para cada condición.

Tabla N° 14 Descripción de condiciones pruebas de reactividad de cal.

Variables						
N° Prueba	Tipo de Agua	Razón cal:agua	Masa Cal Viva [g]	Volumen Agua [mL]	Velocidad Agitador [RPM]	Temperatura Agua [°C]
1	Fresca	1:2	100	200	400	25
2	Fresca	1:3	100	300	400	25
3	Fresca	1:4	100	400	400	25
4	Recuperada	1:2	100	200	400	25
5	Recuperada	1:3	100	300	400	25
6	Recuperada	1:4	100	400	400	25
7	Desmineralizada	1:2	100	200	400	25
8	Desmineralizada	1:3	100	300	400	25
9	Desmineralizada	1:4	100	400	400	25

Tabla N° 15 Descripción de condiciones pruebas de flotación.

Variables						
N° Prueba	Tipo de Agua	Razón	Agua Molienda	Agua Flotación	Flotación p/p [%]	Rotor [RPM]
1	Fresca	1:2	Fresca	Fresca	38	1500
2	Fresca	1:3	Fresca	Fresca	38	1500
3	Fresca	1:4	Fresca	Fresca	38	1500
4	Recuperada	1:2	Fresca	Fresca	38	1500
5	Recuperada	1:3	Fresca	Fresca	38	1500
6	Recuperada	1:4	Fresca	Fresca	38	1500
7	Desmineralizada	1:2	Fresca	Fresca	38	1500
8	Desmineralizada	1:3	Fresca	Fresca	38	1500
9	Desmineralizada	1:4	Fresca	Fresca	38	1500

Una vez terminado el proceso de flotación, el concentrado y cola son llevados al horno para su proceso de secado. Completado este proceso, personal especializado del laboratorio se encarga de tomar una muestra representativa de concentrado y cola mediante un proceso de cono y cuarteo, las que son pulverizadas para ser enviadas a análisis químico.



5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Recopilación y análisis información planta

5.1.1 Información histórica cal viva y datos planta

La Figura N°50 expone la cantidad de cal utilizada posterior a un filtro de datos expuesto en el anexo N°9.1, Figuras N°78-79. La información expuesta es utilizando un parámetro en DAND conocido como IP, el cual engloba los gramos de cal viva utilizada por tonelada métrica seca procesada, este parámetro es similar a lo que se conoce como dosificación de reactivo.

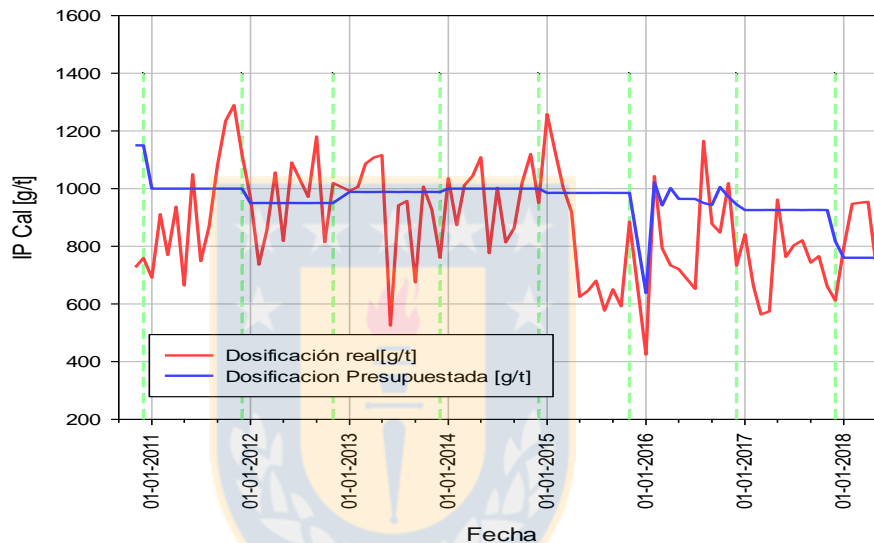


Figura N° 50 Comportamiento IP cal periodo noviembre 2010 a mayo 2018 (líneas segmentadas color verde indican término del año).

Analizando el comportamiento de la Figura N°50 se observa una disminución hacia el año 2015, atribuido a la variación del pH natural que ha experimentado el mineral (anexo 9.2, Figura N°80; Tabla N°20). Además, otro punto a considerar es la zona de explotación del yacimiento, en donde a través del tiempo, se ha ido explotando desde las UGM 4-6, hasta lo más reciente que son las UGM 1-3, donde las UGM 1-3 presentan poca o nula alteración supérgena a diferencia de sus predecesoras, la presencia de alteración indica que dicha zona del yacimiento estuvo en contacto con fluidos hidrotermales ácidos. Sin embargo, esto no explica en su totalidad la variabilidad del comportamiento, otro factor a considerar es el poco o nulo control de las plantas de preparación de lechada (sin esquema claro de qué parámetro seguir) y el poco control del insumo de alimentación, el cual

debe cumplir condiciones mínimas por contrato (anexo 9.3), debido a esto se generó un comportamiento inusual, en el cual durante el periodo enero 2018 hasta abril del mismo año (Figura N°50), se tuvo un sobreconsumo, y que fue atribuido a problemas con el proveedor, el cual enviaba cal viva con ley promedio de 79% y una granulometría muy fina; esto fue identificado y discutido, donde desde mayo en adelante regularizó su problema, lo que hizo disminuir el consumo drásticamente.

Por otra parte, se recolecta información de análisis QEMSCAN de alimentación al proceso de flotación cuyo periodo abarca desde noviembre del 2010 hasta mayo del 2018. La distribución de especies mineralógicas incluidos en el análisis QEMSCAN se encuentra detallada en el anexo N°9.5, Tabla N°21; esta información está clasificada según el punto de muestreo detallado en la sección 2.3 y clasificados como cortador sección SAG, cortador convencional A y cortador convencional E. Además, se posee la distribución de tratamiento tanto a nivel planta como por línea de procesamiento, la cual queda detallada en la Figura N°51.

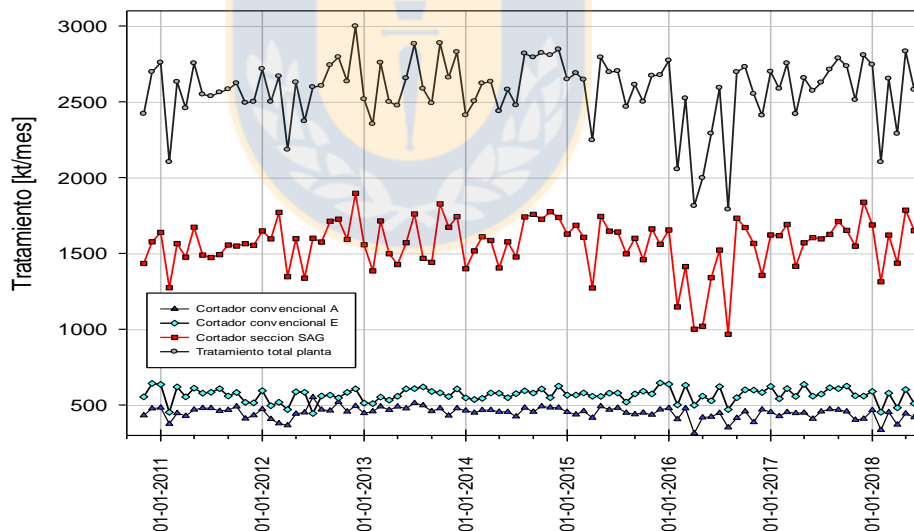


Figura N° 51 Comportamiento tratamiento mensual a nivel planta y por cada cortador metalúrgico.

Con la información antes detallada se plantea un arreglo (anexo N°9.4) que permite unir la información detallada en la Figura N°50, los análisis QEMSCAN y la información de la Figura N°51, lo que junto con las herramientas estadísticas vistas en la sección 3.7 entregan datos estadísticos relevantes para realizar la evaluación

de modelamiento en base a data histórica y cuyos resultados se encuentran en la Tabla N°16. Aún cuando se obtienen resultados relativamente coherentes entre la mineralogía detallada en la bibliografía y los resultados del arreglo llevado a cabo, al realizar un análisis multivariable para la obtención del modelo utilizando las relaciones más significantes, no se obtienen buenos resultados, ya que tanto para modelos que relacionen la cantidad mineralógica (%) con el IP de cal, como para cantidad mineralógica (toneladas) con toneladas de cal viva utilizadas, los resultados obtenidos son pobres; con coeficientes de determinación (R^2) de 0.17. Estos resultados pobres son atribuidos a la forma de relacionar ambos datos, ya que la forma de unir el IP de cal con la mineralogía fue a través de una ponderación en función del tratamiento (anexo 9.4), lo que se cree genera demasiado ruido para generar tanto un modelo representativo, como un análisis estadístico representativo; además la cantidad de datos (88) es restringida para asociar un parámetro tan global como lo es la cantidad de cal a un modelo, por lo antes mencionado se propone que no es factible la realización de un modelo en base a data operacional.

Tabla N° 16 Resultados análisis estadístico variables mineralógicas de impacto en variabilidad tanto IP como tonelaje de cal viva ($\alpha = 95 \%$).

Con respecto a IP			Con respecto a tonelaje		
Especie [%]	R	Valor p	Especie [t]	R	Valor p
Caolinita	0.31	0.003	Caolinita	0.33	0.002
Turmalina	0.25	0.018	Feldespató Potásico	0.3	0.004
Goethita(Al)-Harrisonita	0.24	0.022	Turmalina	0.26	0.015
Feldespató Potásico	0.18	0.083	Pirita	0.25	0.019
Titanita/Esfeno	-0.19	0.069	Goethita(Al)-Harrisonita	0.22	0.040
Dolomita/Ankerita	-0.19	0.073	Sericita-Moscovita	0.21	0.049
Cuarzo	-0.20	0.051	Molibdenita	0.18	0.092
Ilmenita	-0.22	0.036	Jarosita	-0.11	0.323
Plagioclasa-Albita	-0.25	0.017	Magnetita-Hematita	-0.16	0.129
Magnetita-Hematita	-0.26	0.013	Ilmenita	-0.18	0.090
			Dolomita/Ankerita	-0.19	0.078

Sin embargo, es interesante analizar las relaciones obtenidas, por ejemplo un resultado contrario a lo que se creía es la relación con los minerales de hierro, ya que se cree que un aumento de minerales de hierro como magnetita-hematita produce un incremento en el consumo de medios de molienda, lo que se cree adiciona mayor cantidad de iones $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ y por ende incrementaría el efecto visto en la sección 3.3.6; lo mismo sucede con el cuarzo y la jarosita en que los resultados son contrarios a lo visto. Sin embargo, la relación con la dolomita coincide con lo visto en la sección 3.3.1, ya que un aumento de la presencia de estos minerales disminuiría el consumo de cal, ya que al existir estos minerales en el sistema, la disolución de estos produce pH más básico lo cual es el objetivo de la adición de lechada de cal al sistema; lo mismo ocurre también con la caolinita, donde su resultado también coincide con lo considerado en la sección 3.3.7 y una mayor presencia de caolinita incrementaría el efecto de adsorción de iones, aumentando el consumo de reactivo.



5.1.2 Data operacional de plantas de lechada e información relevante

Se recopilaron datos de temperatura de agua de alimentación (Figura N°52-53) junto con cantidad de cal con respecto a cantidad de agua utilizada (Figura N°54-55) en la hidratación de cal. Sin embargo, es aquí donde se encontraron deficiencias, ya que datos para la planta de cal N°1 no existen, pues no posee medidores de flujo másico de cal viva ni agua de alimentación, ni tampoco medidores de temperatura, a diferencia de la planta de cal N°2.

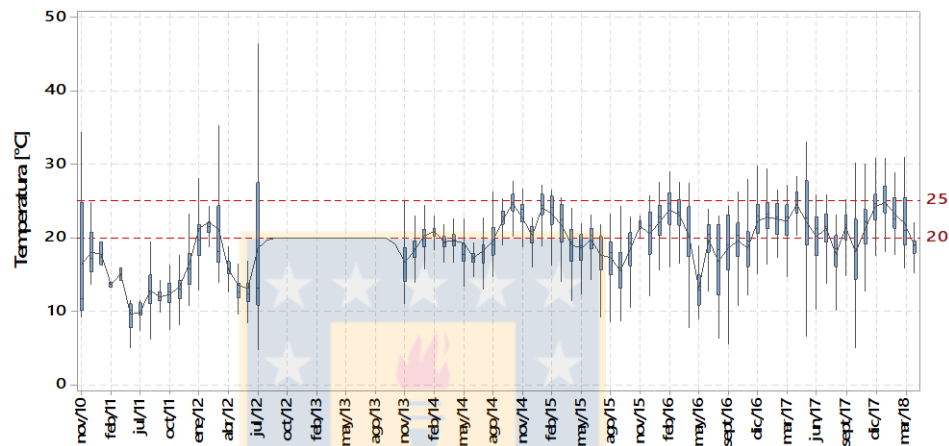


Figura N° 52 Temperatura agua de alimentación hidratador de cal N°4, planta de cal N°2.

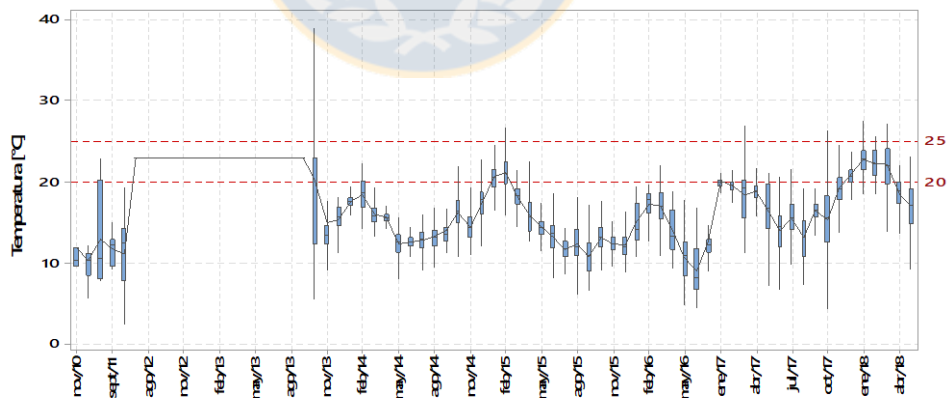


Figura N° 53 Temperatura agua de alimentación hidratador de cal N°5, planta de cal N°2.

Se hace hincapié que, durante el periodo 2011-2012 (Figuras N°52-53) se tuvo una temperatura constante, esto es atribuido a un error de medición en la instrumentación de planta, esto refuerza la percepción de la poca importancia que

reciben las plantas de cal, ya que es un periodo de tiempo amplio en que no se realizó hincapié en este error de medición.

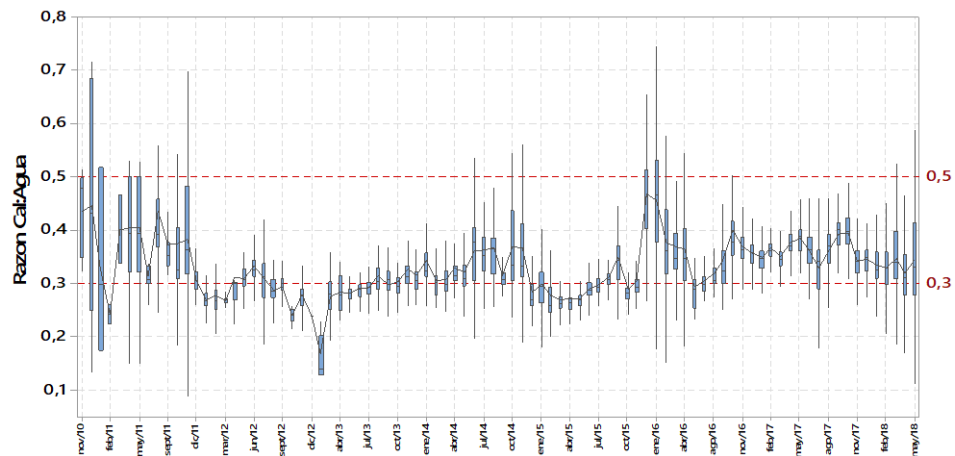


Figura N° 54 Comportamiento razón cal:agua hidratador N°4, planta de cal N°2.

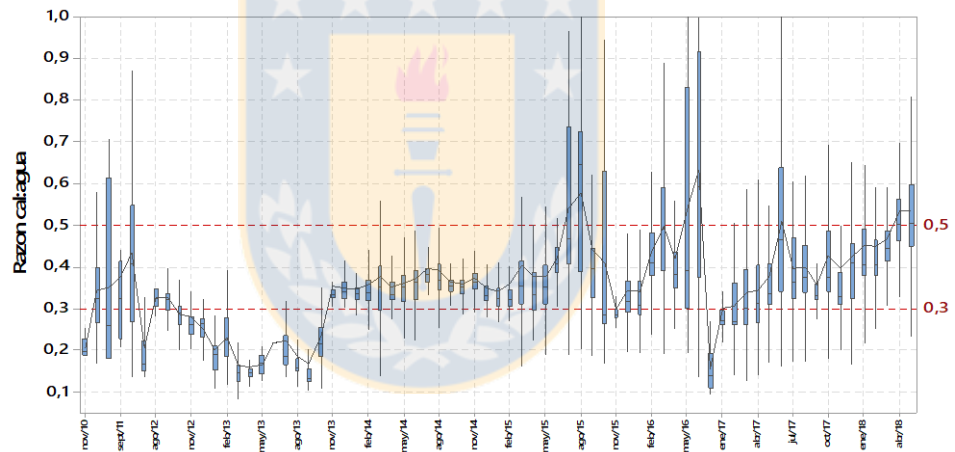


Figura N° 55 Comportamiento razón cal:agua hidratador N°5, planta de cal N°2.

Al realizar este trabajo, además se permite la utilización de trabajos anteriores en torno al tema y realizados en dependencias del laboratorio DAND, es así como en el año 2015 y mediante el trabajo de la alumna señorita Roxana Cárdenas bajo la tutela del señor Nicolas Miranda, estudian la forma de disminuir el consumo de cal por medio de la utilización de quebracho, es aquí donde se observa un resultado interesante y que va en línea con el objetivo de este trabajo. En este trabajo mediante el análisis del proceso de reactividad de cal en función de la cantidad de agua y la temperatura del agua de alimentación (6°C y 25°C), se observa una disminución en la ley de CaO en la lechada producida (Figura N°56).

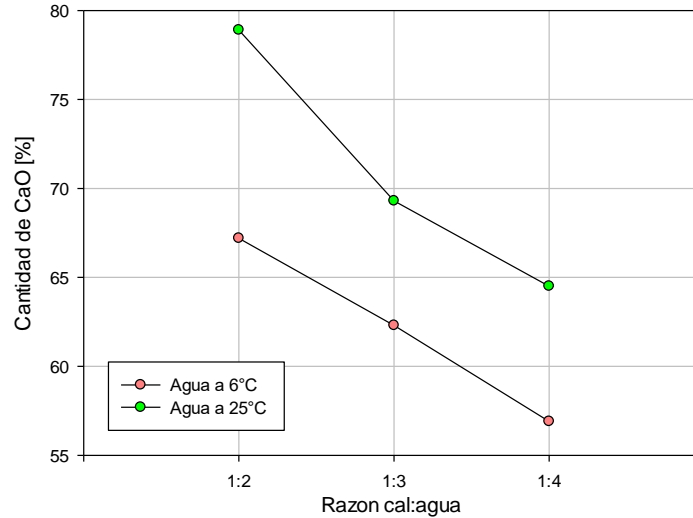


Figura N° 56 Efecto de la temperatura del agua de alimentación en la calidad química de lechada de cal, CaO alimentación [%]: 82.4, Codelco DAND (Cárdenas, 2015)

Esto coincide con lo encontrado en la bibliografía disponible de los procesos de hidratación de cal, en que se habla de una mejor operación y optimización del recurso utilizando agua caliente (Hassibi, 1999). Este resultado es atribuido a la temperatura que se alcanza en el reactor (Figura N°57), el alimentar agua más fría ocasiona que la cal viva no pueda llegar a la temperatura en que el agua penetrada en los poros genere vapor en suficiente cantidad para generar una presión que permita el quiebre de la partícula de CaO para continuar la reacción.

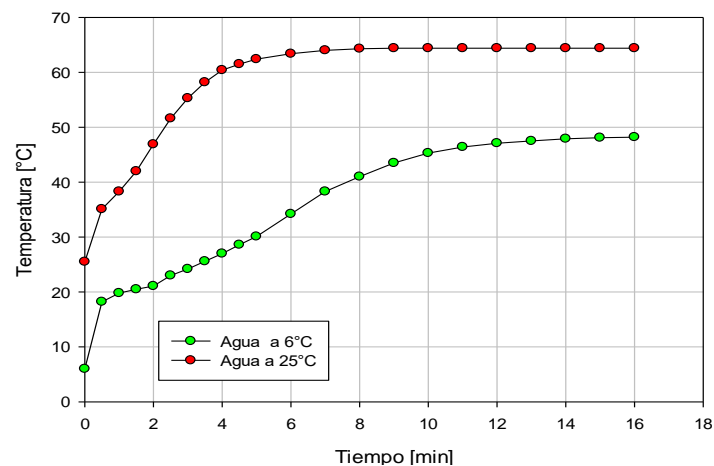


Figura N° 57 Temperatura reactor de hidratación de cal para dos temperaturas de agua de alimentación, con razón cal:agua 1:4 (Cárdenas, 2015).

5.2 Flotación y consumo de reactivo

Los resultados que se presentan a continuación constituyen el promedio obtenido de las pruebas realizadas por duplicado, por lo que cada uno posee cierto grado de error atribuido al técnico especialista realizador de la experimentación.

Las Figuras N°58-61 evidencian la variación de tanto la ley como la recuperación de cobre, molibdeno, hierro e insoluble en función del tipo de agua y pH evaluado. Se ve claramente que la utilización de agua haulage disminuye la ley de cobre en el concentrado (Figura N°59a), lo mismo ocurre para la ley de molibdeno (Figura N°59d), esta disminución es atribuida al aumento de recuperación de insoluble (Figura N°58c; Tabla N°17) lo que genera un efecto de dilución del concentrado, además se observa un aumento de la recuperación de hierro lo cual es atribuido a la composición del agua y que es discutido más adelante.

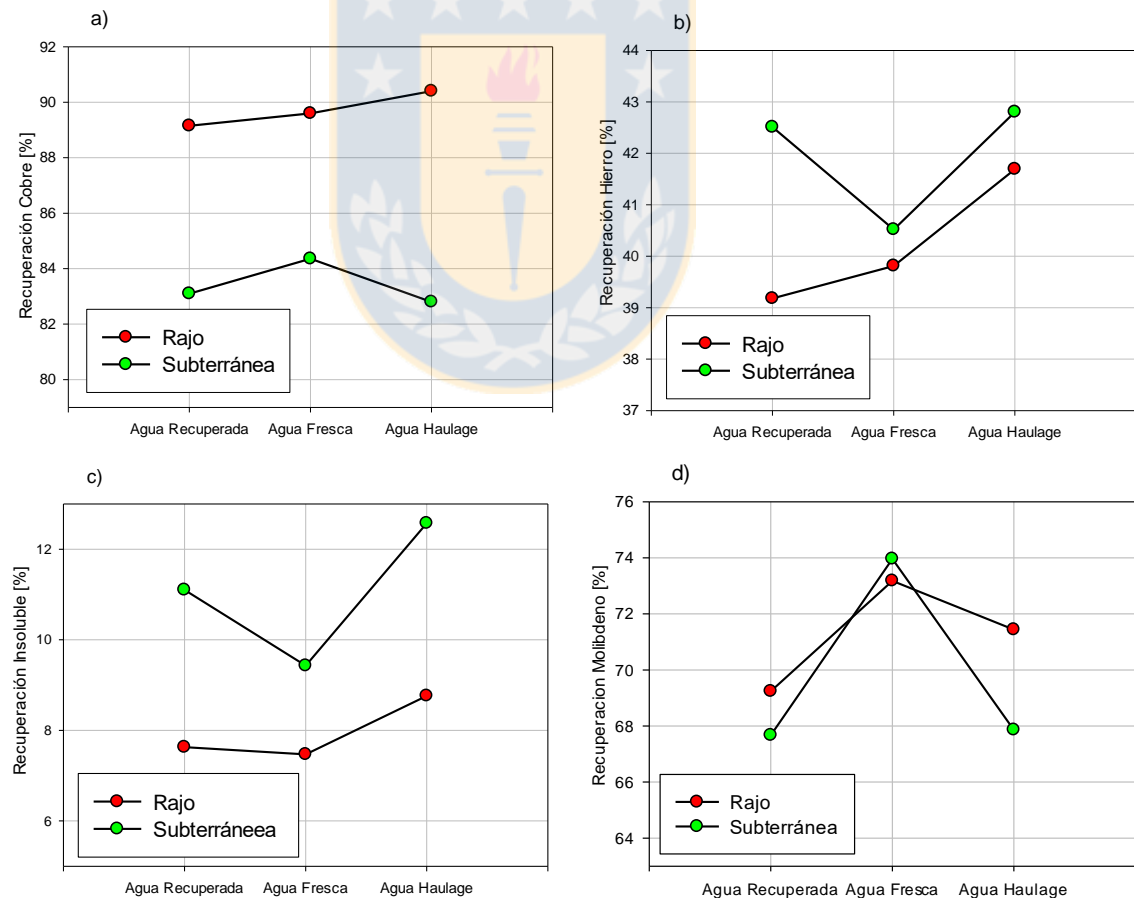


Figura N° 58 Efecto del tipo de agua en la recuperación a pH 10.5

a) cobre; b) hierro; c) insoluble; d) molibdeno.

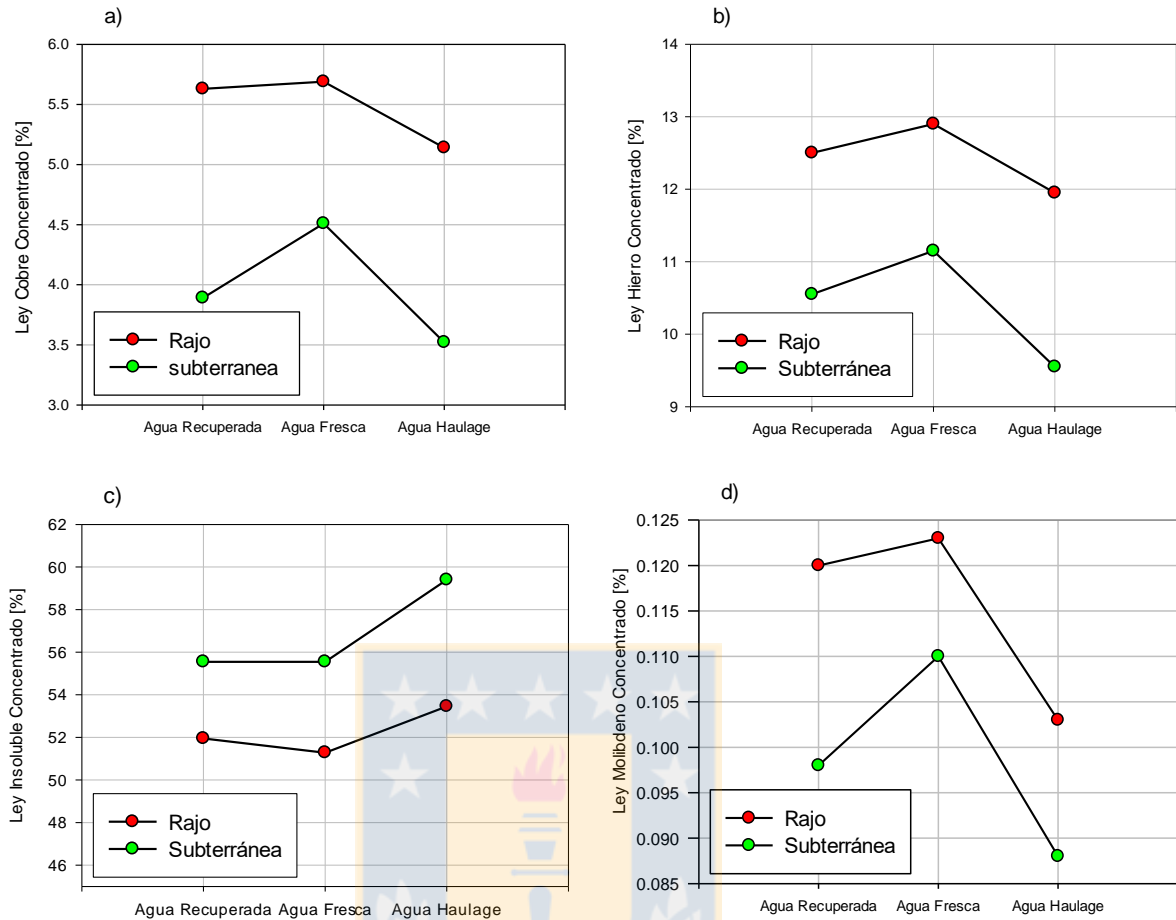


Figura N° 59 Efecto del tipo de agua en la ley de concentrado a pH 10.5
a) cobre; b) hierro; c) insoluble; d) molibdeno.

Tabla N° 17 Variación en la recuperación de insoluble con respecto a la utilización de agua fresca a pH 10.5.

Línea Mineral	Tipo de Agua	Puntos
Rajo	Haulage	1.29
Subterránea	Haulage	3.14
Rajo	Recuperada	0.16
Subterránea	Recuperada	1.67

El efecto observado a pH 10.5 es similar al efecto observado a pH 12.2 (Figura N°60-61), sin embargo, a pH 12.2 se debe considerar que disminuye la recuperación de hierro (entre 2 a 6 puntos aproximadamente) y aumenta la recuperación de cobre (2 puntos aproximadamente) en comparación a pH 10.5, atribuido al efecto del pH de trabajo, ya que a valores de pH más altos y un

potencial de pulpa oxidante (cuyo valor en las pruebas fue aproximadamente 0.39 V/ENH), se favorece la formación de elementos hidrofóbicos en la pirita ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) lo que incrementaría su depresión, sin embargo al poseer solo análisis químicos y no análisis QEMSCAN para poder cuantificar la recuperación de pirita, esto queda solo como una posible explicación en base a lo disponible.

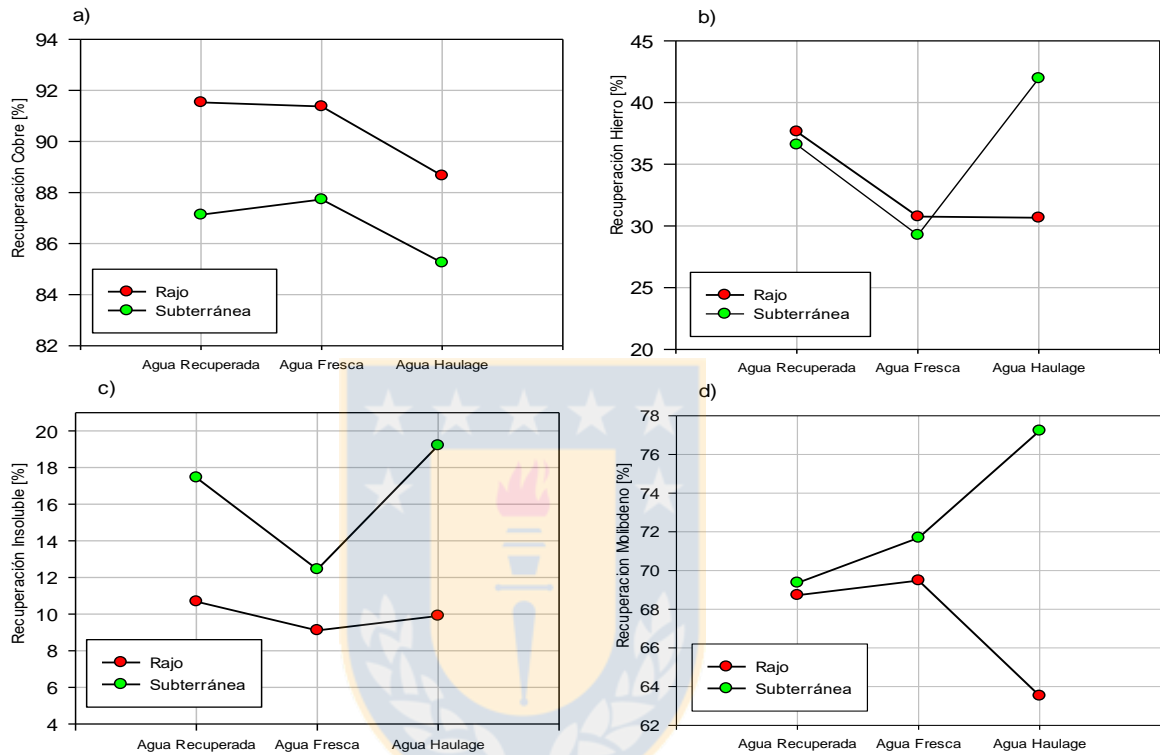


Figura N° 60 Efecto del tipo de agua en la recuperación a pH 12.2

a) cobre; b) hierro; c) insoluble; d) molibdeno.

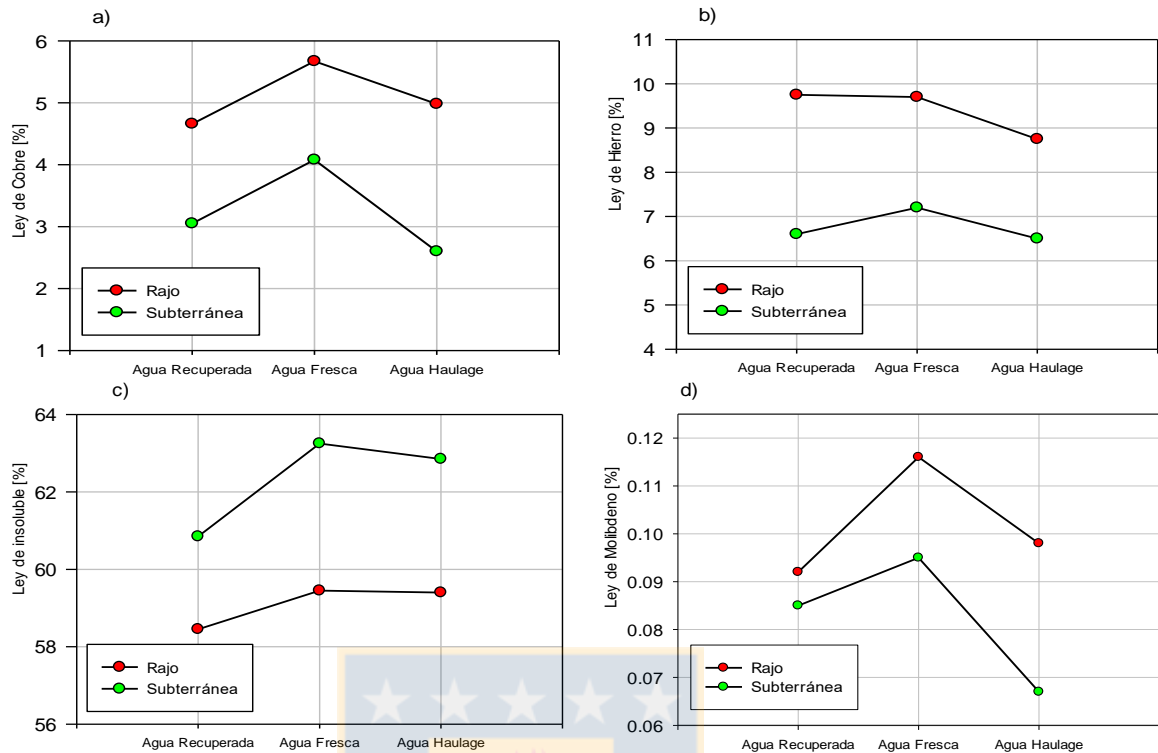


Figura N° 61 Efecto del tipo de agua en la ley de concentrado a pH 12.2
a) cobre; b) hierro; c) insoluble; d) molibdeno.

Este comportamiento del agua haulage es atribuido a la composición química que posee, la cual constituye un tipo de agua altamente iónica. El anexo 9.6, Figuras N°82-83, presentan la composición química histórica del agua haulage, esta información fue provista por la sección de hidrogeología DAND; lamentablemente la empresa externa a cargo de la realización de los análisis químicos por parte del laboratorio metalúrgico no posee la capacidad técnica para realizar análisis por iones más específicos como HCO_3^- , Mg^{2+} entre otros, por lo cual lo discutido a continuación es basado en la información proporcionada por la sección de hidrogeología y la muestra puntual que fue recolectada en el mes de abril del presente año. En particular el agua haulage posee una alta concentración de iones perjudiciales para la flotación, como lo son HCO_3^- , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Cu^{2+} , los cuales producen problemas de consumo de reactivo según lo documentado en la sección 3.4 y por otro lado la presencia de estos iones puede favorecer la coagulación de la ganga y por ende aumentar la recuperación de esta. Más aun estos elementos se encuentran en las condiciones ideales de precipitación ya que el pH de trabajo coincide o es mayor al pH en el cual estos compuestos tienden a precipitar (anexo

9.7). Con respecto al agua recuperada, su comportamiento es atribuido al origen de este tipo de agua, ya que es agua recirculada del proceso de flotación por ende no solo se encuentra cargada con iones (calcio 950 mL/L en promedio), sino que además es posible que exista presencia de reactivos como los floculantes y otros elementos utilizados en el proceso de recuperación de agua los que favorecerían la hetero coagulación, además se observa según la Figura N°41, sección 4.1.1 que el agua también posee cierta cantidad de sólidos disueltos.

La Figura N°62 muestra los resultados en torno al consumo de cal obtenido en las pruebas de flotación, este comportamiento también es atribuido a la composición del agua. En particular para el agua haulage, sus resultados se atribuyen a la alta presencia de bicarbonato y otros elementos, donde el bicarbonato genera efecto buffer por su descomposición para la formación de ion carbonato en desmedro de los iones hidroxilo, dificultando la modificación del pH (Figura N°35, sección 3.4), e iones calcio y magnesio cuya precipitación consume iones OH^- (anexo N°9.7). En relación con el agua recuperada, su diferencia es atribuida a dos factores, el principal es el pH que posee (Tabla N°7, sección 4.1.1) en comparación a las demás, lo que mezclado con el mineral requeriría una menor cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para llegar al pH de trabajo. Por otro lado, se atribuye la diferencia en el consumo de cal entre la línea rajo y la línea subterránea en primer lugar a la diferencia de pH natural que ambas poseen (0.14 puntos) y además a que la línea subterránea posee mayor proporción de elementos como cuarzo, sericita-moscovita y montmorillonita, lo que da indicio que el mineral de la línea subterránea proviene de una zona más alterada que el mineral de la mina rajo, y por ende posee elementos más ácidos en su composición.

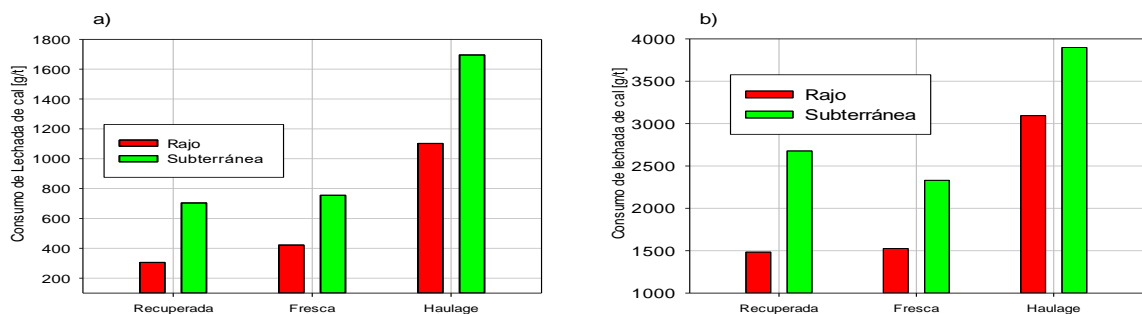


Figura N° 62 Variación del consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en función del tipo de agua
a) pH=10.5; b) pH=12.2.

Estos resultados muestran que las dos variables más relevantes en torno al consumo directo de cal; son el tipo de mineral tratado y en mayor proporción el tipo de agua adicionada al proceso, con un mayor enfoque en el agua haulage, ya que este tipo de agua al ser agua de percolación que se recolecta en un punto específico de la mina (refugio haulage), no puede ser descartada y debe ser obligatoriamente utilizada en el proceso.

5.3 Pruebas de reactividad en función de la calidad y cantidad de agua

Las Figura N°64 y Tabla N°18 muestran los resultados tanto físicos como químicos de la lechada de cal producida. Es interesante observar que existe una diferencia granulométrica por el tipo como cantidad de agua, esto es atribuido a la composición del agua (SO_4^{2-}) y a la temperatura del reactor de hidratación respectivamente. La sección 3.6 explica que el proceso de hidratación consta de la penetración del agua en la partícula de CaO, lo que al reaccionar va calentando la partícula y por ende también el agua penetrada; al alcanzar cierto punto de temperatura, el agua comienza a hervir y a formar vapor, lo que se acumula en la partícula hasta que revienta exponiendo más superficie de CaO para que continúe la reacción, sin embargo agua con mayor proporción de ion SO_4^{2-} como lo es el agua recuperada (Tabla N°9, sección 4.1.2) junto con las condiciones de la prueba, favorecen la formación sulfato de calcio (anexo 9.8), el cual precipita en la superficie de la partícula de cal, obstruyendo los poros al ingreso del agua; esto repercute en el proceso de fragmentación de la lechada de cal, lo que no solo produce una granulometría de lechada más gruesa, sino que por otro lado, la partícula de cal viva al no poder ser fracturada, no podrá atravesar la malla 50# ASTM (que separa el rechazo de la lechada de cal), lo que aumentaría la proporción de rechazo generada (Figura N°66). Con respecto a la cantidad de agua, al existir mayor proporción de esta en el sistema (para una misma cantidad de calor generado), no permite que el agua penetrada hierva y fomente la pulverización de las partículas de CaO para proseguir con la generación de calor pues la temperatura dentro del reactor no es suficiente, esto queda en evidencia al analizar la Figura N°65.

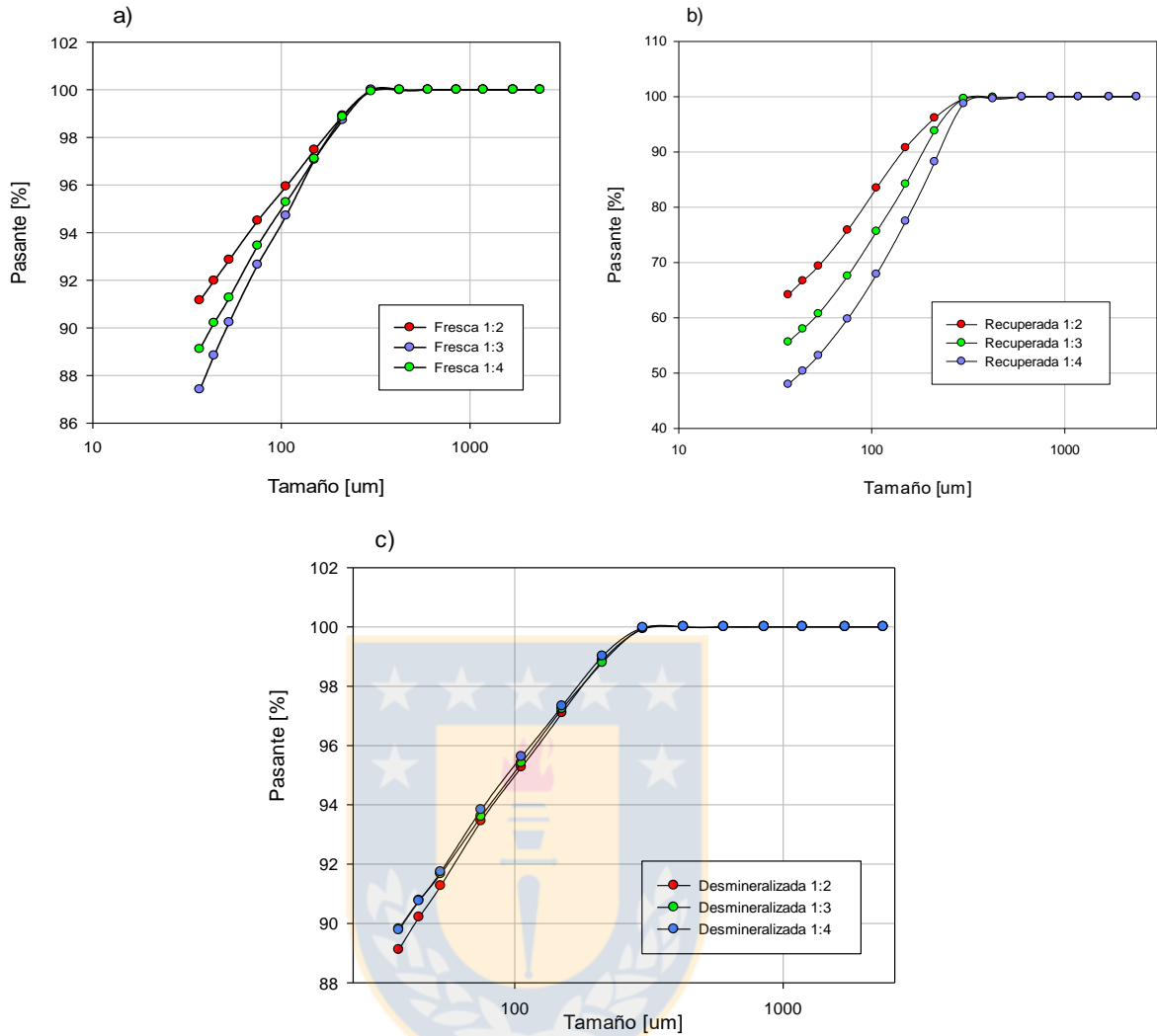


Figura N° 63 Distribución granulométrica lechada de cal en función del tipo y cantidad de agua en la reactividad de cal,
a) agua fresca; b) agua recuperada; c) agua desmineralizada.

Tabla N° 18 Distribución de tamaño del 97% de la masa pasante en micrones.

Tipo de agua Cantidad de Agua	Agua Fresca	Agua Recuperada	Agua Desmineralizada
1:2	135	231	147
1:3	145	257	144
1:4	149	284	140

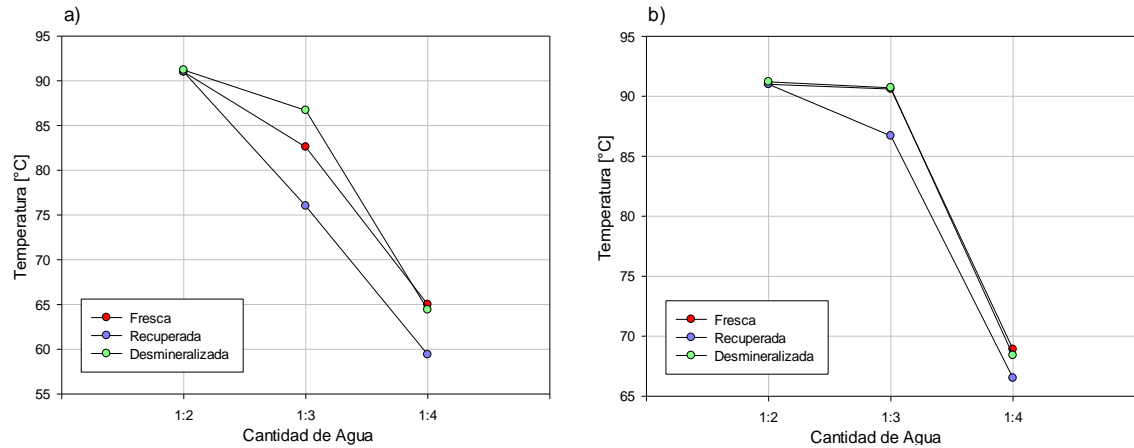


Figura N° 64 Temperatura del reactor de hidratación en función del tipo y cantidad de agua.

a) t=3 min; b) t=6 min.

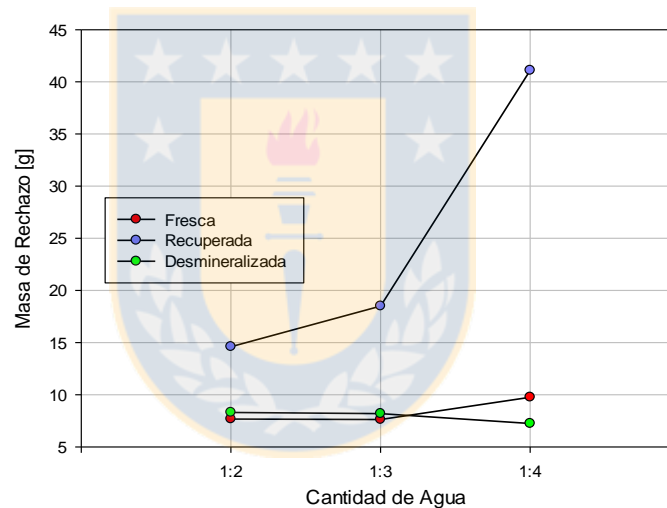


Figura N° 65 Masa de rechazo del proceso de hidratación de cal en función de la cantidad y calidad de agua.

La Figura N°66 muestra un análisis de la cantidad de CaO en el rechazo del proceso de hidratación de cal, es aquí donde se observa que mantener una razón cal:agua 1:3 (100 g de cal viva con 300 mL de agua) genera la menor cantidad de CaO en el rechazo y en la mayoría de los casos una menor cantidad de rechazo; lo que indicaría que esta razón es la que permite optimizar el uso de cal viva pues representa la menor pérdida de material valioso. El anexo 9.9 expone tanto la ley de lechada obtenida y un análisis económico con datos reales, donde se reafirma

la postura que la razón planteada anteriormente es la mejor pues representa la menor pérdida de dinero por concepto de rechazo.

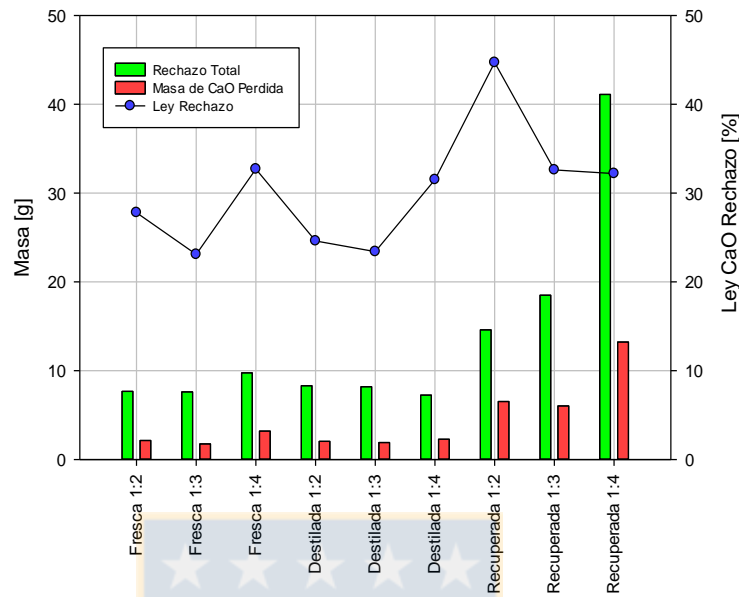


Figura N° 66 Masa de rechazo reactividades de cal y cantidad de CaO perdido en cada prueba; Eje izquierdo masa rechazo y masa de CaO, eje derecho Ley de rechazo.

Prosiguiendo, además de los resultados en torno a la reactividad de cal, se obtienen los resultados de las pruebas de flotación, aquí donde se observa un efecto para las distintas lechadas producidas, en particular se ve una disminución en la recuperación de hierro (Figura N°67) de aproximadamente 1 punto para la lechada hidratada en razón 1:3 en comparación a las otras dos opciones, esto es atribuido a que presenta una granulometría intermedia lo que permite mayor interacción con su entorno por poseer mayor superficie expuesta, maximizando su función. Para el caso del molibdeno se ve una baja en la recuperación (10.9 puntos para agua fresca y 5.49 para agua desmineralizada con respecto a la razón 1:3) para la lechada en razón 1:2, esto es atribuido a que la razón 1:2 presentó la granulometría más fina de todas, por lo tanto posee mayor área expuesta que las otras dos opciones, aumentando su efecto en la flotación, en el caso particular el molibdeno a la forma de MoS_2 es muy sensible al efecto de la presencia de calcio, lo que genera un efecto depresor, ya que la interacción de estos dos elementos produce precipitados hidrofílicos en la superficie de la molibdenita, disminuyendo su flotabilidad y por

ende dificultando su recuperación. Los cambios en la ley de concentrado de cobre-hierro-molibdeno (Figura N°69) para lechada hidratada con agua desmineralizada y recuperada en razón 1:3 con respecto a las otras dos opciones, se deben a un aumento de la recuperación de insoluble, con un aumento de 2.45 puntos en razón 1:2 y 0.94 puntos en razón 1:4 con respecto a razón 1:3 para el agua desmineralizada y aumento de 1.17 puntos en razón 1:2 y 0.6 puntos en razón 1:4 con respecto a razón 1:3 (Figura N°68e); esto también se ve en la recuperación en peso, lo que provoca un efecto de dilución en el concentrado y variación marcada en la ley de concentrado, sin embargo esto no ocurre para los resultados con agua fresca, pues la recuperación de insoluble y recuperación en peso no presentan mucha variación.

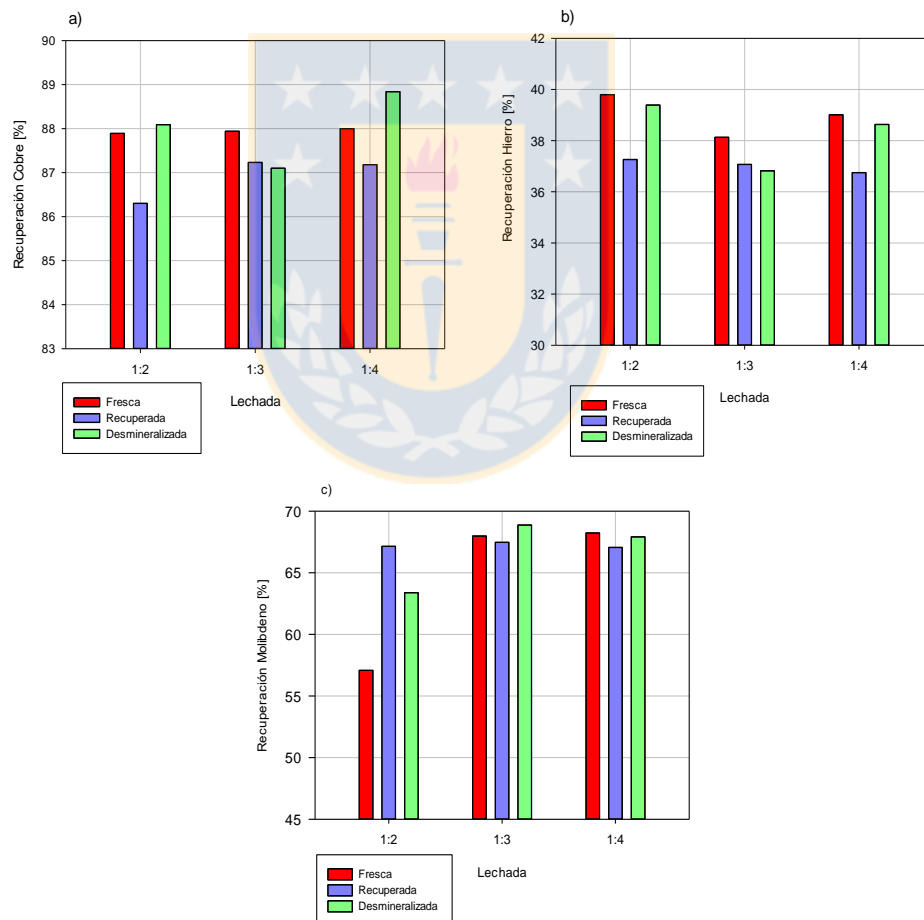


Figura N° 67 Recuperación en función del tipo de lechada preparada con distintos tipos de agua y distinta cantidad de agua
a) cobre; b) hierro; c) molibdeno.

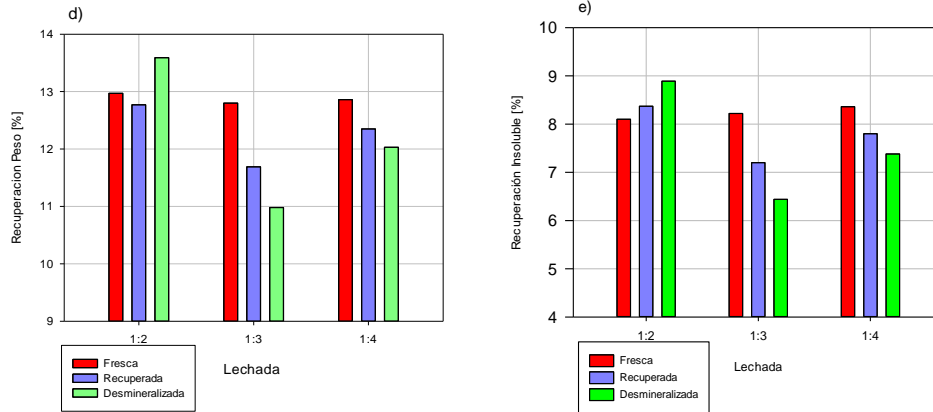


Figura N° 68 Recuperación en función del tipo de lechada preparada con distintos tipos de agua y distinta cantidad de agua.
d) peso; e) insoluble.

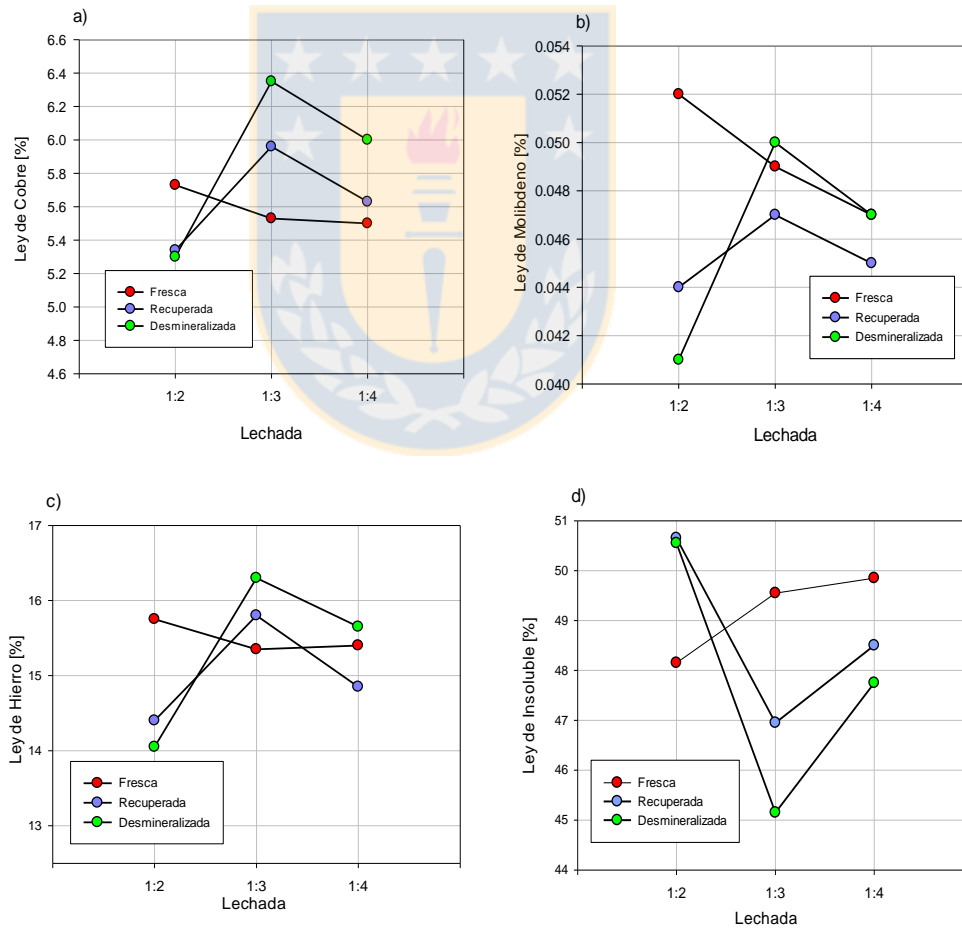


Figura N° 69 Ley de concentrado en función de lechada de cal hidratada con distinta cantidad y calidad de agua.
a) cobre; b) molibdeno; c) hierro; d) insoluble.

Finalmente, se tiene el consumo de cal que tuvieron las pruebas de flotación (Figura N°70), aquí se ve un fenómeno particular; donde la razón más fina 1:2 tuvo el mayor consumo, esto es atribuido a la forma en que se llevó a cabo el análisis granulométrico, pues debido a la imposibilidad de realizar un análisis granulométrico en húmedo, se debió separar la fracción -400# ASTM de la lechada, y desde ahí llevar los dos productos a secado, esto se realizó ya que al secar la lechada con ambas fracciones juntas en una sola bandeja, esta se pegaba a la bandeja al momento de secarse, imposibilitando la remoción; por esta razón se generó la formación de aglomerados ultrafinos (Figura N°71) pues la fracción de ultra finos no se podía llevar a un pulverizador pues esto modificaría su tamaño, por ende una vez despegada del papel (Figura N°48) se disgrego lo más posible con el uso de una brocha. Esto se plantea, pues en la realización del proceso de flotación, se vio que existían parte de estos aglomerados (Figura N°71) sin disolver, los cuales aparecían al disponer las colas de flotación para el proceso de secado; estas observaciones se dan en la flotación con lechada 1:2 para todas las razones, se cree que, al no poder disolver estos aglomerados, se requiere más cal de la necesaria para poder modificar el pH. Mas aun, se ve en el anexo N°9.9, Figura N°82a, que, aunque la razón 1:2 genera la mayor masa de lechada, esta posee la menor ley de Ca(OH)_2 (anexo N°9.9, Figura N°84c,) por ende, menor capacidad de modificación de pH.

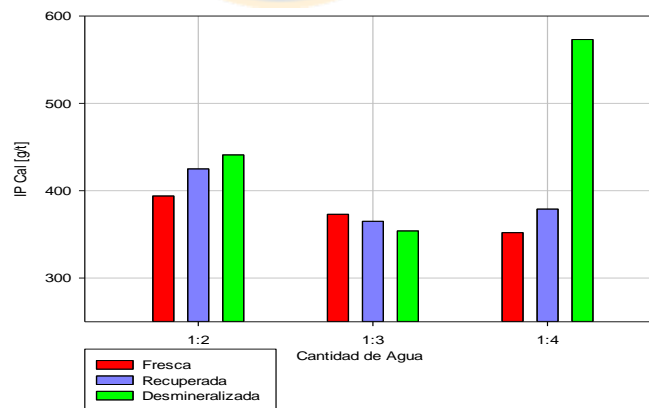


Figura N° 70 Consumo de lechada de cal hidratada con distinta calidad y cantidad de agua.

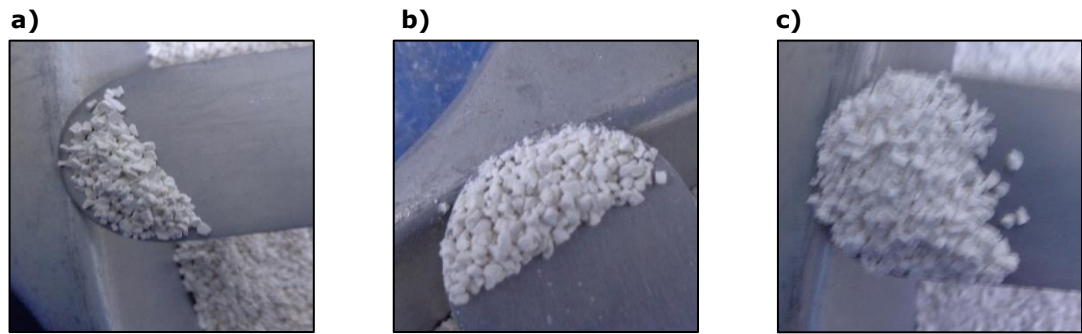


Figura N° 71 Aglomerados ultrafinos razón cal:agua 1:2.
a) agua fresca; b) agua recuperada; c) agua desmineralizada



5.4 Formulación aproximación calculo IP cal

Analizado el efecto particular de la calidad de agua y dado los resultados obtenidos en la evaluación de un modelo en función de data operacional, se plantea utilizar una aproximación lineal en base a la distribución de las líneas de flotación; la distribución de agua de alimentación a la planta y la distribución de mineral de alimentación al circuito de molienda-flotación, para esto se utiliza la distribución de mineral de alimentación vista en la Figura N°15, sección 2.3, donde la utilidad que presenta se complementa con la distribución de tonelaje de alimentación expuesta en la Figura N°51, sección 5.1.1. Asimismo, la distribución de agua de alimentación a todo el sistema de molienda flotación se describe mediante la Figura N°72.

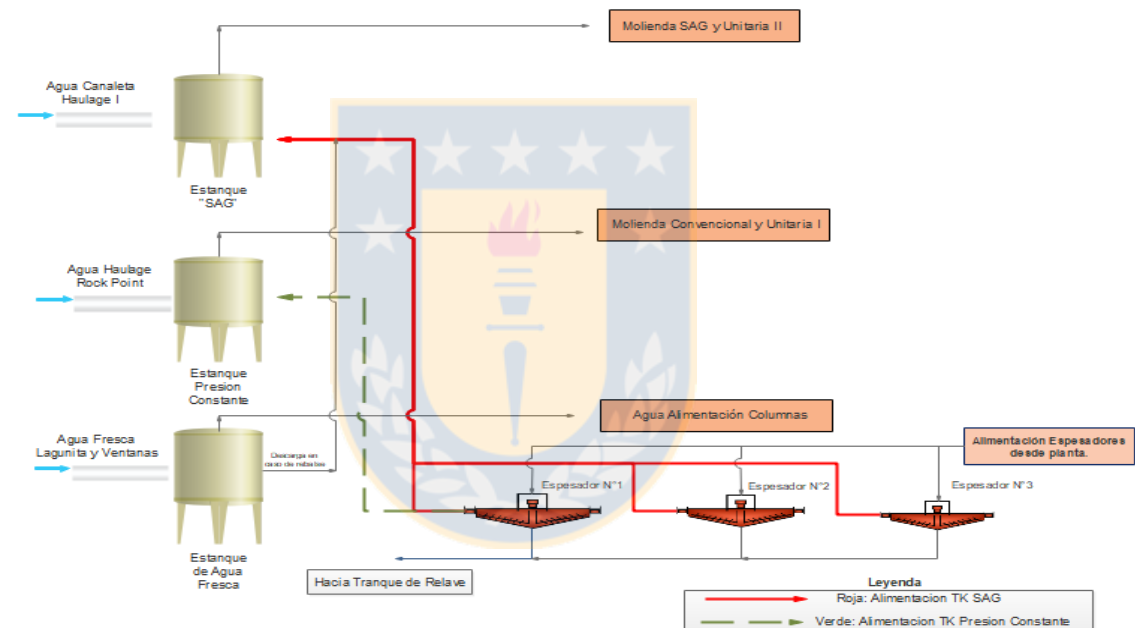


Figura N° 72 Distribución aguas de alimentación a sección molienda-flotación.

(Fuente: Operadores panel de flotación DAND).

Específicamente, la alimentación a cada estanque de almacenamiento y distribución de agua y la característica del agua de alimentación se encuentran descritas en la Tabla N°19.

Tabla N° 19 Distribución de alimentación agua a estanques de almacenamiento interno, (Fuente: Operadores de panel flotación DAND).

Estanque	Tipo de Agua			
	Recuperada	Fresca	Haulage	Caso Excepcional
SAG	Si	No	Si	Fresca
Presión Constante	Si	No	Si	-
Fresca	No	Si	No	-

Cuyos valores de flujo que alimentan los estanques de almacenamiento varían en función de la estación del año. Sin embargo, el agua recuperada no posee una variación muy notable, no así el agua haulage, que presenta la mayor variación de flujo entre periodos de temperatura cálido/frío. Para poder obtener una aproximación lineal al consumo de cal por tonelada procesada, se construye un arreglo en base a ponderaciones, dicho arreglo se encuentra descrito en el anexo N°9.10. En base al arreglo mencionado se construye una planilla en la plataforma Excel, que permite simular el consumo de cal según las variables mostradas por la ecuación (14):

$$IP_{\text{simulado}}[\text{g/t}] = f(\text{Tipo de Agua, Tipo de mineral, Recuperación en peso, pH}) \quad (14)$$

Donde los factores que mayor peso poseen a la hora de simular son la cantidad de agua haulage con relación al agua recuperada y la cantidad de mineral de línea subterránea en relación con el tratamiento total a nivel planta.

Gerencia Plantas Superintendencia Ingeniería de Procesos Laboratorio Metalúrgico Área Concentración		Planilla de Calculo Aproximación IP de Cal	Resultados	Desde tabla Ingreso de datos
Ingreso de Datos				
Agua Haulage [l/s] TK SAG "SAG"	Valor Menor	Modificable	Proporcion Haulage "SAG"	9,77
Agua Recuperada [l/s] TK SAG "SAG"	1200	No Modificable	Proporcion Haulage "Convencional"	18,63
Agua Recuperada [l/s] TK Presión CTE "Convencional"	380	No Modificable	Tratamiento Total a Columnar	0,15
Agua Haulage [l/s] TK Presión CTE "Convencional"	87		Tratamiento Rajo	63,0
Tratamiento Rajo [ton/mes]	1785291		IP [g/t]	800,4
Tratamiento Subterránea [ton/mes]	1046882			
Recuperación Peso rougher	15			
Resultado Datos				
Proporcion de Salida Agua Hau "SAG" [%]	OPCION			
Proporcion de Salida Agua Rec "SAG" [%]	9,77			
Proporcion de Salida Agua Hau "Convencional" [%]	90,2			
Proporcion de Salida Agua Rec "Convencional" [%]	18,63			
Proporcion de Salida Agua Rec "Convencional" [%]	81,37			
Proporcion Tratamiento Rajo [%]	63,04			
Proporcion Tratamiento Subterránea [%]	36,96			
Tratamiento Aproximado desde Rougher a Columnar [%]	0,15			

Figura N° 73 Planilla de cálculo IP de cal a escala laboratorio.

Cabe destacar que los resultados obtenidos en este simulador son escala laboratorio, por ende, al compararlo con los resultados obtenidos a escala planta estos presentan cierta diferencia (Figura N°74), esta fue atribuida principalmente a la forma de operación de las plantas de preparación de lechada, las cuales distan mucho de una operación estable, como lo demuestran las figuras N°52-55, sección 5.1.1.

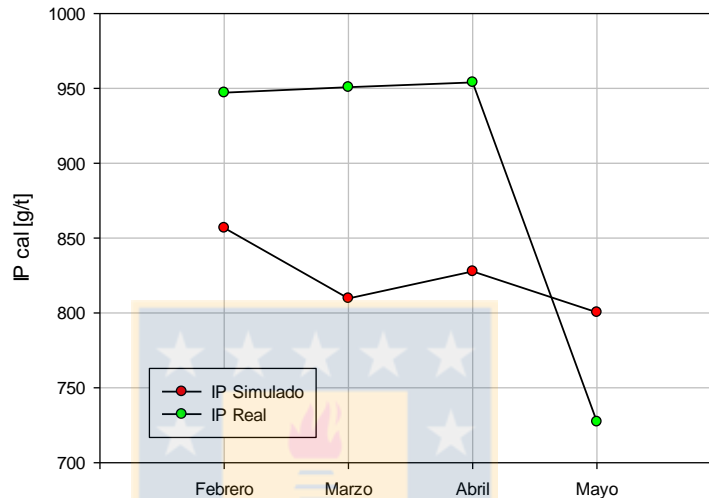


Figura N° 74 Resultados simulación de IP de

Al utilizar el simulador (Figura N°74) para obtener el consumo de mayo 2018, se obtuvo un IP de cal de 800.4 [g/t] el cual dista del obtenido en dicho periodo de 727.26 [g/t], sin embargo este resultado coincide con una mejora producida en la planta, ya que en los periodos en que fue tomada la muestra mineral (marzo-abril del 2018), la muestra de cal (abril) y realizado las simulación (febrero a mayo del 2018); la planta sufrió un sobreconsumo (febrero a abril) el cual fue discutido en la sección 5.1.1, esto fue regularizado para el periodo de mayo (alimentando cal viva con ley por sobre 86%) y por ende favoreció enormemente el IP de cal, razón por la cual se obtiene esta diferencia entre lo simulado y lo real. Sin embargo, el simulador ofrece una forma de calcular el IP de cal que posee cierta ventaja, la cual fue discutida con la sección de geo metalurgia de la División, esto es que permite realizar pruebas de laboratorio a muestras de sondajes geológicos de zonas del yacimiento que se encuentren próximo a ser explotado, los que juntos con la deducción obtenida permitiría obtener una aproximación al consumo de cal que tendrá dicha muestra.

Para realizar este procedimiento se debe:

- Obtener muestra de sondaje a estudiar
- Obtener muestra de agua haulage en una fecha cercana a la realización de la experimentación
- Obtener muestra de agua recuperada en una fecha cercana a realización de experimentación
- Obtener lechada de cal desde planta de preparación de lechada de cal
- Realizar experimentación y obtener IP de cal a pH 10.5 y 12.2 para el mineral a simular.
- Reemplazar la base de datos de planilla Excel entregada y llevar a cabo simulaciones para estimar IP de cal de dicha muestra a tratar.

Mas aun, esta aproximación entrega una herramienta inexistente actualmente en DAND, la cual requiere de datos escala laboratorio y datos de sistema PiSystem.

5.5 Preparación y distribución lechada de cal

Los presentado a continuación, son resultado de una inspección en terreno de ambas plantas de preparación de lechada junto inspección a los puntos disponibles de adición de lechada de cal al sistema; las mejoras indicadas a continuación son propuestas en función de lo encontrado en el desarrollo de la memoria y que están en línea con el objetivo de disminución del consumo. Cabe mencionar que esta inspección fue realizada con el supervisor de primera línea señor Mario Castañeda Cortez y el operador en terreno señor Cristian Fernández, con fecha del 20-7-2018.

- Implementación de calefactores de agua

Implementar calefactores de agua en la alimentación a los hidratadores de cal planta de cal N°1 y N°2 (Figura N°75), ya que por lo visto en las Figuras N°56-57, existe una mejora en la calidad de lechada por concepto de temperatura de agua de alimentación. Lo observado en planta es que el agua para realizar el proceso de hidratación es alimentada a temperatura ambiente y al ser una operación inserta en medio de la cordillera de Los Andes, el agua llega a temperaturas cercanas a los 10°C (Figuras N°52-53) o menores, por lo tanto, esto dificulta la operación eficiente de las plantas de preparación de lechada.

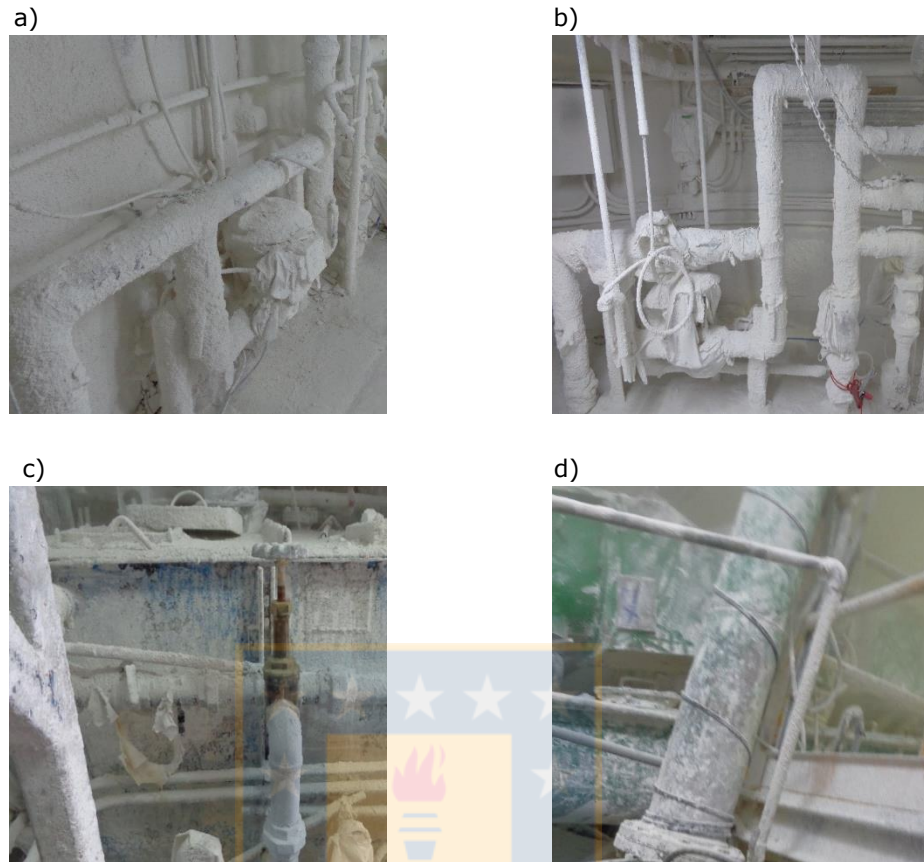


Figura N° 75 Cañerías de alimentación de agua a estanques de hidratación de cal.

a) slaker N°5; b) slaker N°4; c) slaker N°1; b) slaker N°2

- Actualizar el sistema de control en torno a la preparación de lechada de cal

Actualmente la preparación de lechada se realiza insertando agua y cal en el reactor y observando el incremento de temperatura, sin control de la temperatura de alimentación del agua (Figura N°52-53), lo que produce que el operador modifique la alimentación de cal o agua para alcanzar la temperatura del punto de control (70°C), esto ocasiona desviaciones en la razón cal:agua utilizada (Figura N°54-55). Según lo encontrado, lo ideal es mantener una relación cal:agua de 1:3, por ende, se recomienda actualizar el sistema de preparación a uno en que se fije la cantidad de cal y agua que utilizar.

- Reparación e instrumentación slaker N°1, planta de cal N°1

Reparación de válvula automática de alimentación de agua (Figura N°75) indicada con flecha de color rojo, actualmente el operador en terreno bajo su propio criterio

y en función de lo que indica el operador de panel de flotación mueve la válvula indicada con flecha de color amarillo, sin conocimiento claro de la cantidad de agua que está agregando por cantidad de cal procesada, lo que ocasionaría una desviación de la razón cal:agua.



Figura N° 76 Alimentación agua slaker N°1, planta de cal N°1.

- Implementación de lectores de flujo

Para mejorar el control de razón cal:agua se requiere poder saber la cantidad de cal que estoy agregando al hidratador con relación a la cantidad de agua agregada. Actualmente la planta de cal N°1 no posee medidor de flujo másico de cal; flujo volumétrico de agua, ni tampoco de temperatura de agua de alimentación como lo hay para la planta de cal N°2, es por esto que los datos de la sección 5.1.2 solo se encuentran disponibles para la planta de cal N°2, esta deficiencia en instrumentación hacen que su método de control de preparación sea aún más deficiente que el de la planta de preparación N°2, por ende hasta que no exista este tipo de instrumentación en esta planta, no es posible controlar la preparación de lechada manteniendo la razón cal:agua.

- Actualización e instrumentación válvulas de adición de lechada de cal

Esta actualización es considerada crítica, ya que es debido al método de adición actualmente utilizado no es posible la generación de data estadística para segmentar el consumo por línea de trabajo y más aún, poder utilizar estos datos junto el pH de trabajo y la variación en el tipo de alimentación para generar un modelo en base a data operacional. Actualmente el tipo de válvula utilizada para la adición de lechada de cal (Figuras N°20-23, sección 2.3) son válvulas de la compañía Bray Controls, serie 92/93 con actuador automático (Figura N°77); esta

válvula permite la adición continua y manipulación de la abertura de adición, sin embargo, estas válvulas no poseen lector de flujo másico/volumétrico, por ende, no permite realizar una transformación para saber específicamente los gramos de lechada de cal adicionada al sistema. La implementación de lectores de flujo másico/volumétrico por línea de trabajo permitiría realizar una estimación mucho más confiable que la obtenida actualmente, además de permitir la identificación temprana de sobreconsumos en alguna de las líneas de trabajo, cosa que actualmente no es posible y que ya ha generado problemas. Mas aun permite la generación de data operacional que permitiría eventualmente unir el consumo a la mineralogía de alimentación, el pH, tratamiento.



Figura N° 77 Válvula de adición de lechada de cal utilizada actualmente en planta concentradora DAND.

Finalmente, una recomendación desde la parte operacional acotada por don Mario Castañeda y Cristian Fernández, es la evaluación de los hidratadores de cal, ellos señalaron que en la operación el rechazo de cal sigue reaccionando, aun cuando se ha completado el tiempo de trabajo, esto se atribuye a la poca mantención interna de los hidratadores de cal, debido a esto existen incrustaciones que posiblemente disminuya el volumen útil y por ende el tiempo de residencia dentro del reactor, lo que ocasiona que la cal viva no posea el tiempo suficiente para reaccionar completamente (Coloma, 2008).

6 CONCLUSIONES

En torno a la factibilidad de realización de un modelo en base a data operacional:

No es posible la realización de un modelo en base a data operacional debido a la forma de adición y control de reactivo, junto con la poca data relacionada al tema (solo datos a nivel planta mensual), obteniendo resultados pobres mediante análisis multivariable.

El modelo generado en base a datos escala laboratorio, si bien genera resultados relativamente coherentes, es una herramienta que según lo discutido permite la predicción el IP de cal según la muestra a tratar y a escala laboratorio, sin embargo, no permite estimar el consumo en un periodo de tiempo largo, ya que depende tanto de las muestras de agua, como de las muestras de mineral y lechada, las cuales cambian a través del tiempo.

En torno al análisis cualitativo y cuantitativo

La variable cualitativa que posee impacto directo en el consumo de cal es la calidad química del agua utilizada en el proceso, agua con una alta cantidad de iones HCO_3^- , Mg^{2+} y Ca^{2+} produce un efecto de sobreconsumo por precipitación y efecto buffer, similar al uso de agua de mar, agua que en planta es conocida como agua haulage, más aun, también genera problemas en los resultados metalúrgicos, con aumento de recuperación de ganga insoluble y disminución de recuperación de cobre y molibdeno.

Se concluye que el mayor impacto en la preparación de lechada de cal de buena calidad es función de la calidad del agua suministrada, la cantidad y la temperatura, obtenido los mejores resultados con una razón cal agua 1:3 (100 gramos de cal y 300 mL de agua), una temperatura de 25°C o cercana a esta y con agua con la menor concentración de iones como HCO_3^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} .

Con respecto al funcionamiento de la planta de cal

De lo documentado y discutido anteriormente, se concluye que el funcionamiento de ambas plantas de preparación de lechada dista ampliamente de su operación óptima, con la ausencia de lectores de flujo masivo/volumétrico ni control de la temperatura de alimentación del agua, método de control de preparación de

lechada deficientes y finalmente control de adición de lechada a la sección molienda-flotación no adecuado, las cuales impactan tanto en el control de insumo como en la óptima utilización de este.

7 RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del tema se realizan las siguientes recomendaciones

- Implementar método de calefacción al agua de alimentación a los hidratadores N°1,2,4 y 5 de las plantas de cal N°1-2.
- Cambiar la metodología de control de la preparación de lechada de cal a uno que mantenga la razón cal:agua en 1:3.
- Implementación de lectores de flujo masivo/volumétrico en los puntos de adición de lechada de cal a las secciones de molienda-flotación.
- Control químico diario o semanal del agua (haulage, fresca, recuperada) de alimentación tanto a proceso de flotación como al de adición de agua a las plantas de preparación de lechada de cal, con especial enfoque en:
 - I. Ion HCO_3^-
 - II. Ion SO_4^{2-}
 - III. Ion Mg^{2+}
 - IV. Ion Ca^{2+}
- Evaluar la mejora en la disponibilidad técnica de la empresa colaboradora encargada de realizar análisis químico, en específico exigir la implementación de métodos para determinar los iones antes mencionados.
- Mejorar sistema de control de calidad de cal viva que ingresa a las plantas de cal.
- Evaluar la mejora de estanques de hidratación planta de cal N°1.

8 BIBLIOGRAFIA

Ahmed, S. and Van Cleave, A., 1965. Adsorption and flotation studies with quartz: Part I. Adsorption of calcium, hydrogen and hydroxyl ions on quartz. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 43(1), pp.23-26.

Álvarez Huguez, M., 2016. Interacción agua/roca y controles fisicoquímicos sobre el procesamiento de minerales en las celdas de flotación; Efecto iones aluminio, calcio y magnesio. Magister. Universidad de Chile.

Baum, W., 2014. Ore characterization, process mineralogy and lab automation a roadmap for future mining. *Minerals Engineering*, 60,69-73.

Brady, P., Papenguth, H. and Kelly, J., 1999. Metal sorption to dolomite surfaces. *Applied Geochemistry*, 14(5), pp.569-579.

Bruckard, W., Sparrow, G. and Woodcock, J., 2011. A review of the effects of the grinding environment on the flotation of copper sulphides.

Candia Castro, A., 2016. ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA DE LA MOLIENDA SAG MEDIANTE DATA OPERACIONAL, GEOLÓGICA Y TEST DE MOLIENDABILIDAD SAG, CODELCO DIVISIÓN ANDINA. Trabajo de Titulo, Universidad de Concepción.

Cárdenas Díaz, R., 2014. ESTUDIO PARA DISMINUIR CONSUMO DE CAL EN PLANTA CONCENTRADORA CODELCO ANDINA. Proyecto de Titulo. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Castro, S. "Challenges in Flotation of Cu-Mo sulfide ores in Sea Water"., *Mineral Processing (J. Drelich, Ed), Proc. Of the First International Symposium, USA, 2012.*

Castro, S., 2018. Flotación Fundamentos y Aplicaciones [Ebook] (1st ed., pp. 77-84). Concepción, Región del Bio-Bio: Sergio Castro.

Castro, S., Lopez-Valdivieso, A. and Laskowski, J., 2016. Review of the flotation of molybdenite. Part I: Surface properties and floatability. *International Journal of Mineral Processing*, 148, pp.48-58.

Chemco Systems, L.P., 1999. An Overview Of Lime Slaking And Factors That Affect The Process.

Chemed, Y., Deneele, D., Christidis, G., & Ouvrard, G., 2015. Influence of hydrated lime on the surface properties and interaction of kaolinite particles. *Applied Clay Science*, 107, 1-13.

Chen, G., & Tao, D., 2004. Effect of solution chemistry on flotability of magnesite and dolomite. *International Journal Of Mineral Processing*, 74(1-4), 343-357.

CODELCO., 2018. "Memoria Anual 2017", Santiago, 2018.

Coloma Alvarez, G., 2008. La cal es un reactivo químico!. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum rama Los Andes (CIM Los Andes) A.G.: Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.

Cruz, N., Peng, Y., Wightman, E., & Xu, N., 2015. The interaction of clay minerals with gypsum and its effects on copper-gold flotation. *Minerals Engineering*, 77, 121-130.

D. C. Montgomery & G. C. Runger., 1996. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería (4th ed.). Mexico: Mcgraw-Hill.

Spiess Gómez, F, 2017., "DISTRIBUCIÓN Y OCURRENCIA DE MERCURIO EN EL YACIMIENTO TIPO PORFIDO COBRE-MOLIBDENO RÍO BLANCO, REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE", Trabajo de Titulo, Universidad de Chile.

Factors Affecting Quick Lime Consumption in Dry FGD, M. Hassibi. Chemco Systems L.P.

Goñi, C., 2012. Presentaciones curso de "Aplicaciones de Software en Ingeniería". Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

Gutierrez. L., 2017. "Fundamentos Fisicoquímicos y Reactivos de Flotación" (Clases), Universidad de Concepción, Concepción, Región del Bio-Bio.

Hariani, P., Salni, S., & Riyanti, F. (2017). Combination of CaCO_3 and Ca(OH)_2 as agents for treatment acid mine drainage. *MATEC Web Of Conferences*, 101, 02004.

Hassibi, M., & Singh, I., 2014. LA PREPARACIÓN DE LA LECHADA DE CAL Y SU IMPACTO EN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE FLOTACIÓN Y COSTO DE OPERACIÓN. Lecture, International Congress of Minerals Flotation – agosto 2014 - Lima Perú.

Hassibi, M., 1999. UNA PERSPECTIVA GENERAL DEL APAGADO DE LA CAL Y LOS FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO. EN: 3er Symposium Internacional Sorbalit

Hecker Electroquímica Industrial S.A., 2012. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE PREPARACIÓN Y ADICIÓN DE LECHADA DE CAL Y CONTROL DE pH EN PLANTA CONCENTRADORA. Santiago de Chile: Hecker Electroquímica Industrial S.A.

Hernández Vera, M., 1995. La Cal en la metalurgia extractiva. Antofagasta: Universidad Católica del Norte, pp.106-107.

Irving, L., 1926. The Precipitation of Calcium and Magnesium from Sea Water. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 14(02), p.441.

JIANG, K., SUN, T., SUN, L., & LI, H., 2006. Adsorption characteristics of copper, lead, zinc and cadmium ions by tourmaline. Journal Of Environmental Sciences, 18(6), 1221-1225.

K.P. Ananthapadmanabhan and P. Somasundaran., 1985. Surface Precipitation of Inorganic and Surfactants and Its Effect on Flotation, Colloids Surfaces, 13, pp. 151-167.

Laskowski, J. and Castro, S., 2015. Flotation in concentrated electrolyte solutions. International Journal of Mineral Processing, 144, pp.50-55.

Laskowski, J. S., Castro, S., & Ramos, O., 2014. Effect of seawater main components on frothability in the flotation of Cu-Mo sulfide ore. Physicochemical Problems of Mineral Processing; ISSN 2083-3989.

Lide, D., 2006. CRC handbook of chemistry and physics, 2006-2007. 87th ed. Boca Raton, FL: CRC Press.

Liu, A., Ni, W., & Wu, W., 2007. Mechanism of separating pyrite and dolomite by flotation. Journal Of University Of Science And Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 14(4), 291-296.

MicGale, 2018. "INFORME DE MODELO E INVENTARIO DE RECURSOS GEOLÓGICOS 2017 DIVISIÓN ANDINA". Los Andes, CODELCO.

Morales, B., 2003. "SERVICIO DE CAPACITACIÓN OPERACIONAL" MANUAL INSTRUCCIONAL CURSO PLANTA DE CAL NUEVA, Los Andes.

Morales, F., 2017. ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS INTERACCIONES DEL SISTEMA 'AGUA DE MAR-CAL' EN PROCESAMIENTO DE MINERALES. Magister. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Ozkan, A., Ucbeyiay, H., Duzyol, S., 2008. Comparison of stages in oil agglomeration process of quartz with sodium oleate in the presence of Ca(II) and Mg(II) ions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 329: 81–88.

Sansone, F., 2012. Carbon Dioxide, Alkalinity and pH (Clases). Universidad de Hawaii at Manoa. Honolulu. Hawaii.

Santos Jallath, J., 2014. El drenaje Ácido de Mina; Criterios de manejo para prevenir la afectación de acuíferos. [PDF] Segundo Curso sobre soluciones a la contaminación de suelos y acuíferos. UNAM

Seco Aguirre, D., 2017. Caracterización y optimización de columnas de flotación 5 y 6, Codelco Chile, División Andina. Trabajo de Titulo. Universidad de Santiago de Chile

TORO, J. C.; ORTÚZAR, J.; ZAMORANO, J.; CUADRA, P.; HERMOSILLA, J. y SPRÖHNLE, C., 2012. Protracted magmatic-hydrothermal history of the Río Blanco-Los Bronces district, Central Chile: development of world's greatest known concentration of copper. *Society of Economic Geologists, Special Publication*. Vol. 16: p. 105-126.

Veki, L., 2014. The use of seawater as process water in concentration plant and the effects on the flotation performance of Cu-Mo ore. Retrieved from <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-20140115101>

Zhang, X., & Wu, R., 2013. Study on Zeta Potential of Micron-Size Tourmaline Powders. *Advanced Materials Research*, 785-786, 395-399.

9 ANEXOS

9.1 Filtro datos IP histórico

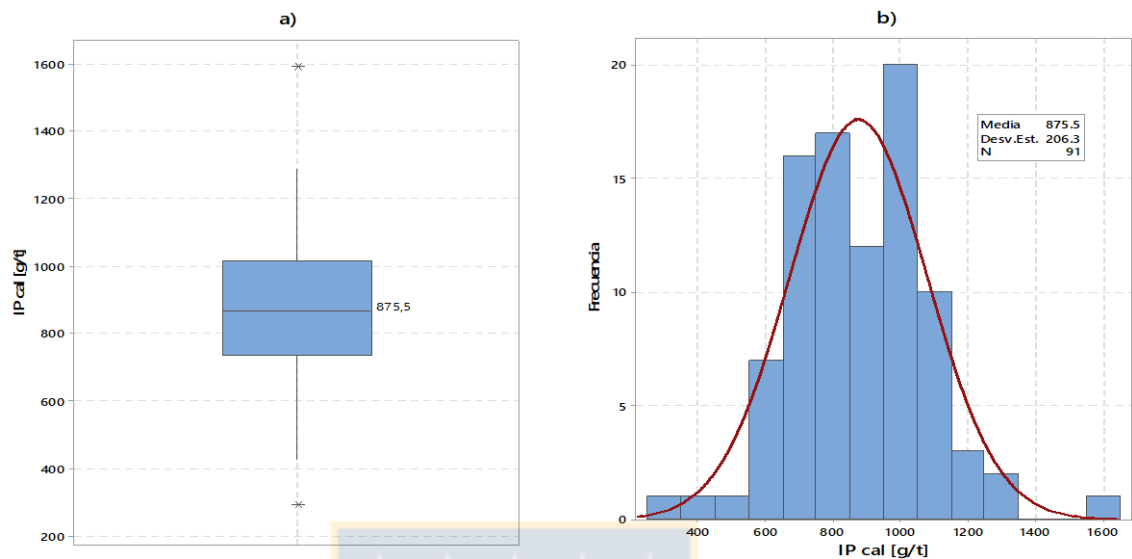


Figura N° 78 Análisis de dispersión y comportamiento atípico antes de filtro para datos de IP de cal histórico a nivel planta.

a) Caja y Bigotes b) Histograma con ajuste normal.

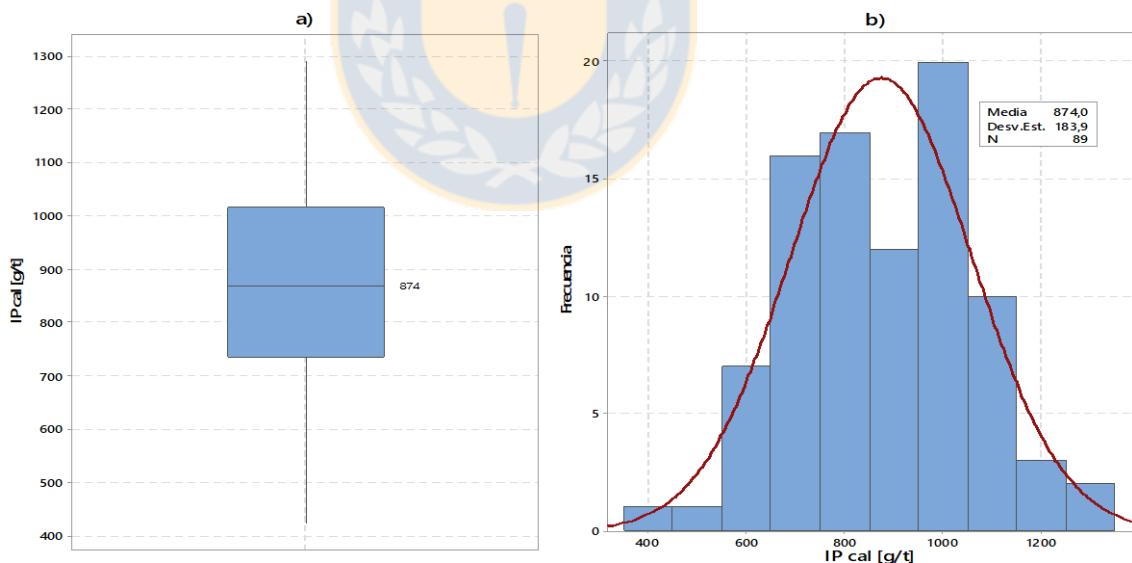


Figura N° 79 Análisis de dispersión y comportamiento atípico después de filtro para datos de IP de cal histórico a nivel planta.

a) Caja y bigotes; b) Histograma con ajuste normal.

9.2 Comportamiento pH natural

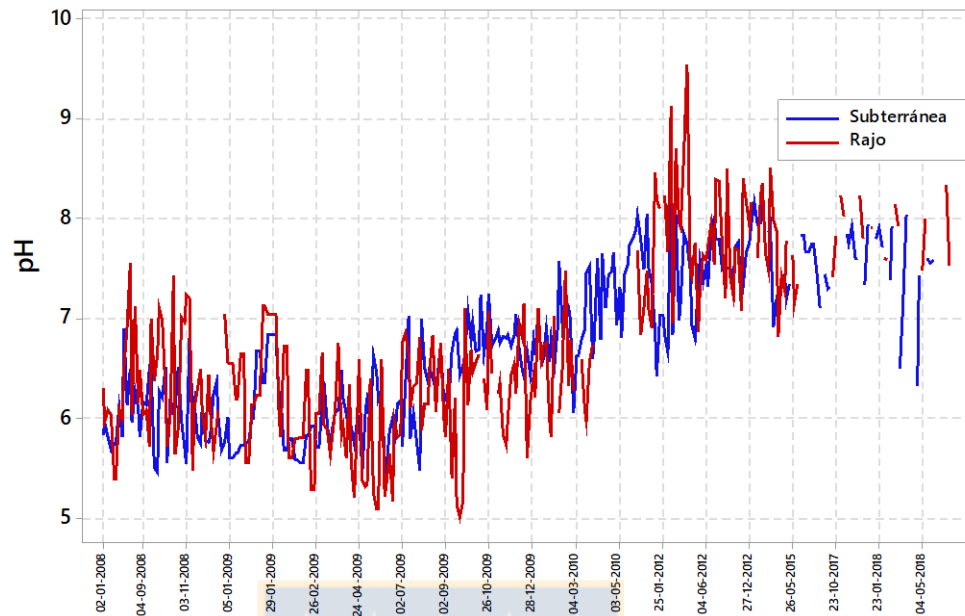


Figura N° 80 Variación histórica pH natural mineral línea rajo y subterránea.

Tabla N° 20 Promedio anual según la data disponible en torno al pH natural de la muestra.

Año	Convencional	SAG	Año	Convencional	SAG
2008	6.03	6.34	2015	7.35	7.4
2009	6.27	6.15	2016	7.74	Sin Datos
2010	7.17	6.68	2017	7.52	7.95
2012	7.41	7.90	2018	7.47	7.88
2013	7.64	7.78			

9.3 Requerimientos cal viva SIBELCO requeridas por contrato

a) Descripción breve

Codelco requiere el suministro de Cal Viva entregada en los buzones de descarga de la planta perteneciente a la División Andina de Codelco.

b) Especificaciones del producto

Cal Viva Molida para Planta

I. Ley del Producto

86% CaO útil (libre) promedio quincenal. Bajo 80% se considera indeseable para el proceso, se recibe, pero no se paga.

La ley de CaO libre deberá ser medida de acuerdo con la norma ASTM C25.

II. Granulometría

Máximo 100% bajo 3 mm.

c) Aseguramiento de la calidad

I. Inspección

Codelco se reserva el derecho de efectuar inspecciones durante la fabricación del producto, para verificar su conformidad respecto a lo indicado en la Especificación Técnica.

La inspección del proceso de fabricación se hará por la persona u organismo que Codelco designe para este objeto (en adelante el Inspector), pudiendo delegar su facultad inspectora, en alguna oficina técnica oficial o particular, que se ocupe de la inspección de calidad en fábrica.

La inspección abarcará cualquier aspecto que tenga relación con la calidad de los bienes adquiridos como proceso de extracción, calcinación, transporte, almacenamiento, aseguramiento de la calidad, envasado y despachado.

d) Certificado de calidad

Durante la vigencia del contrato el producto suministrado deberá ser respaldado por un certificado de calidad del producto otorgado por un laboratorio el que debe incluir al menos la composición química, granulometría característica, 2 muestras

representativas de la carga contenida en el camión y certificado de origen por cada lote (camión), desde la última instalación o acopio del material previo a ser enviado a la división. Dicha certificación debe realizarse bajo la norma ASTM C25

Para verificar el cumplimiento de la especificación la división realizará el análisis de la cal en base a:

Muestreo de camiones. La división realizará el muestreo a cada camión ingresado de acuerdo con el procedimiento definido por la división.

De cada muestreo se generarán 3 muestras las cuales tendrán como fin:

- i. Análisis químico de acuerdo con norma ASTM C25
- ii. Perfil granulométrico
- iii. Testigo

e) **Laboratorio arbitral**

En caso de que se presenten diferencias entre los resultados del laboratorio DAND y del laboratorio de la empresa proveedora de Cal, se deberán analizar las muestras que se dejan almacenadas y de persistir estas discrepancias se deberá llegar a la instancia de un Laboratorio Arbitral que será elegido de común acuerdo entre ambas partes y sus resultados no serán apelables.

El laboratorio será contratado y pagado por quien esté más lejano al resultado entregado por el ente arbitral.

9.4 Arreglo datos QUEMSCAM junto con tratamiento

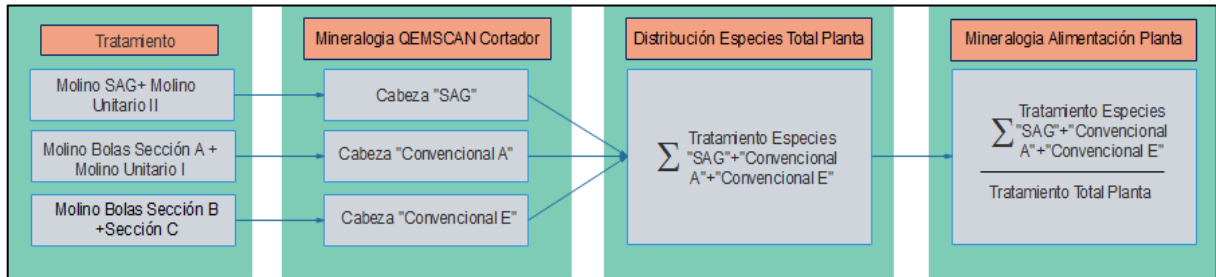


Figura N° 81 Distribución del arreglo para la formulación de una aproximación lineal al IP de cal.

9.5 Distribución mineralógica DAND

Tabla N° 21 Distribución Mineralógica de alimentación DAND.

Minerales					
Calcopirita	Tetrahedrita	Otros Sulfuros	Feldespato Potásico	caolinita	Dolomita/ Ankerita
Bornita	Bournonita	Magnetita-Hematita	Plagioclasa-Albita	Montmorillonita	Siderita (Mn)
Covelina	Seligmanita	Goethita(Al)-Harrisonita	Epidota-Zoisita	Otras Arcillas	Yeso-Anhidrita
Calcosina	Esfalerita	Rutilo	Turmalina	Cloritas	Jarosita
Tennantita/Enargita	Arsenopirita	Ilmenita	Anfíbola	Circón	Otros Sulfatos
Tenantita	Molibdenita	Cuarzo	Sericita-Moscovita	Titanita/Esfeno	Apatita
Enargita	Galena	Pirita	Biotita	Calcita	Otros Fosfatos

9.6 Composición histórica agua haulage

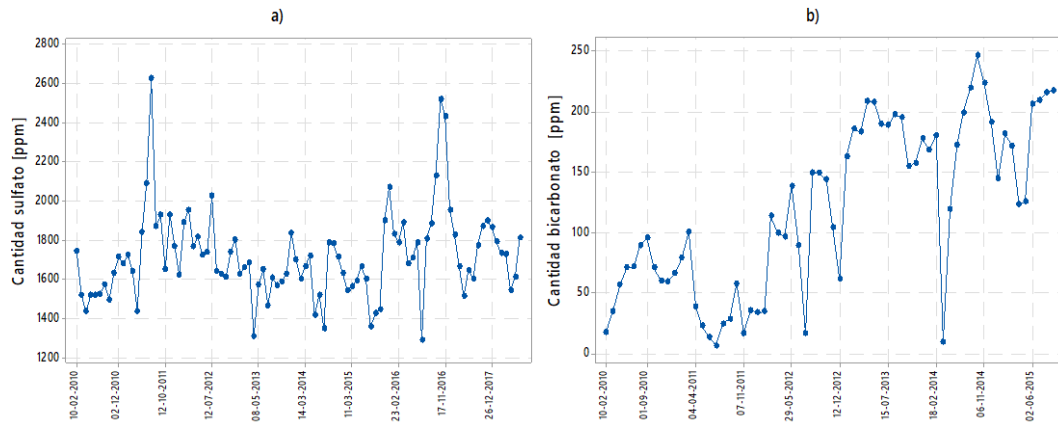


Figura N° 82 Composición histórica agua haulage.
a) ion SO_4^{2-} ; b) ion HCO_3^- .

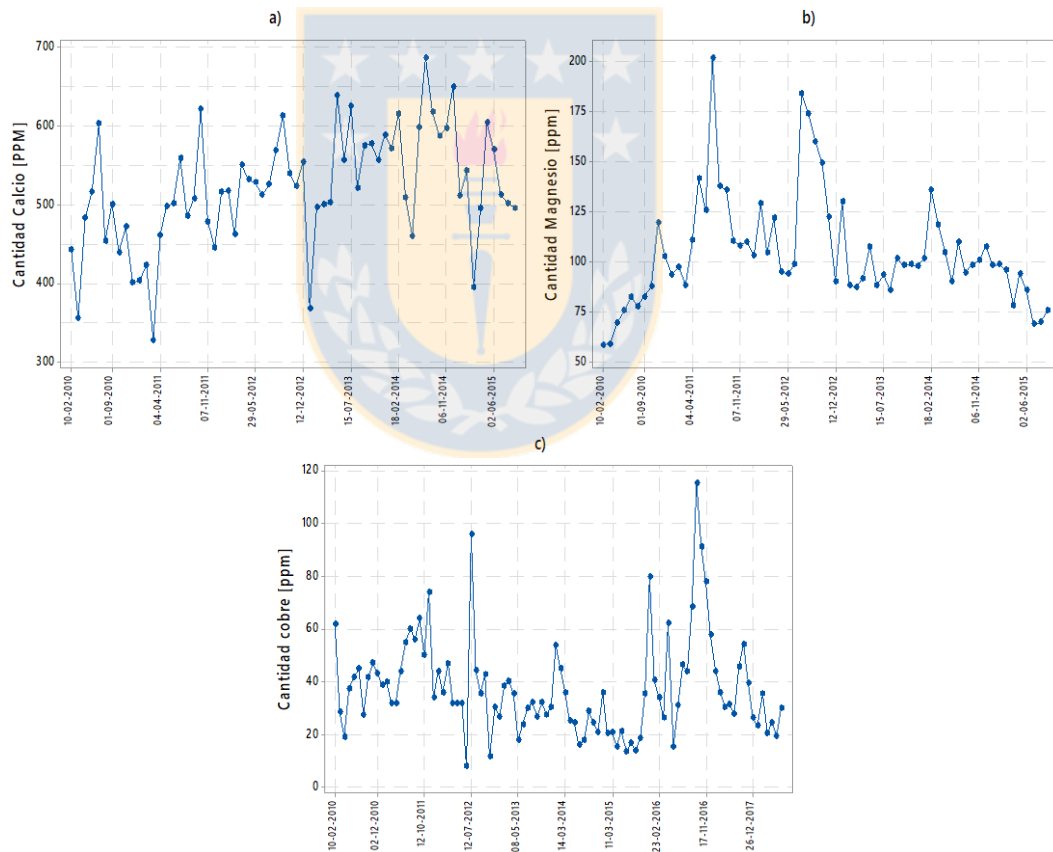


Figura N° 83 Composición histórica agua haulage.
a) ion Ca^{2+} ; b) ion Mg^{2+} ; c) ion Cu^{2+} .

9.7 Condiciones de precipitación elementos agua haulage

I. Magnesio

$$K_{ps} (\text{Mg}(\text{OH})_2, 25^\circ\text{c}) = 1.20 * 10^{-11}$$

$$\text{Mg}^{2+} [\text{mol/l}] = 3.95 * 10^{-3}$$

Por lo tanto, pH mínimo requerido para la precipitación del $\text{Mg}(\text{OH})_2$:

$$\text{pH} = 9.74$$

II. Calcio

$$K_{ps} (\text{Ca}(\text{OH})_2, 25^\circ\text{c}) = 5.02 * 10^{-6}$$

$$\text{Ca}^{2+} [\text{mol/l}] = 1.77 * 10^{-2}$$

Por lo tanto, pH mínimo requerido para la precipitación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$:

$$\text{pH} = 12.22$$

9.8 Condiciones de precipitación de sulfato de calcio pruebas de reactividad de cal

$$K_{ps} (\text{CaSO}_4, 25^\circ\text{c}) = 4.93 * 10^{-5}$$

$$\text{SO}_4^{-2} [\text{mol/l}] = 0.0117$$

Por lo tanto, la concentración mínima requerida para la precipitación de sulfato de calcio:

$$\text{Ca}^{2+} [\text{mol/l}] = 0.00214$$

Utilizando la solubilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y un pH de lechada producida de 12:

$$K_{ps} (\text{Ca}(\text{OH})_2, 25^\circ\text{c}) = 5.02 * 10^{-6}$$

$$\text{OH}^- [\text{mol/l}] = 0.01$$

$$\text{Ca}^{2+} [\text{mol/l}] = 0.05$$

Por lo tanto, es posible la precipitación de CaSO_4 en el proceso de hidratación de cal utilizando agua recuperada.

9.9 Análisis económico hidratación de cal viva.

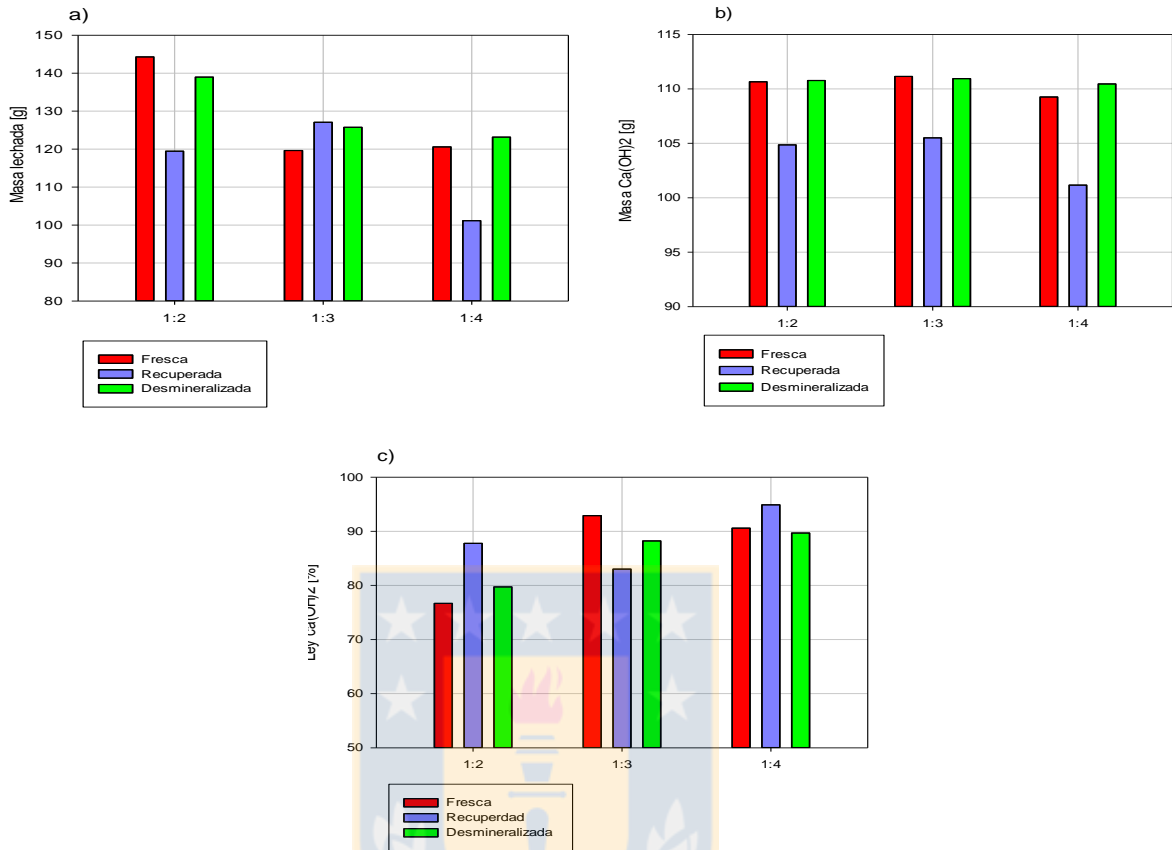


Figura N° 84 Resultados balance de masa reactividad de cal para la determinación de calidad de lechada.

a) Masa de Lechada de Cal; b) Masa de $Ca(OH)_2$; c) Ley de $Ca(OH)_2$ lechada de cal.

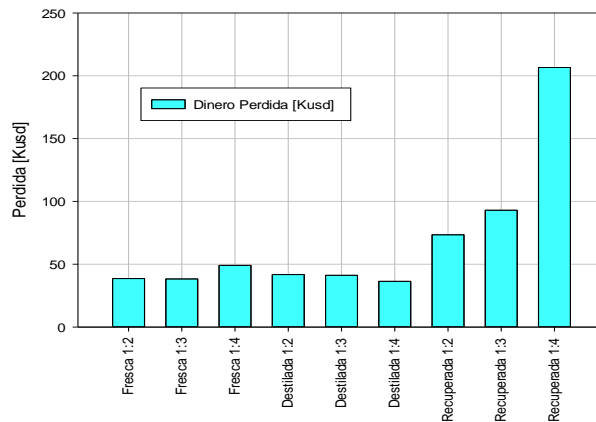


Figura N° 85 Perdida en miles de dólares por concepto de rechazo en el proceso de hidratación de cal, Precio: 0.205 [kusd/t], Masa[t]=2452.07.

9.10 Arreglo calculo IP cal

Variable:

Tabla N° 22 Datos escala laboratorio de IP de cal por la línea de trabajo, pH y tipo de agua utilizada

$IP_1 = \text{IP línea rajo, agua haulage, 10.5}$	$IP_5 = \text{IP línea rajo, agua haulage, 12.2}$
$IP_2 = \text{IP línea subterránea, agua haulage, 10.5}$	$IP_6 = \text{IP línea subterránea, agua haulage, 12.2}$
$IP_3 = \text{IP línea rajo, agua recuperada, 10.5}$	$IP_7 = \text{IP línea rajo, agua recuperada, 12.2}$
$IP_4 = \text{IP línea subterránea, agua recuperada, 10.5}$	$IP_8 = \text{IP línea subterránea, agua recuperada, 12.2}$
$X_1 = \frac{\text{Flujo de agua haulage línea sag}}{\text{Flujo total de agua línea sag}}$	$X_2 = \frac{\text{Flujo de agua recuperada línea sag}}{\text{Flujo total de agua línea sag}}$
$X_3 = \frac{\text{Flujo de agua haulage línea convencional}}{\text{Flujo total de agua línea convencional}}$	$X_4 = \frac{\text{Flujo de agua recuperada línea convencional}}{\text{Flujo total de agua línea convencional}}$
$Tpm_{\text{Cleaner,r}} = Tpm_{\text{Rajo}} * \text{Rec Peso}_{\text{Rougher}}$	$Tpm_{\text{Cleaner,s}} = Tpm_{\text{subterránea}} * \text{Rec Peso}_{\text{Rougher}}$
$X_{\text{Rajo}} = \frac{Tpm \text{ Rajo}}{Tpm \text{ Total planta}}$	$X_{\text{subterránea}} = \frac{Tpm \text{ subterránea}}{Tpm \text{ Total planta}}$

Comenzando por

$$\text{Cal[g]} = \{\text{Cal Rougher}\} + \{\text{Cal cleaner}\} \quad (15)$$

$$\text{Cal Rougher} = (\text{Cal Ro Sag} + \text{Cal Ro Convencional}) \quad (16)$$

$$\text{Cal Cleaner} = (\text{Cal Cleaner Sag} + \text{Cal Cleaner Convencional}) \quad (17)$$

Siguiendo el esquema de la figura N°71, junto al esquema de la figura N°15, se tiene que

$$\text{Cal Rougher} = \{((IP_1 * X_1 + IP_3 * X_2) * Tpm_{\text{Rajo}} + (IP_2 * X_3 + IP_4 * X_4) * Tpm_{\text{Subterránea}})\}$$

$$\text{Cal Cleaner} = \{((IP_5 * X_1 + IP_7 * X_2) * Tpm_{\text{cleaner,r}} + (IP_6 * X_3 + IP_8 * X_4) * Tpm_{\text{cleaner,s}})\}$$

Por lo tanto, tomando la siguiente notación

$$\mathbf{IPG_1} = (IP_1 * X_1 + IP_3 * X_2) \quad (18)$$

$$\mathbf{IPG}_2 = (\mathbf{IP}_2 * \mathbf{X}_3 + \mathbf{IP}_4 * \mathbf{X}_4) \quad (19)$$

$$\mathbf{IPG}_3 = (\mathbf{IP}_5 * \mathbf{X}_1 + \mathbf{IP}_7 * \mathbf{X}_2) \quad (20)$$

$$\mathbf{IPG}_4 = (\mathbf{IP}_6 * \mathbf{X}_3 + \mathbf{IP}_8 * \mathbf{X}_4) \quad (21)$$

Reemplazando las ecuaciones (16) y (17) en la ecuación (15) y tomando en cuenta la notación de las ecuaciones (18); (19); (20) y (21) para finalmente dividir cada lado de la ecuación por el tratamiento total de planta, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\mathbf{IP}_{\text{TOTAL PLANTA}} = \mathbf{IPG}_1 * X_{\text{Rajo}} + \mathbf{IPG}_2 * X_{\text{subterránea}} + \mathbf{IPG}_3 * X_{\text{Rajo}} * \text{Rec Peso}_{\text{Rougher}} + \mathbf{IPG}_4 * X_{\text{subterránea}} * \text{Rec Peso}_{\text{Rougher}}$$

La cual da una aproximación lineal al IP de cal a nivel planta en función tanto de datos operacionales como datos de laboratorio.



9.11 Datos pruebas de flotación calidad de agua

Tabla N° 23 Ley de concentrado pruebas de flotación y consumo de reactivo línea rajo.

Agua	pH	Ley				
		Cobre [%]	Hierro [%]	Molibdeno [%]	Arsénico [%]	Insoluble [%]
Recuperada	10.5	5.77	12.50	0.121	0.044	51.70
Recuperada	10.5	5.49	12.50	0.119	0.041	52.20
Fresca	10.5	5.62	12.70	0.121	0.042	50.79
Fresca	10.5	5.76	13.10	0.124	0.045	51.76
Haulage	10.5	4.92	11.60	0.098	0.037	54.00
Haulage	10.5	5.35	12.30	0.107	0.036	52.90
Recuperada	12.2	4.72	9.80	0.093	0.032	59.00
Recuperada	12.2	4.59	9.70	0.091	0.031	57.90
Fresca	12.2	5.24	9.20	0.109	0.038	60.60
Fresca	12.2	6.10	10.20	0.123	0.044	58.30
Haulage	12.2	4.96	8.80	0.096	0.036	59.20
Haulage	12.2	4.99	8.70	0.099	0.038	59.60

Tabla N° 24 Masa de concentrado y cola pruebas de flotación y consumo de reactivo línea rajo.

Agua	pH	Concentrado [g]	Cola [g]
Recuperada	10.5	133.8	1046.2
Recuperada	10.5	140.2	1039.8
Fresca	10.5	139.3	1040.7
Fresca	10.5	134.3	1045.7
Haulage	10.5	159.3	1020.7
Haulage	10.5	142.8	1037.2
Recuperada	12.2	166.0	1014.0
Recuperada	12.2	172.0	1008.0
Fresca	12.2	150.8	1029.2
Fresca	12.2	135.8	1045.0
Haulage	12.2	155.7	1024.3
Haulage	12.2	155.0	1025.0

Tabla N° 25 Recuperación pruebas de flotación y consumo de reactivo línea rajo.

Agua	pH	Recuperación					
		Peso [%]	Cobre [%]	Hierro [%]	Molibdeno [%]	Arsénico [%]	Insoluble [%]
Recuperada	10.5	11.34	89.02	38.08	69.62	84.91	7.35
Recuperada	10.5	11.88	89.27	40.27	68.85	84.68	7.90
Fresca	10.5	11.80	89.71	40.00	73.40	85.25	7.60
Fresca	10.5	11.38	89.49	39.61	72.96	85.46	7.34
Haulage	10.5	13.50	90.25	43.00	71.82	85.24	9.31
Haulage	10.5	12.10	90.54	40.38	71.06	83.21	8.21
Recuperada	12.2	14.07	91.26	37.27	68.50	83.97	10.63
Recuperada	12.2	14.58	91.80	38.00	68.93	84.10	10.73
Fresca	12.2	12.78	91.21	31.00	69.53	84.77	9.79
Fresca	12.2	11.44	91.52	30.52	69.42	85.04	8.43
Haulage	12.2	13.19	88.28	30.84	64.59	84.55	9.92
Haulage	12.2	13.14	89.03	30.48	62.45	85.18	9.88

Tabla N° 26 Ley de concentrado pruebas de flotación y consumo de reactivo línea subterránea.

Agua	pH	Cobre [%]	Hierro [%]	Molibdeno [%]	Arsénico [%]	Insoluble [%]
Recuperada	10.5	3.90	10.50	0.10	0.04	55.50
Recuperada	10.5	3.87	10.60	0.10	0.03	55.60
Fresca	10.5	4.27	10.80	0.10	0.04	56.40
Fresca	10.5	4.74	11.50	0.12	0.04	54.70
Haulage	10.5	3.69	9.80	0.09	0.03	58.50
Haulage	10.5	3.34	9.30	0.09	0.03	60.30
Recuperada	12.2	3.18	6.70	0.07	0.03	65.30
Recuperada	12.2	2.93	6.50	0.10	0.04	56.40
Fresca	12.2	4.13	7.20	0.10	0.04	63.50
Fresca	12.2	4.03	7.20	0.09	0.04	63.00
Haulage	12.2	2.64	6.60	0.07	0.02	69.20
Haulage	12.2	2.56	6.40	0.06	0.02	56.50

Tabla N° 27 Masa de concentrado y cola pruebas de flotación y consumo de reactivo línea subterránea.

Agua	pH	Concentrado [g]	Cola [g]
Recuperada	10.5	182.9	997.1
Recuperada	10.5	180.9	999.1
Fresca	10.5	167.6	1012.4
Fresca	10.5	150.9	1029.1
Haulage	10.5	190.7	989.3
Haulage	10.5	208.8	971.2
Recuperada	12.2	239.4	940.6
Recuperada	12.2	250.0	930.0
Fresca	12.2	184.7	995.3
Fresca	12.2	186.5	993.5
Haulage	12.2	270.6	909.4
Haulage	12.2	290.1	889.9

Tabla N° 28 Recuperación pruebas de flotación y consumo de reactivo línea rajo.

Agua	pH	Peso [%]	Cobre [%]	Hierro [%]	Molibdeno [%]	Arsénico [%]	Insoluble [%]
Recuperada	10.5	15.50	83.54	42.55	66.41	76.75	11.15
Recuperada	10.5	15.33	82.66	42.47	68.93	73.09	11.04
Fresca	10.5	14.20	84.37	41.70	74.16	75.39	9.91
Fresca	10.5	12.79	84.35	39.34	73.76	75.92	8.95
Haulage	10.5	16.16	83.16	43.04	67.70	76.08	11.80
Haulage	10.5	17.69	82.44	42.55	68.01	76.33	13.33
Recuperada	12.2	20.29	88.80	37.85	72.36	77.46	16.98
Recuperada	12.2	21.19	85.46	35.32	66.34	77.75	17.92
Fresca	12.2	15.65	88.05	28.82	71.79	76.46	12.54
Fresca	12.2	15.81	87.41	29.69	71.60	77.16	12.34
Haulage	12.2	22.93	84.69	41.22	72.81	78.19	20.03
Haulage	12.2	24.58	85.81	42.70	81.64	76.75	18.38

9.12 **Datos pruebas de calidad y cantidad de agua en la reactividad de cal y consumo de lechada.**

Tabla N° 29 Ley de concentrado pruebas en función de lechada de cal a distinta cantidad y calidad de agua.

Lechada	Agua	Cobre [%]	Hierro [%]	Molibdeno [%]	Arsénico [%]	Insoluble [%]
1:2	Fresca	6.11	16.10	0.057	0.017	46.40
1:2	Fresca	5.34	15.40	0.046	0.017	49.90
1:3	Fresca	5.23	14.70	0.046	0.015	51.10
1:3	Fresca	5.82	16.00	0.051	0.017	48.00
1:4	Fresca	5.65	15.70	0.046	0.016	48.90
1:4	Fresca	5.35	15.10	0.048	0.016	50.80
1:2	Recuperada	5.34	14.20	0.043	0.024	50.90
1:2	Recuperada	5.33	14.60	0.044	0.022	50.40
1:3	Recuperada	6.03	16.00	0.048	0.026	46.60
1:3	Recuperada	5.89	15.60	0.046	0.024	47.30
1:4	Recuperada	5.51	14.60	0.044	0.024	49.40
1:4	Recuperada	5.74	15.10	0.046	0.025	47.60
1:2	Desmineralizada	5.15	13.70	0.040	0.023	51.20
1:2	Desmineralizada	5.44	14.40	0.042	0.022	49.90
1:3	Desmineralizada	6.35	16.40	0.049	0.034	44.90
1:3	Desmineralizada	6.35	16.20	0.050	0.033	45.40
1:4	Desmineralizada	5.88	15.40	0.044	0.025	47.60
1:4	Desmineralizada	6.11	15.90	0.049	0.029	47.90

Tabla N° 30 Masa de concentrado y cola de pruebas en función de lechada de cal a distinta cantidad y calidad de agua.

Lechada	Agua	Concentrado [g]	Cola [g]
1:2	Fresca	152.20	1027.80
1:2	Fresca	153.90	1026.10
1:3	Fresca	157.70	1022.30
1:3	Fresca	144.40	1035.60
1:4	Fresca	146.10	1033.90
1:4	Fresca	157.30	1022.70
1:2	Recuperada	152.40	1027.60
1:2	Recuperada	149.00	1031.00
1:3	Recuperada	135.90	1044.10
1:3	Recuperada	140.00	1040.00
1:4	Recuperada	147.40	1032.60
1:4	Recuperada	144.00	1036.00
1:2	Desmineralizada	163.80	1016.20
1:2	Desmineralizada	156.90	1023.10
1:3	Desmineralizada	129.90	1050.10
1:3	Desmineralizada	129.20	1050.80
1:4	Desmineralizada	145.60	1034.40
1:4	Desmineralizada	138.40	1041.60

Tabla N° 31 Recuperación pruebas en función de lechada de cal a distinta cantidad y calidad de agua.

Lechada	Agua	Peso [%]	Cobre [%]	Hierro [%]	Molibdeno [%]	Arsénico [%]	Insoluble [%]
1:2	Fresca	12.90	87.86	40.52	67.848	71.570	7.85
1:2	Fresca	13.04	87.92	39.08	46.306	71.829	8.35
1:3	Fresca	13.36	87.43	38.65	70.285	69.824	8.86
1:3	Fresca	12.24	88.45	37.62	64.000	70.330	7.58
1:4	Fresca	12.38	87.60	38.13	61.906	69.334	7.88
1:4	Fresca	13.33	88.40	39.89	64.859	71.106	8.85
1:2	Recuperada	12.92	86.75	36.91	68.007	47.085	8.55
1:2	Recuperada	12.63	85.85	37.61	67.945	44.285	8.19
1:3	Recuperada	11.52	87.22	37.30	67.559	45.830	7.03
1:3	Recuperada	11.86	87.24	36.84	67.364	44.681	7.36
1:4	Recuperada	12.49	87.24	36.67	67.675	40.659	7.97
1:4	Recuperada	12.20	87.12	36.83	68.064	46.488	7.62
1:2	Desmineralizada	13.88	88.30	40.09	68.246	48.101	9.13
1:2	Desmineralizada	13.30	87.89	38.69	68.224	40.290	8.65
1:3	Desmineralizada	11.01	87.13	36.69	66.893	51.254	6.45
1:3	Desmineralizada	10.95	87.06	36.94	67.205	50.357	6.42
1:4	Desmineralizada	12.34	89.41	38.93	67.368	46.801	7.44
1:4	Desmineralizada	11.73	88.26	38.32	68.457	49.066	7.32

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Análisis operacional y estudio experimental base para el desarrollo de herramienta estimativa de consumo de cal, División Andina-Codelco	
Nombre Memorista:	Eduardo Alejandro Luengo González

Modalidad		Profesor Patrocinante
Concepto		
Calificación		
Fecha		
Prof. ^a Eugenia Araneda H.		Ingeniero Supervisor: Nicolás Miranda Moreno
		Institución: Universidad de Concepción

Comisión	
Prof. Jaime Álvarez M.	Prof. Oscar Jerez R.

Resumen
<p>El siguiente trabajo muestra un análisis de la operación de las plantas de cal como además generación de una herramienta de estimación escala laboratorio de consumo de cal en las dependencias de División Andina-Codelco, en la cual, se realiza una evaluación de data operacional que muestra cierta relación entre el consumo de cal y la mineralogía de alimentación; pruebas de reactividad de cal en función de cantidad y calidad de agua muestran que trabajar con agua cargada de ion sulfato y excesiva cantidad de agua genera aumento de rechazo, baja calidad de lechada y aumento de consumo, además pruebas de flotación y consumo de reactivo que muestran que existe agua altamente iónica en el proceso de molienda-flotación que aumenta el consumo, y finalmente una estimación de laboratorio.</p>