

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante:

Leopoldo Gutiérrez B.

Ingeniero Supervisor:

Nelson Mora N.

**Análisis Sobre Pérdidas de Molibdenita en Circuito Colectivo en
Compañía Minera Doña Inés De Collahuasi.**

Andrés Ignacio Correa Correa

Informe de Memoria de Título
Para Optar al Título de
Ingeniero Civil Metalúrgico

Enero 2019

Agradecimientos

Hoy culmina una larga y crucial etapa en mi vida, en ella quiero agradecer a mis amigos y compañeros, quienes me acompañaron en esas largas jornadas de estudio que tenían solo un objetivo, llegar a este punto y cumplir la meta.

Quiero agradecer a los profesores, quienes siempre se mostraron con una inmensa disponibilidad a enseñar, guiar y preocuparse de que sus “pupilos” crecieran como profesionales íntegros.

Gracias a Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, por brindarme esta impagable oportunidad, sin duda gracias a Carlos, Nelson, Alejandro y José, por haber tenido la paciencia de ayudarme en este crecimiento, ya que crecí como profesional y sin duda como persona.

Por último, gracias eternamente a ti mamá, porque gracias a ti, a tu esfuerzo, a tu dedicación y a tu amor he llegado a esta etapa, y gracias a ti seré quien soy el día de mañana, por ello te amo infinitamente.



Resumen

El objetivo del presente análisis fue identificar las principales causas del problema que aqueja a CMDIC desde el año 2008, las bajas recuperaciones de molibdeno a nivel colectivo y selectivo.

Para poder dilucidar el origen del problema se recurrió a documentación histórica de la compañía, data operacional y mineralógica, además de información Qemscan la cual fue solicitada a la empresa SGS, la data operacional y mineralógica es del año 2015 al 2017, mientras que la información Qemscan es del año 2016 al 2017, la data operacional fue recopilada en forma diaria y se analizó en forma mensual, además fueron realizados gráficos estadísticos con el objetivo de filtrar información que no esté dentro del intervalo de confianza seleccionado. Mientras que la información Qemscan estuvo analizada con el software estadístico minitab y así con ello generar histogramas, gráficos de dispersión y de intervalos con su respectivo rango de confianza.

De lo anterior, la principal causa de las bajas recuperaciones de molibdeno, es el agua de los pozos de Coposa Norte, la cual es un agua de mala calidad metalúrgica, ya que posee iones los cuales perjudican la recuperación de molibdenita, en efecto.

El ingreso de esta agua con cerca de 1,0 [g/l] de magnesio al circuito de flotación en el año 2008, fue y es la principal causa de las bajas recuperaciones de molibdenita en el circuito colectivo de CMDIC, ello queda evidenciado con la disminución de 23 puntos porcentuales en cuanto a la recuperación global, sumado a que a la planta entra un 32,8% de molibdenita con bajo potencial de flotabilidad ya que se encuentra en el rango de partículas finas y ultra finas (- 635 #), más aún el mineral pasando por etapas de molienda y remolienda afinan el tamaño de grano, lo que es más perjudicial para el proceso de recuperación. Estos últimos, presencia de magnesio en el agua de Coposa Norte y partículas ultra finas logran un efecto sinérgico negativo en cuanto a la recuperación de molibdenita, siendo los índices metalúrgicos en CMDIC unos de los más bajos a nivel nacional, con 38 puntos porcentuales por debajo de las demás mineras en cuanto a recuperación global.

Se concluye que tanto la granulometría de entrada a la planta no se puede cambiar, menos aún el agua que se extrae desde los pozos de Coposa Norte, por lo cual se sugiere evaluar 4 posibles soluciones que ayuden a mitigar el problema, las tres primeras enfocadas al tamaño de partícula y la última al agua con alto contenido iónico.

- I. Utilización de celdas Jameson en la cola de la segunda limpieza.
- II. Uso de una línea en "stand by" de 9 celdas como repaso (scavenger) en la colas de la segunda limpieza.
- III. Mejorar la cinética de los reactivos, en especial lograr un efecto sinérgico positivo entre el uso del diésel y el espumante.
- IV. Abatimiento de iones del agua de proceso con el objetivo de precipitar el magnesio como hidróxido de magnesio.

Abstract

The objective of the present analysis was to identify the main causes of the problem that has been afflicting CMDIC since 2008, the low recoveries of molybdenum at a collective and selective level. In order to elucidate the origin of the problem, we used historical documentation of the company, operational and mineralogical data, as well as Qemscan information, which was requested from the company SGS, the operational and mineralogical data is from 2015 to 2017, while the information Qemscan is from 2016 to 2017, the operational data was collected on a daily basis and analyzed on a monthly basis, in addition statistical graphs were made with the objective of filtering information that is not within the confidence interval selected. While Qemscan information was analyzed with the statistical software minitab and thus generate histograms, scatter plots and intervals with their respective confidence range.

Of the above, the main cause of low recoveries of molybdenum, is the water from the wells of Coposa Norte, which is a water of poor metallurgical quality, since it has ions which damage the recovery of molybdenite, in effect.

The entrance of this water with about 1.0 [g/l] of magnesium to the flotation circuit in 2008 was and is the main cause of the low recoveries of molybdenite in the collective circuit of CMDIC, this is evidenced by the decrease of 23 percentage points in terms of the global recovery, added to the plant entering a 32.8% molybdenite with low buoyancy potential as it is in the range of fine and ultra fine particles (- 635 #) , moreover the ore passing through grinding and regrinding stages fine-tune the grain size, which is more damaging to the recovery process. The latter, the presence of magnesium in the Coposa Norte water and ultra fine particles achieve a negative synergistic effect in terms of the recovery of molybdenite, with metallurgical indices in CMDIC being one of the lowest nationally, with 38 percentage points below of the other mining companies in terms of global recovery.

It is concluded that both the input granulometry to the plant can not be changed, let alone the water that is extracted from the Coposa Norte wells, so it is suggested to evaluate 4 possible solutions that help mitigate the problem, the first three focused to particle size and the last to water with high ionic content.

I. Use of Jameson cells in the second cleaning queue.

II. Use of a line in "stand by" of 9 cells as a review (scavenger) in the queues of the second cleaning.

III. Improve the kinetics of the reagents, especially to achieve a positive synergistic effect between the use of diesel and the foaming agent.

IV. Ion abatement of the process water in order to precipitate magnesium as magnesium hydroxide.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Planteamiento del problema.....	1
1.2	Objetivo general.....	2
1.3	Objetivos Específicos	2
2.	ANTECEDENTES.....	3
2.1	Antecedentes de la empresa.....	3
2.1.1	Ubicación.....	3
2.1.2	Reseña histórica.....	4
2.1.3	Operación actual de Collahuasi	4
2.1.4	Procesamiento de minerales y productos	5
2.1.5	Ruta del mineral y equipos.....	6
2.2	Antecedentes molibdeno	10
2.2.1	El molibdeno.....	10
2.2.2	Reservas de molibdeno	10
2.2.3	Producción nacional de concentrados de molibdeno.....	11
2.2.4	Precio del molibdeno.....	13
2.3	Fundamentos de flotación	13
2.3.1	Reactivos de flotación	14
	Colectores	14
	Espumantes.....	15
	Modificadores	16
2.3.2	Parámetros que influyen en la recuperación de molibdeno	16
	Efecto del ion magnesio y calcio en el agua de proceso	16
	Efecto del tamaño de partícula	21
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	23
3.1	Qemscan.....	23

3.2	Análisis de Datos	25
3.2.1	Data operacional	25
3.2.2	Informes Qemscan	30
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
4.1	Evolución de los indicadores molibdeno en CMDIC	31
4.2	Leyes de concentrado en etapa rougher y en el circuito de flotación colectiva	32
4.3	Recuperación rougher y colectiva	33
4.4	Análisis P80 enviado a flotación rougher o bulk	37
4.5	Análisis de aguas de proceso	39
4.6	Análisis Qemscan	40
4.7	Tamaño de grano de molibdenita P80	46
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
5.1	Conclusiones	49
5.2	Recomendaciones	50



Índice de figuras

Figura 1. Ubicación Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (http://www.collahuasi.cl/que-hacemos/ubicacion/).	3
Figura 2. Esquema general faena Collahuasi (Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (Chile), Superintendencia de Planificación y Desarrollo, 2018.).....	5
Figura 3. Proceso General Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (Chile), Superintendencia de Planificación y Desarrollo, 2018).....	6
Figura 4. Esquema planta concentradora CMDIC (Elaboración Propia).	8
Figura 5. Esquema planta concentradora CMDIC, rougher ABC (Elaboración Propia).	8
Figura 6. Esquema planta concentradora CMDIC, rougher L1, L2, L3 (Elaboración Propia).	9
Figura 7. Esquema planta concentradora CMDIC, remolienda y limpieza (Elaboración Propia).	9
Figura 8. Producción nacional de molibdeno, 2013-2017 (Base de datos anuales Cochilco).	11
Figura 9. Producción nacional del molibdeno, 2013-2017 (Base de datos anuales Cochilco).	12
Figura 10. Producción porcentual del molibdeno, 2013-2017 (Base de datos anuales Cochilco)... ..	12
Figura 11. Evolución del precio del molibdeno (Bases datos anuales Cochilco).	13
Figura 12. Esquema de la acción de un colector (Gutiérrez, 2014).....	15
Figura 13. Esquema de la acción de un espumante (Gutiérrez, 2014).	15
Figura 14. Efecto del CaCl_2 y MgCl_2 en la flotación de molibdenita a diferentes Valor de pH (Hirajima, 2016).....	17
Figura 15. Efecto del calcio a diferentes concentraciones sobre la recuperación de Mo (López Valdivieso, 2005).....	18
Figura 16. Fenómeno de Heterocoagulación entre partículas de molibdenita y ganga (Gutiérrez, 2014).....	18
Figura 17. Diagrama de Especies para el CaCl_2 en Solución acuosa (Hirajima, 2016).	19
Figura 18. Diagrama de especies para el MgCl_2 en solución acuosa (Hirajima, 2016).	19
Figura 19. Efecto del CaCl_2 y MgCl_2 en el ángulo de contacto de la molibdenita a diferentes valor de pH (Hirajima, 2016).	20
Figura 20. Efecto del CaCl_2 y MgCl_2 en el potencial z de la molibdenita a diferentes valor de pH (Hirajima, 2016).....	20
Figura 21. Efecto del CaCl_2 y MgCl_2 en el potencial Z de la molibdenita a diferentes valor de pH (Hirajima, 2016).....	21
Figura 22. Efecto de la reducción de tamaño en la molibdenita en la relación cara/borde.....	22
Figura 23. Flotabilidad de la molibdenita en función del pH y el tamaño de partícula (Tabares et al., 2006).....	22

Figura 24. Esquema de funcionamiento del equipo Qemscan (Caracterización mineralógica del proceso metalúrgico y su impacto en la producción de concentrados de Cu y Mo en CMDIC).	23
Figura 25. Esquema aproximación de recuperación rougher (Elaboración propia).	26
Figura 26. Gráfico de control recuperación rougher (2015) (Elaboración propia).	27
Figura 27. Gráfico de control recuperación rougher (2016) (Elaboración propia).	28
Figura 28. Gráfico de control recuperación rougher (2017) (Elaboración propia).	28
Figura 29. Esquema de plan de acción recuperación rougher de molibdenita.	29
Figura 30. Parámetros evaluados en flotación rougher.	29
Figura 31 Esquema del grado de liberación.	30
Figura 32. Evolución de indicadores de molibdeno en CMDIC.	32
Figura 33. Benchmarking de recuperación global molibdeno en diferentes operaciones mineras..	32
Figura 34. Evolución recuperación Mo rougher vs FeT concentrado rougher.	35
Figura 35. Correlación recuperación rougher Mo vs FeT en el concentrado rougher.	35
Figura 36. Evolución ley Mo concol vs Mo en alimentación a planta.	36
Figura 37. Correlación ley Mo concol vs Mo en alimentación a planta.	36
Figura 38. Histograma de P80 planta (2015).	37
Figura 39. Histograma de P80 planta (2016).	38
Figura 40. Histograma de P80 planta (2017).	38
Figura 41. Efecto de la inclusión de agua fresca coposa norte sobre los índices metalúrgicos.	40
Figura 42. Rangos porcentual de liberación de Molibdenita en AL.3 (2017).....	41
Figura 43. Distribución de tamaños porcentual de molibdenita liberada de en AL.3 (2017).....	42
Figura 44. Rangos porcentuales de liberación de Molibdenita en Relave ABC (2017).	43
Figura 45. Distribución de tamaños porcentual de Molibdenita liberada en Relave ABC (2017). ...	43
Figura 46. Rangos porcentuales de liberación de molibdenita en relave scavenger (2017).	44
Figura 47. Distribución de tamaños porcentual de molibdenita liberada en relave scavenger (2017).	44
Figura 48. Rangos porcentuales de liberación de molibdenita en concol (2017).....	45
Figura 49. Distribución de tamaños porcentual de Molibdenita liberada en Concol (2017).	46
Figura 50. Esquema de flotación CMDIC y P80 asociado al tamaño de grano molibdenita (Elaboración propia).	47
Figura 51. Correlación entre la ley de Mo en el concol y el porcentaje de Mo en el concentrado selectivo.....	48
Figura 52. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Tratamiento Planta.....	53
Figura 53. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs P80 Planta.....	53
Figura 54. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs DWI/BWI.....	54

Figura 55. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Densidad de Mineral Alimentado a Planta.	54
Figura 56. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs UGM 1.	55
Figura 57. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs UGM 4.	55
Figura 58. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs UGM 5.	56
Figura 59. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs UGM 6.	56
Figura 60. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs UGM Alimentado a Planta.	57
Figura 61. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Arcillas Alimentadas a Planta.	57
Figura 62. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Mo Concol.	58
Figura 63. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs FeT Concol.	58
Figura 64. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs AsT Concol.	59
Figura 65. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Malla en Concol.	59
Figura 66. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Recuperación 2° Limpieza Mo.	60
Figura 67. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Agua Lavado.	60
Figura 68. Evolución de la ley Mo Concol vs Mo Alimentación en Alimentación a Planta.	61
Figura 69. Evolución de la ley Mo Concol vs DWI/BWI.	61
Figura 70. Evolución de la ley Mo Concol vs Densidad de Mineral Alimentado a Planta.	62
Figura 71. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM 2.	62
Figura 72. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM 3.	63
Figura 73. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM 4.	63
Figura 74. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM 5.	64
Figura 75. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM 6.	64
Figura 76. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM.	65
Figura 77. Evolución de la ley Mo Concol vs Arcillas.	65
Figura 78. Evolución de la ley Mo Concol vs Producción Concol.	66
Figura 79. Evolución de la ley Mo Concol vs AsT Concol.	66
Figura 80. Evolución de la ley Mo Concol vs Malla en Concol.	67
Figura 81. Evolución de la ley Mo Concol vs Recuperación Mo 2° Limpieza.	67
Figura 82. Evolución de la ley Mo Concol vs Recuperación Mo Concol.	68
Figura 83. Asociación de la Molibdenita en AL3 (2016).	68
Figura 84. Asociación de la Molibdenita en AL3 (2017).	69
Figura 85. Asociación de la Molibdenita en Relave ABC (2016).	69
Figura 86. Asociación de la Molibdenita en Relave ABC (2017).	70
Figura 87. Asociación de la Molibdenita en Relave Scavenger (2016).	70
Figura 88. Asociación de la Molibdenita en Relave Scavenger (2017).	71

Figura 89. Asociación de la Molibdenita en Concol (2016).....	71
Figura 90. Asociación de la Molibdenita en Concol (2017).....	72
Figura 91. Esquema del Muestreo Industrial Planta Concentradora.	75
Figura 92. Circuito de Molienda y Clasificación CMDIC (2018).....	79
Figura 93. Flotación Rougher E, D, F, G CMDIC (2018)	79
Figura 94. Flotación Rougher L1, L2, L3 y L4 CMDIC (2018).....	80
Figura 95. Circuito de Remolienda y Limpieza CMDIC (2018)	80
Figura 96. Puntos de adición de reactivos.	81

Índice de Tablas

Tabla 1. Media, desviación estándar y límites de control para cada año evaluado.	27
Tabla 2. Coeficiente de correlación de Pearson etapa rougher.....	34
Tabla 3. Coeficiente de correlación de Pearson etapa colectiva.	34
Tabla 4. Derechos autorizados de extracción de agua fresca.....	39
Tabla 5. Análisis químico al agua de coposa norte, coposa sur y portezuelo 2013.....	39
Tabla 6. Estadísticos tamaño de grano en corrientes del proceso, 2016.....	46
Tabla 7. Estadísticos tamaño de grano en corrientes del proceso, 2017.....	46
Tabla 8. Coeficiente de Correlación de Pearson etapa Concol.....	72
Tabla 9. Coeficiente de Correlación de Pearson etapa Rougher	74
Tabla 10. Recuperaciones Obtenidas en Base al Muestreo Industrial.....	75
Tabla 11. Resultados del Muestreo Industrial	76
Tabla 12. UGM y su definición.....	76
Tabla 13. Dosificación de reactivos.....	81

Nomenclatura

Qemscan: Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy

CMDIC: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi

MSNM: Metros sobre el nivel del mar

EIA: Estudio de Impacto Ambiental

TM: Toneladas Métricas

Concol: Concentrado Colectivo

MT: Millones de toneladas

UGM: Unidad Geometalurgica



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El horizonte de cualquier empresa es maximizar el rendimiento, a su vez la eficiencia y con ello lograr el máximo de utilidad posible con los recursos disponibles, siempre en el marco del respeto del medio ambiente y la sociedad. Por ello en la búsqueda constante de optimización y mejora continua, es que en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), se hace urgente la búsqueda de soluciones en cuanto a un problema que aqueja a la compañía desde el año 2008, las bajas recuperaciones de la especie mineralógica molibdenita. CMDIC es una minera ubicada en la primera región de Chile, región de Tarapacá, el foco de esta compañía es la producción de concentrado de cobre y como subproducto concentrado de molibdeno, ambos productos son obtenidos al final de la cadena de valor.

Un benchmarking nacional en cuanto a la recuperación de esta especie mineralógica indicaría que CMDIC está muy por debajo de las demás empresas mineras en 38 puntos porcentuales, aún cuando las leyes son muy favorables, la molibdenita recuperada es sumamente baja. Esta especie mineralógica es la principal mena-sulfuro del molibdeno, metal de atractivas propiedades en cuanto a aleaciones, por lo cual su alto /ascendente precio y dado que a futuro se explotaran sectores del yacimiento con altas leyes de molibdeno, hacen urgente encontrar las causales de las bajas recuperaciones de este mineral y establecer planes de acción/mitigación para contrarrestar las anteriores.

Es por ello que esta memoria tiene por objetivo evidenciar las causales de estas bajas recuperaciones mediante un análisis de data histórica operacional, mineralógica y Qemscan, así proponer posibles soluciones al problema, con ello elevar los índices metalúrgicos en cuanto a recuperación de molibdenita logrando un mayor rendimiento e eficiencia en el proceso de flotación colectiva y global.

1.2 Objetivo general

- Realizar un análisis a la data histórica, operacional como mineralógica e información Qemscan, para determinar la razón de las bajas recuperaciones de esta especie mineral en el circuito de flotación colectiva, finalmente proponer posibles soluciones a este problema.

1.3 Objetivos Específicos

- Análisis de la data operacional y mineralógica de CMDIC, comprendida entre los años 2015-2016-2017
- Análisis de información Qemscan entre los años 2016 y 2017, con temporalidad semanal.
- Proponer posibles soluciones que mitiguen el problema.



2. ANTECEDENTES

2.1 Antecedentes de la empresa

En este segundo capítulo se da a conocer de manera general los antecedentes de CMDIC, entre los cuales se podrá encontrar la ubicación, operación y productos.

Junto ello podremos encontrar una reseña histórica y actualidad, entre otros. Por último se da a conocer el potencial de la compañía en cuanto a sus procesos productivos.

2.1.1 Ubicación

CMDIC es una compañía privada enfocada a la producción de concentrado y cátodos de cobre con subproductos de Au, Ag y concentrado de molibdeno. La extracción del mineral es por método de rajo abierto y se concentra en dos yacimientos llamados Rosario y Ujina, estos se encuentran situados en la comuna de Pica en el área denominada faena cordillera a 4.400 msnm a 185 km al sureste de la ciudad de Iquique, región de Tarapacá en el extremo norte de Chile, este sector se caracteriza por tener un clima lluvioso en verano y nevadas ocasionales en invierno. En el área de Ujina se encuentra la planta concentradora, en donde nace un mineroducto de 203 km de longitud, por este el concentrado mixto Cu-Mo es trasladado hasta el terminal marítimo Collahuasi, el cual está ubicado en punta patache a 65 km al sur de la ciudad de Iquique, en donde se embarcan los productos hacia el extranjero a los mercados internacionales, en este lugar también se encuentra la planta de molibdeno y filtrado de concentrado

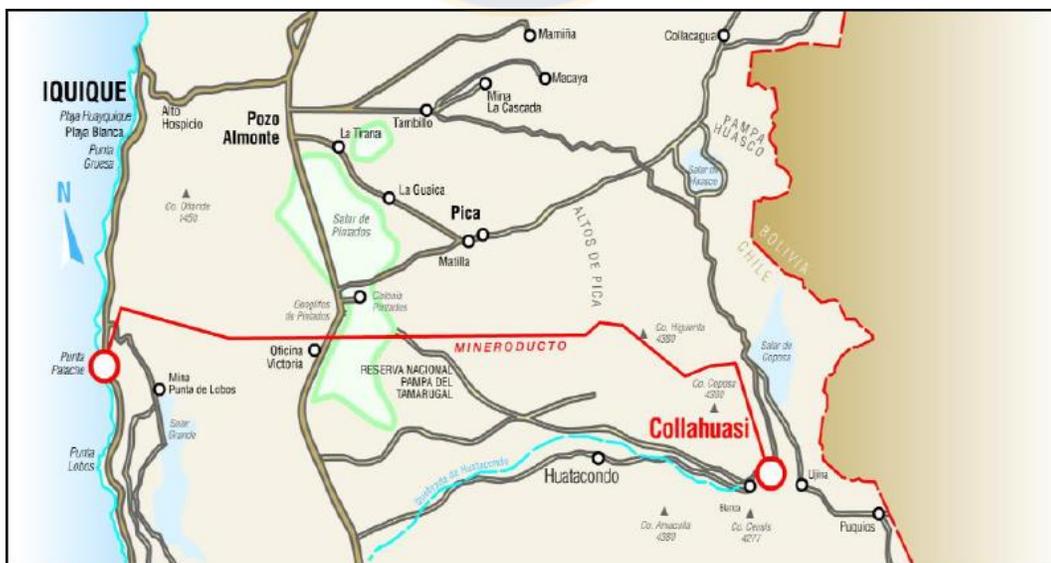


Figura 1. Ubicación Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (<http://www.collahuasi.cl/que-hacemos/ubicacion/>).

2.1.2 Reseña histórica

El distrito minero de Collahuasi comienza su explotación en el año 1880, en ese entonces mediante un sistema de vetas con gran contenido de cobre y plata de alta ley. Al llegar al año 1930 y debido a la crisis económica mundial las faenas fueron interrumpidas, posteriormente al llegar al año 1978 se identificaron componentes claves del yacimiento Rosario, al llegar al año 1991 diferentes estudios dieron como resultado el descubrimiento del yacimiento Ujina, siendo aprobados en 1995 los estudios de factibilidad y de EIA, hasta que a fines del 1996 se dio inicio a la etapa de desarrollo y construcción, lo que concluyó el 7 de abril de 1999 en donde CMDIC inaugurara su operación comercial. Finalmente se aprobó el proyecto Transición Ujina-Rosario, con el fin de llevar las actividades extractivas desde el primero al segundo junto al aumento de la capacidad de tratamiento de la planta concentradora, obras que finalizaron a mediados del 2004 y que permitieron llegar a 110.000 [t/d], además, en el año 2005 se inició la construcción del proyecto planta de molibdeno, el cual consistía en la instalación de una planta de flotación selectiva la cual se pondría en marcha a finales del mismo año, permitiendo así la producción y venta de concentrado de molibdeno a través de puerto Patache.

Actualmente Collahuasi es una sociedad contractual minera, teniendo su propiedad dividida entre Anglo American Plc y Glencore, con un 44% cada una, mientras que el 12% restante pertenece a Japan Collahuasi Resources B.V.

2.1.3 Operación actual de Collahuasi

La extracción de minerales se realiza desde los rajos Rosario y Ujina, responsables de la mayor parte de la producción que tiene Collahuasi y la operación de extracción comprende labores de perforación, tronadura, carguío y transporte en camiones. Sumado a lo anterior existen unos cuerpos satélites denominados Rosario Sur, que aportan principalmente con óxidos que están considerados para mantener en funcionamiento la planta de lixiviación hasta el año 2019. Adicionalmente, se realiza disposición de estériles y de mineral de baja ley en el botadero y acopio asociado al rajo (ver Figura 2).

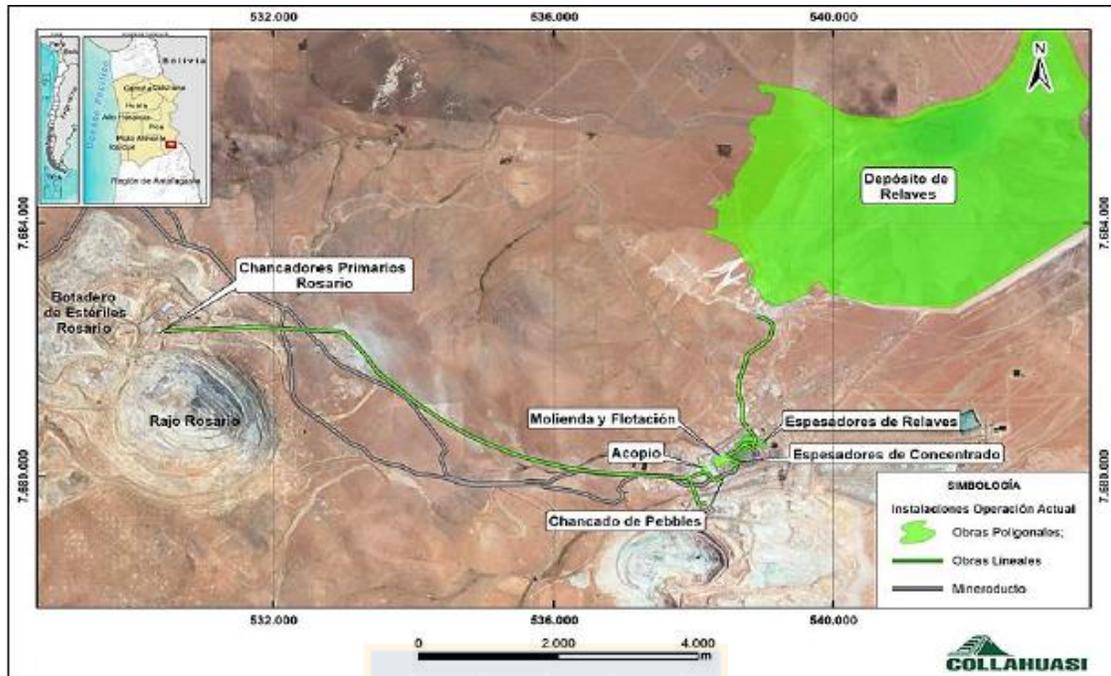


Figura 2. Esquema general faena Collahuasi (Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (Chile), Superintendencia de Planificación y Desarrollo, 2018.).

2.1.4 Procesamiento de minerales y productos

El procesamiento de minerales en CMDIC se lleva a cabo a través de 2 líneas de producción, una planta concentradora, y una planta de óxidos, esta última actualmente se encuentra cerrada y se espera su reapertura a través del proceso de biolixiviación. La primera aporta con mayor cobre fino (100% Cu fino producido) y consiste en una línea que tiene un chancador primario, y luego un sistema de molienda SAG que deriva a la flotación para luego obtener un concentrado mixto, este es transportado por un mineroducto hasta el puerto Patache, en donde él se filtra y se embarca. La segunda línea de producción procesará óxidos y sulfuros secundarios, los cuales se tratarán en pilas dinámicas mediante biolixiviación, para luego ir al proceso de extracción por solventes y electrowinning (SX-EW), y obtener como producto final cátodos de cobre, los cuales serán llevados por camiones al puerto y embarcados. En la Figura 3 se observa un esquema de las líneas de producción.

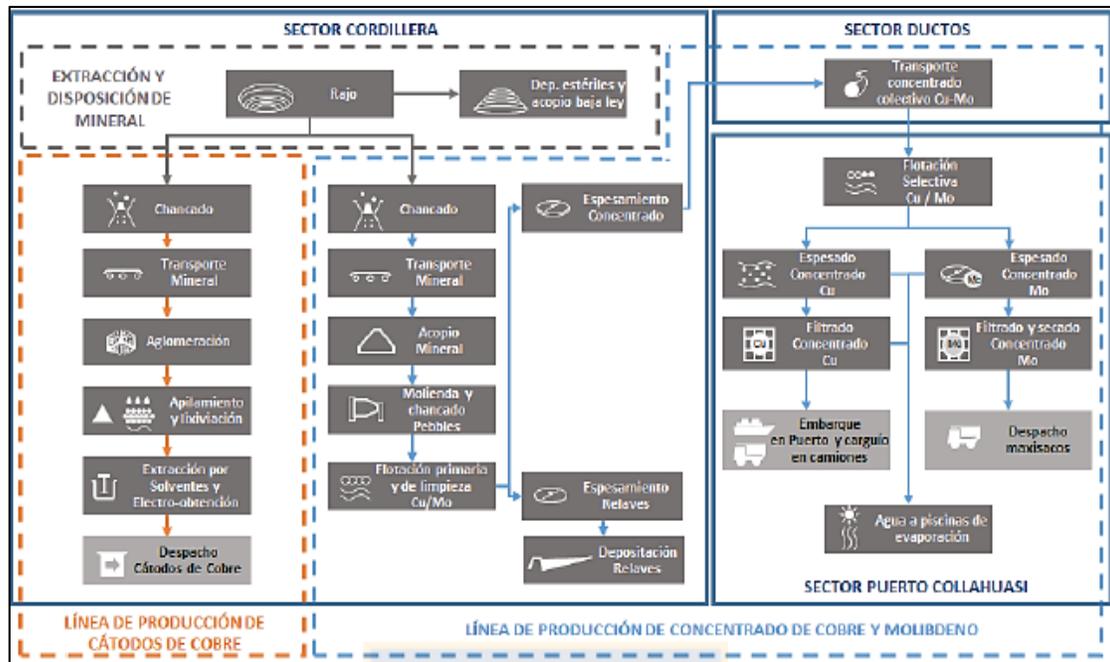


Figura 3. Proceso General Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (Chile), Superintendencia de Planificación y Desarrollo, 2018).

2.1.5 Ruta del mineral y equipos

El mineral del rajo es fragmentado mediante tronaduras y enviado al chancador primario, este material es enviado mediante correas transportadoras a un stock pile cuya capacidad es 450.000 toneladas aproximadamente, desde este se alimenta las tres líneas de molienda y clasificación que posee la planta concentradora. Con el objetivo de optimizar la eficiencia de la molienda SAG, el mineral enviado a cada línea debe ser en lo posible 65% -2 pulgadas, las dos primeras líneas están compuestas por un esquema similar de molienda y la tercera posee un esquema diferente.

- Chancador rotatorio marca Fuller de 805 [hp] con un tamaño de 17x3 [m] con CSS de 7,5 pulgadas y una capacidad de procesamiento de 10.400 [tph].
- SAG 01 y 02 en esquema 1:1 con un molino de bolas, SAG de 32x15 pies de diámetro y largo respectivamente, con una potencia nominal de 8.000 [kw] y rendimiento de 1.500 [tph], molino de bolas de 22x36 pies de diámetro y largo respectivamente con una potencia nominal de 9.700 [kw].
- SAG 1011 en un esquema 1:2 con sus molinos de bolas, SAG de 40x22 pies, con una potencia nominal de 23.000 [kw] y rendimiento de 5.000 [tph], dos molinos de bolas de

similares características y en paralelo, cada uno de 26x38 pies de diámetro y largo respectivamente, con una potencia nominal de 15.500 [kw].

- Notar que el mineral que no cumple con la granulometría exigida por el trommel es enviada a la planta de chancado de pebbles, en donde el material es lavado y tratado por 3 chancadores de cono, cada uno con una potencia de 800 [hp], el material ya tratado es retornado al acopio de gruesos que alimenta las líneas 1 y 2.
- Cada molino de bolas está conectado a una batería de hidrociclones (HC) en un circuito de clasificación inverso, todos los molinos de bolas poseen dos baterías de HC siendo cada uno de 800 [mm], los molinos de la línea 01 y 02 poseen en cada molino 8 HC y los molinos del SAG 1011 poseen 10 HC.
- El circuito de flotación rougher o bulk está compuesto por 54 celdas, la línea 01 y 02 de molienda alimenta a 3 líneas de flotación, cada línea posee 9 celdas wemco auto aspiradas de 127 [m³] en un arreglo 1-2-2-2-2.
- Las línea 3 alimenta 3 líneas de flotación, A-B-C cada una de estas con 9 celdas convencionales de aire forzado outotec de 160 [m³], cada línea en un arreglo 1-2-2-2-2.
- El concentrado rougher alimenta al circuito de clasificación y remolienda, este es alimentado a las 4 baterías de HC, la batería 005/006/007/1017 con 24, 24, 12 y 21 HC respectivamente. Los molinos verticales en conexión con los HC son 7, cada uno con una potencia de 933 [kw] y con una carga circulante de 150%. El flujo de rebose de los HC de remolienda alimentan al circuito de flotación de primera limpieza y su flujo de descarga retorna a remolienda como carga circulante del sistema.
- El circuito de primera limpieza y scavenger está compuesto por celdas convencionales auto aspiradas marca wemco de 127 [m³], las cuales se distribuyen en las líneas 4, 5, 6 y 7, ordenadas según arreglo 1-2-2, y el circuito Scavenger ordenadas según arreglo 2-2.
- El concentrado de las primeras celda de limpieza es transferido directamente como concentrado final, y el concentrado de las demás celdas es transferido a la segunda limpieza, las colas de estas celdas es transferido a la etapa scavenger.
- El concentrado de la etapa scavenger es transferido al circuito de remolienda y clasificación, las colas son enviadas directamente a espesamiento de relaves.
- La segunda limpieza está compuesto por 10 columnas, 6 rectangulares y 4 circulares, todas con una altura de 11 [m], el concentrado de estas celdas es el concentrado final obtenido, las colas de esta etapa son recirculadas a la primera limpieza.
- El concentrado obtenido es enviado por dos mineroductos 7 y 8 pulgadas de diámetro y 203 [km] de longitud hacia la planta de flotación selectiva en donde se obtienen el concentrado de cobre y molibdeno.

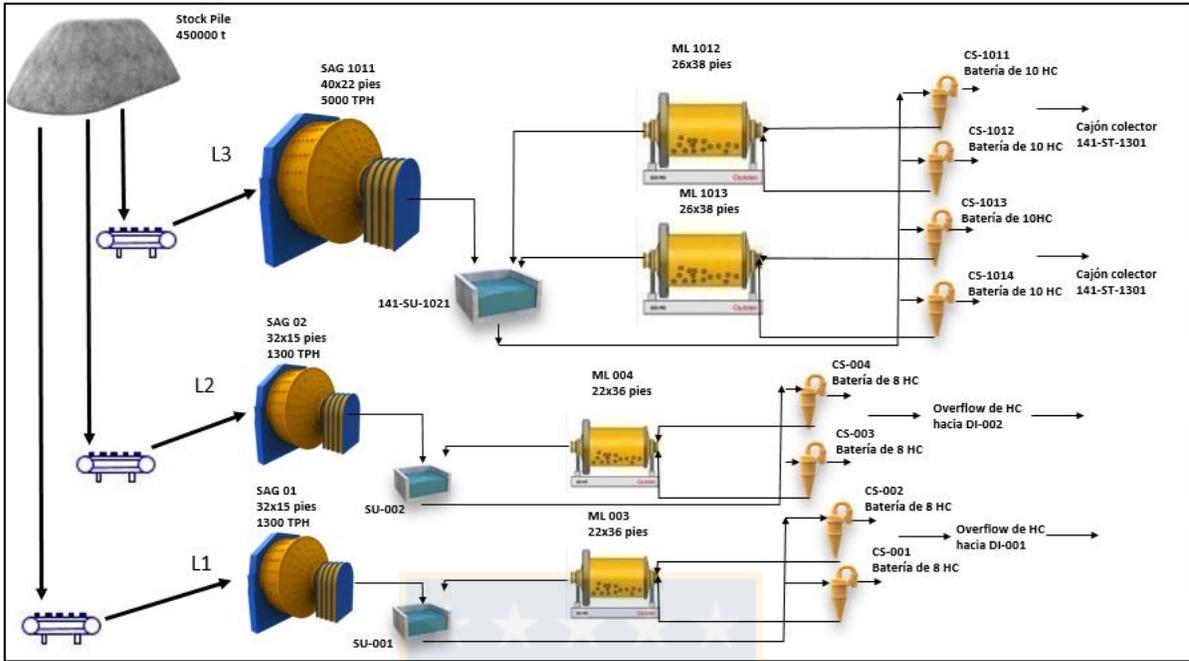


Figura 4. Esquema planta concentradora CMDIC (Elaboración Propia).

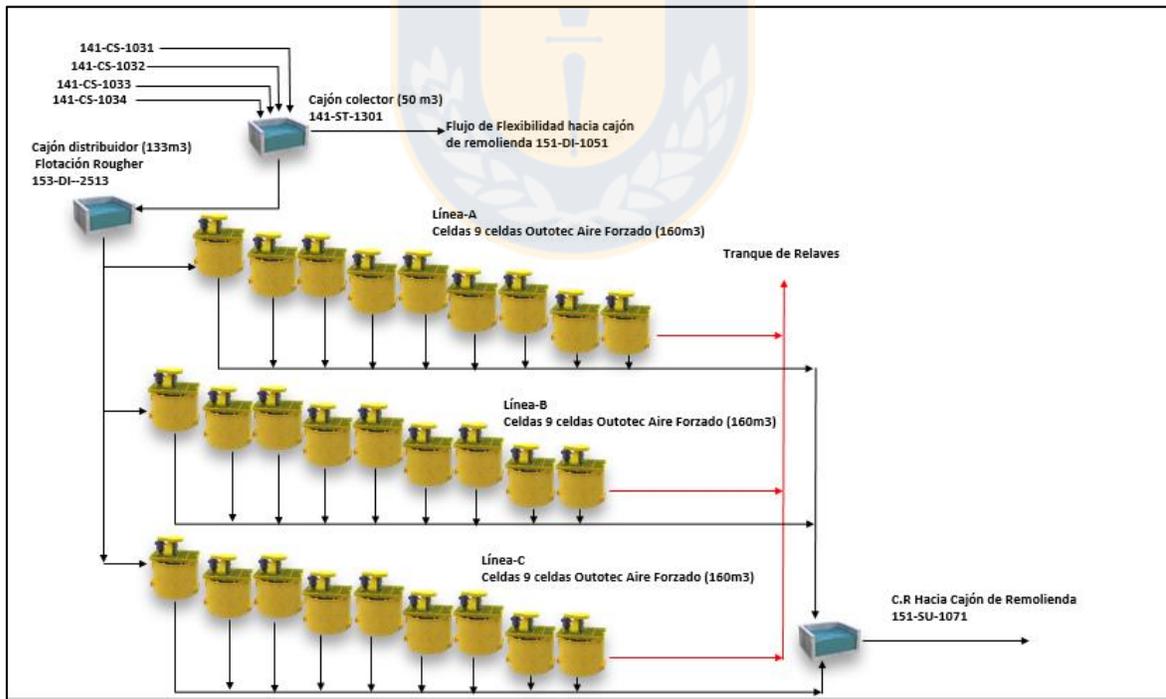


Figura 5. Esquema planta concentradora CMDIC, rougher ABC (Elaboración Propia).

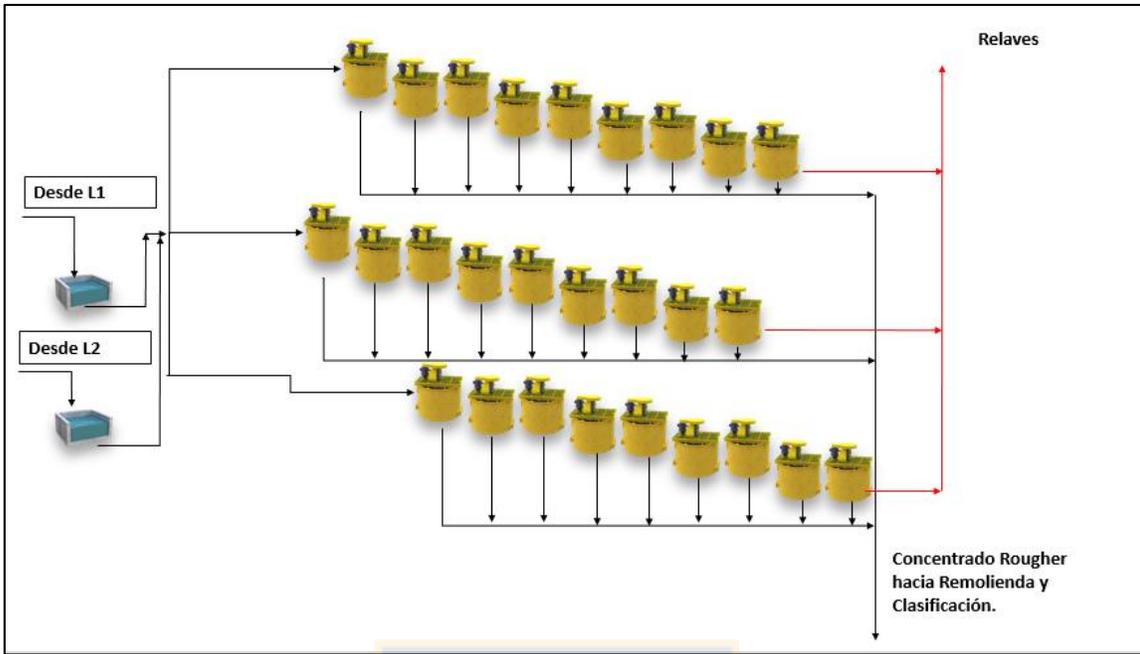


Figura 6. Esquema planta concentradora CMDIC, rougher L1, L2, L3 (Elaboración Propia).

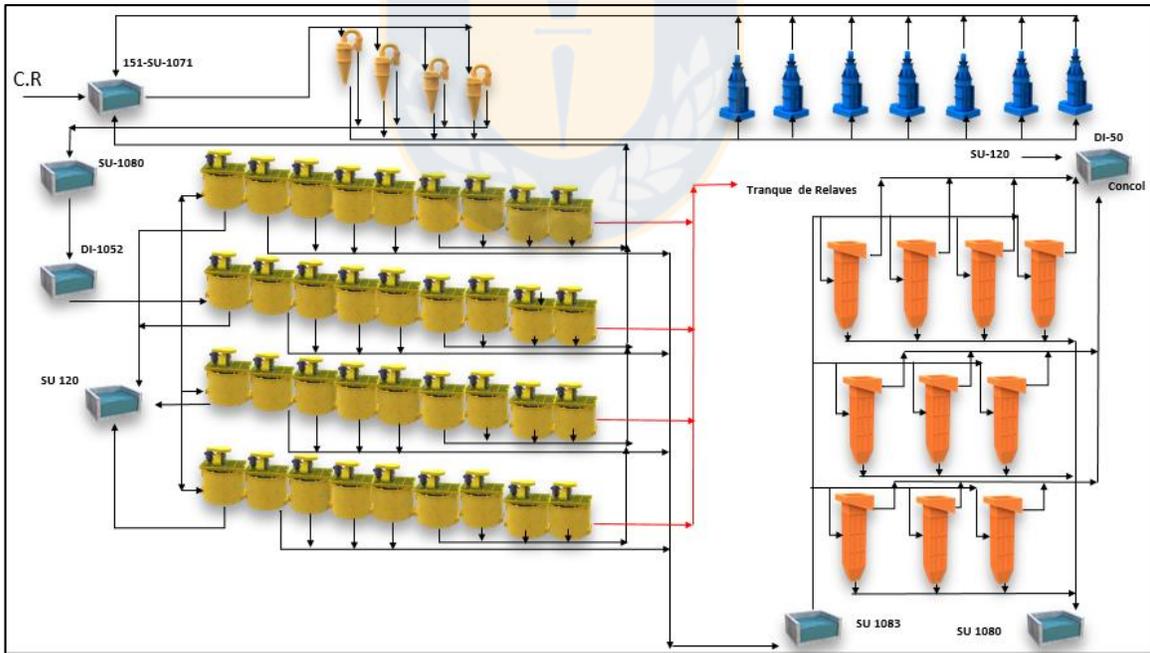


Figura 7. Esquema planta concentradora CMDIC, remolienda y limpieza (Elaboración Propia).

2.2 Antecedentes molibdeno

2.2.1 El molibdeno

Desde épocas remotas ciertas sustancias de las cuales se desconocía su origen se les denominó “Molibdos”, que en griego significa “parecido al plomo”. Entre estas sustancias estaba una llamada molibdenita, en 1778 Carl Wilhelm, científico suizo determinó que la molibdenita era el sulfuro de un metal desconocido a la fecha, ya más tarde en 1782, Peter Jacob Hjelm logró reducir trióxido de molibdeno (MoO_3) con carbón y obtuvo el metal en su estado puro.

2.2.2 Reservas de molibdeno

Para el año 2016 la United States Geological Survey (USGS) estimó las reservas base a nivel mundial, esto quiere decir aquellas con información geológica y económica para ser consideradas explotables en función de la tecnología existente y en condiciones de mercado de largo plazo, estas reservas se estimaron en 15 millones de toneladas métricas. Durante el periodo 2000-2016 el inventario de reservas mundiales se multiplicó 2,5 veces, acentuándose en el caso de China el cual lo hizo 16,8 veces con respecto a las declaradas en el año 2000, en menor medida ocurrió con las reservas en Perú (3,1 veces) y Chile (1,64 veces), por último para Estados Unidos, el segundo productor mundial de molibdeno, mantuvo las reservas existentes desde el año 2000.

Las mayores reservas a nivel mundial se concentran en 4 países China (35%), EE.UU (21%), Chile (12%) y Perú (3%). Estos países concentran el 71%, lo que equivale a 10,6 MT a nivel global, por último en Chile las reservas aumentaron desde 1.1 MT en el año 2000 a 1.8 MT al año 2016, esto debido a las reservas declaradas en los proyectos de cobre Caserones, Quebrada Blanca Fase 2 y Sierra Gorda. Aún así, el peso relativo de Chile a nivel mundial disminuyó pasando de 20 % en el año 2000 hasta un 12% en el año 2016. Esto en gran medida por el crecimiento de China, así como la aparición de Perú.

2.2.3 Producción nacional de concentrados de molibdeno

Actualmente en Chile existen 7 operaciones mineras que generan como sub producto concentrado de molibdeno. En el periodo de tiempo comprendido entre el año 2013 y el 2017 se observa claramente un aumento en la producción de este metal, lográndose un incremento porcentual promedio de cada año de un 15,5 %. Esto es en gran parte sostenido debido a las nuevas operaciones mineras que se han integrado, en particular la minera Sierra Gorda la cual es una de las operaciones que más produce concentrado de molibdeno a nivel mundial.

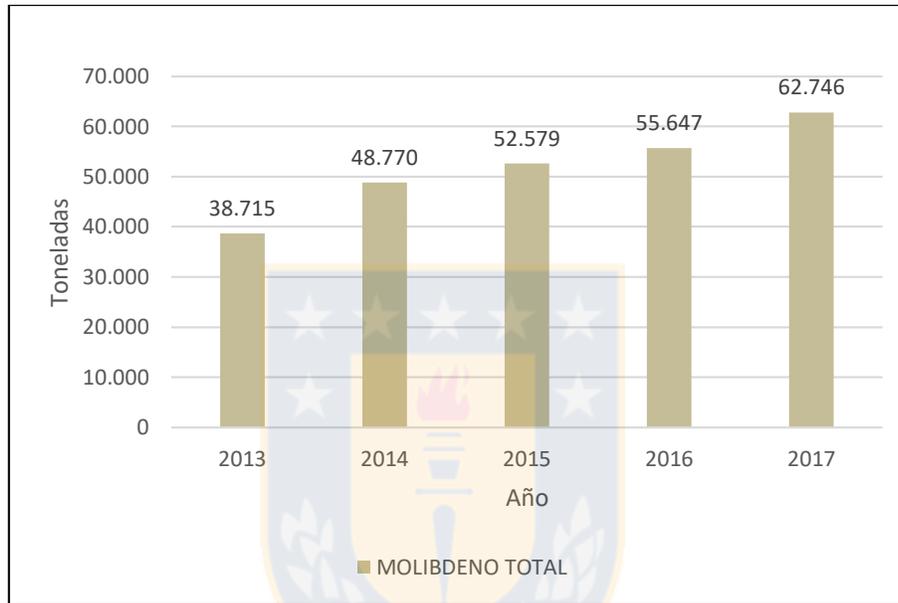


Figura 8. Producción nacional de molibdeno, 2013-2017 (Base de datos anuales Cochilco).

En cuanto a producción individual de cada minera, en la Figura 9 se aprecia que Codelco históricamente ha sido el mayor productor de molibdeno, aunque la producción para el año 2017 tuvo una baja de 6,41 % con respecto al año 2016, esta empresa estatal registro una caída en cuanto a participación pasando de producir el 54,8 % en el año 2016 a un 46 % en el año 2017.

Sierra Gorda es el segundo productor a nivel nacional, esta minera pretende posicionarse como uno de los grandes productores de molibdeno a nivel mundial, comenzó su operación en el año 2015, la producción nacional no ha decaído en gran parte por los aportes de esta minera, aun cuando los aportes del mayor productor (Codelco) hayan bajado, en cuanto a producción Sierra Gorda ha tenido un crecimiento de un 141 % en comparación al año en que inició sus operaciones (2015) logrando una producción en el año 2017 de 16.500 TM, siendo un 26 % de la producción nacional.

Minera los Pelambres ha sido uno de los grandes productores de molibdeno a nivel nacional, logrando un aumento de la producción en el año 2017 de 48% en comparación con el año 2016, con

esto se sitúa como la tercera productora de molibdeno con 10.600 TM, lo que equivale a un 17 % de la producción nacional.

Por ultimo CMDIC ha ido fuertemente a la baja en cuanto a la producción de molibdeno, desde el año 2014 su producción ha decaído un 53 % pasando de producir 6.000 TM a 2.800 TM, y en cuanto al aporte nacional ha decaído 8 puntos porcentuales, las causas de esta fuerte caída se especificaran en los siguientes capítulos.

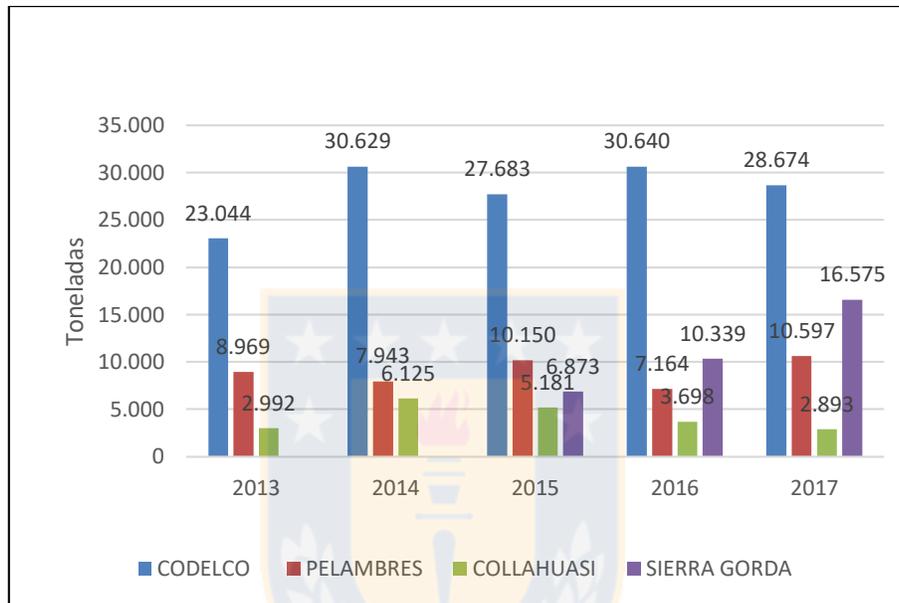


Figura 9. Producción nacional del molibdeno, 2013-2017 (Base de datos anuales Cochilco).

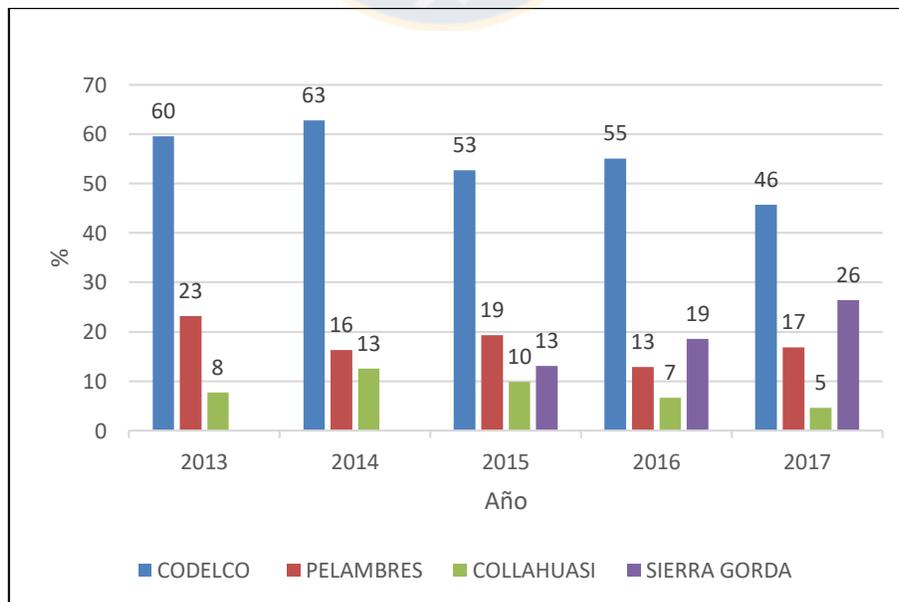


Figura 10. Producción porcentual del molibdeno, 2013-2017 (Base de datos anuales Cochilco).

2.2.4 Precio del molibdeno

El precio publicado hace referencia al Oxido de este metal (MoO_3) el cual posee un 66 % de molibdeno en su composición, este valor se publica semanalmente en la edición de Platts Metal Week y sirve como referencia para fijar las condiciones comerciales entre productores y consumidores. Este valor es una ponderación realizada en los mercados de Europa, Estados Unidos y Japón, se excluye el mercado de china. En la siguiente figura se observa la evolución del molibdeno (a la forma de trióxido) desde el año 2005 con el peak de precio en este mismo año, el cual fue de 31,7 US\$/lb, este valor fue impulsado por la explosivo crecimiento de china, así mismo como una tardía oferta., con la crisis económica el valor de este metal fue decayendo hasta llegar al año 2009 a 11,12 US\$/lb mientras que en el año 2010 y el periodo actual este metal ha tendido a la baja, aunque este año su valor ha repuntado hasta alcanzar un valor promedio de 11,9 US\$/lb.



Figura 11. Evolución del precio del molibdeno (Bases datos anuales Cochilco).

2.3 Fundamentos de flotación

La flotación de minerales constituye uno de los grandes procesos de concentración/separación de estos, esta se realiza con el objetivo de poder separar minerales de interés de los cuales carecen de valor alguno. El fundamento de la flotación de minerales sulfurados, recae en las propiedades superficiales de las partículas que participan en el proceso, en específico la fisicoquímica de superficies, en particular la afinidad que poseen ciertas partículas a interaccionar con el aire, a estas se les llaman hidrofóbicas, mientras que otras partículas de mineral que poseen afinidad a interactuar más con el agua, se les denomina hidrofílicas. Esta propiedad de hidrofobicidad es la fuerza impulsora de la flotación, este proceso de separación se realiza en un medio llamado pulpa, constituido por tres fases; solido, liquida y gaseosa (Burujas). Gracias a la hidrofobicidad es posible

obtener dos corrientes, una obtenida por la parte superior que es una pulpa altamente mineralizada y de gran valor denominada concentrado que es el producto del proceso, mientras que la otra se obtiene por la parte inferior la cual carece de valor denominada cola, la cual tiene como destino el tranque de relaves.

El mineral primeramente es conminuido en la molienda primaria, la cual está conformada por la molienda SAG (Semi-Autogenous Grinding) y molinos de bolas, en esta etapa el mineral es molido y mezclado con agua, generando una pulpa de una densidad aproximada de 1.25 (ton/m³) y un tamaño de partícula (P80) de 210 μ m, esta mezcla de agua, mineral y reactivos enviada al proceso de flotación.

2.3.1 Reactivos de flotación

Como se mencionó anteriormente, la fuerza impulsora del proceso de flotación es la hidrofobicidad, pero para que este proceso logre la máxima eficiencia se necesita inducir ciertas propiedades en el medio acuoso y en las partículas para así lograr la recuperación de estas, es aquí en donde los siguientes reactivos tienen un papel fundamental en este proceso.

Colectores

Los reactivos llamados colectores son químicos de tipo orgánico en los cuales su estructura puede dividirse en un grupo polar y otro no polar. La parte del colector polar es la que se adhiere a la partícula, mientras que el extremo no polar es una cadena de tipo hidrofóbica la cual queda expuesta hacia la fase agua, otorgando propiedades de hidrofobicidad.

Dado que la función de estos reactivos es disminuir la humectación de las partículas del mineral y aumentan su capacidad de adherencia a las burbujas, estos generalmente se clasifican según su capacidad para disolverse en este medio, existiendo los catiónicos y los aniónicos, siendo los últimos los más usados en la minería del cobre, en específico los llamados xantatos, los cuales son derivados del ácido xántico, cabe decir que el efecto del colector está directamente relacionado a su longitud y estructura del radical hidrocarburo (Bulatovic, 2007)

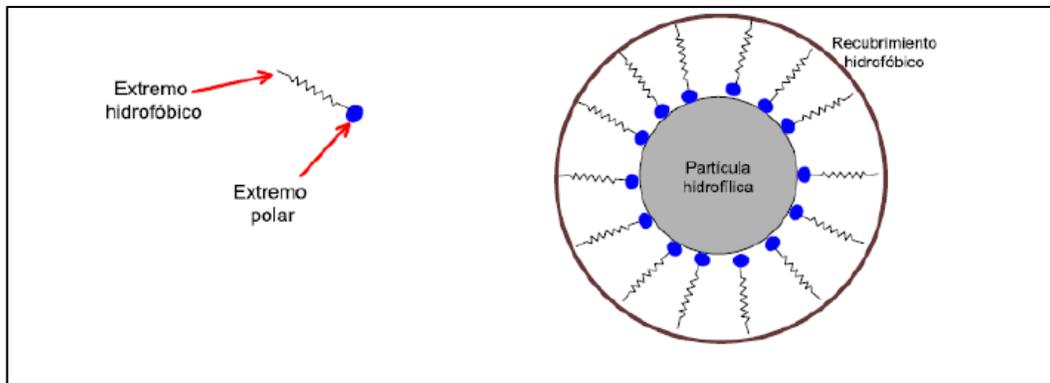


Figura 12. Esquema de la acción de un colector (Gutiérrez, 2014).

En cuanto a un tercer grupo de colectores existen los llamados no iónicos, estos actúan a la forma molecular, entre ellos podemos encontrar el kerosene, este colector más usado en cuanto a la flotación de molibdenita, a pesar que este mineral al igual que el talco y el grafito presenta hidrofobicidad natural, existen enlaces de tipo covalente Mo-S que al romperse generan sitios de alta reactividad llamados bordes o “edges”, esto dificulta el proceso ya que esas zonas interaccionan con el agua, es aquí donde el kerosene tiene un papel fundamental en cuanto a recubrir esos sitios proporcionando hidrofobicidad (Castro, 2003).

Espumantes

Estos reactivos son agentes tenso-activos o también denominados surfactantes y poseen una estructura heteropolar conformada por una parte polar e hidrofílica y una parte apolar hidrofóbicas, estos reactivos son ocupados para mejorar las condiciones hidrodinámicas del proceso, algunas como aumentar el área de contacto entre la burbuja y las partículas minerales, estabilizar la espuma, reducir el tiempo de inducción entre la burbuja y la partícula (Gutiérrez, 2014).

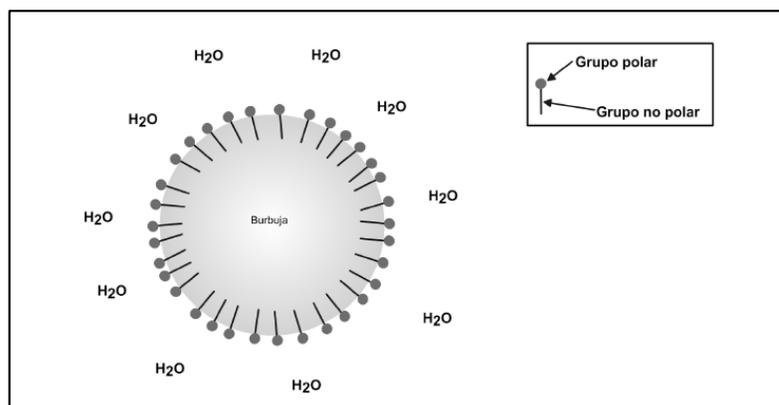


Figura 13. Esquema de la acción de un espumante (Gutiérrez, 2014).

El poder de la espuma generado está fuertemente influenciado por el tipo de colector y el espumante usado, además el poder o la capacidad de la espuma, aumenta con el número de carbonos hasta 6 o 7, luego su capacidad decae fuertemente cuando existen más de 8 átomos de carbono (Bulatovic, 2007). Notar que para el proceso no se necesita una espuma fuertemente persistente, ya que de ser así esta propiedad dificultaría su rápida evacuación y transporte a través de las canaletas, además que esta no debe generar una acción colectora de ganga.

Modificadores

El control de las propiedades a nivel superficial de las partículas y de la fase gaseosa es de vital importancia para lograr una máxima eficiencia del proceso. Aunque no se debe olvidar que la flotación se realiza a través de un medio constituido por tres fases, esta pulpa, posee propiedades físicas y químicas las cuales son en función de sus constituyentes ya sea el tipo de mineral que se trabaja, los reactivos o también el nivel de gas u oxígeno que se encuentra en ella.

Es por ello que en algunos casos se necesitan cambiar ciertas propiedades induciendo condiciones óptimas para lograr un proceso exitoso, en función de ello se utilizan estos reactivos.

Entre estos se pueden nombrar reguladores de pH, dispersantes, depresantes y activadores.

2.3.2 Parámetros que influyen en la recuperación de molibdeno

La molibdenita presenta flotabilidad natural, a pesar de ello existen aspectos relacionados con su tamaño y estructura cristalina que afectan su recuperación en el proceso de flotación. Entre un 40 a 50% de la molibdenita se pierde en la flotación primaria de minerales de cobre tipo pórfidos, por lo que existe un gran desafío en cuanto a mejorar la recuperación de esta especie, que depende del grado de liberación del mineral, contenido de óxido de molibdeno en la superficie de este, la asociación del mineral con ganga silicosa y/o pirita, la distribución de tamaño del mineral que se produce en la molienda, la presencia de cal entre otros factores. (Castro y Mayta, 1994).

En función de lo anterior se presentan algunos aspectos que van en desmedro de la recuperación de la Molibdenita.

Efecto del ion magnesio y calcio en el agua de proceso

La flotación es un proceso intensivo de agua; sin embargo, debido a la escasez de recursos de agua dulce, aumento de la demanda social de agua fresca y la rigurosa regulación de uso del agua industrial, en algunos casos se requiere usar un agua con altos contenidos en sales y iones, los cuales son perjudiciales para la recuperación de algunas especies valiosas, como lo es la molibdenita (Wang y Peng, 2014). Puntualmente iones de calcio y magnesio son fuertes depresores

de ésta, ya que pueden formar coloides de hidróxidos, carbonatos y sulfatos, estos claramente pueden deprimir la flotabilidad de este mineral, ya que precipitan en su superficie disminuyendo su hidrofobicidad, a su vez interaccionan con las burbujas adhiriéndose a estas quitando área útil para una posible adhesión mineral valioso-burbuja (Castro, 2012).

En la Figura 14 se observa el efecto del cloruro de calcio y magnesio a diferentes valor de pH en partículas de molibdenita, se hace notar que a pH inferior a 8 el CaCl_2 (10^{-2}M) casi no tiene efecto en la recuperación de esta con un promedio de recuperación de un 85%, pero a medida que este valor sube la recuperación de esta especie baja, llegando a un valor mínimo de 60% a pH 11.

En cuanto al MgCl_2 (10^{-2}M) su efecto depresor es un poco más notorio, hasta pH 7 existe una recuperación promedio de 82%, pero a medida que sube este valor la recuperación de la molibdenita baja drásticamente llegando a un valor aproximado de 48% a un pH 11.

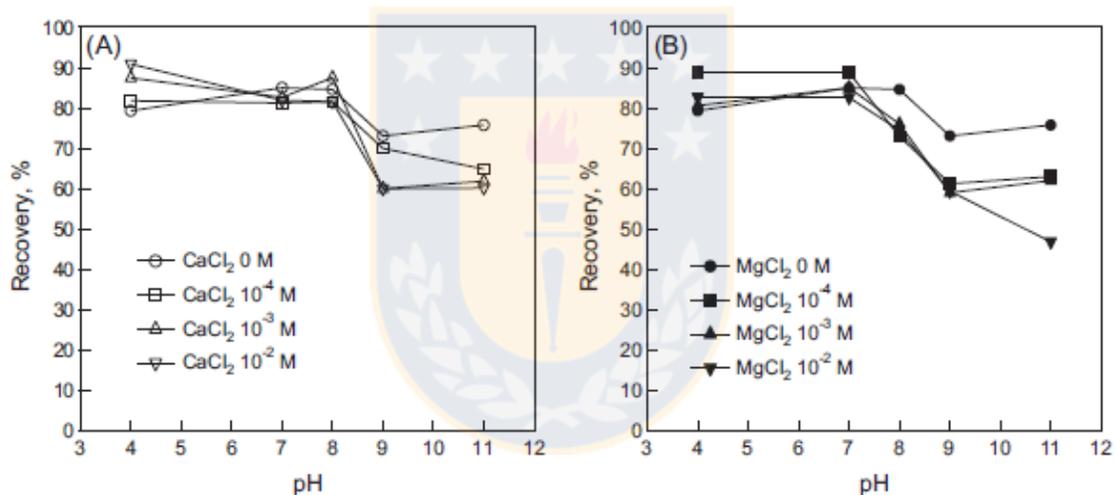


Figura 14. Efecto del CaCl_2 y MgCl_2 en la flotación de molibdenita a diferentes Valor de pH (Hirajima, 2016).

Más aún, otro estudio demuestra la fuerte depresión ejercida por los iones calcio en la flotación de la molibdenita, llegando a recuperaciones de 10% a una concentración de (10^{-2}M) y pH 10.5. (Figura 15). Esto principalmente a que el Catión Ca^{+2} reduce la carga superficial (borde) de la molibdenita, produciendo fenómenos de heterocoagulación entre esta especie metálica y la ganga (Gutiérrez, 2014) (Figura 16)

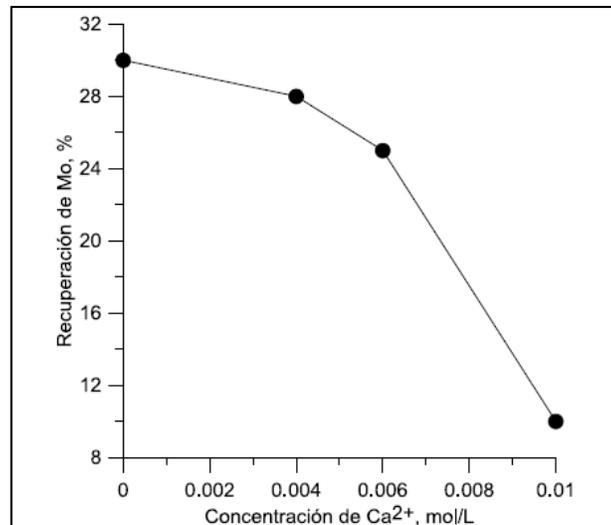


Figura 15. Efecto del calcio a diferentes concentraciones sobre la recuperación de Mo (López Valdivieso, 2005).

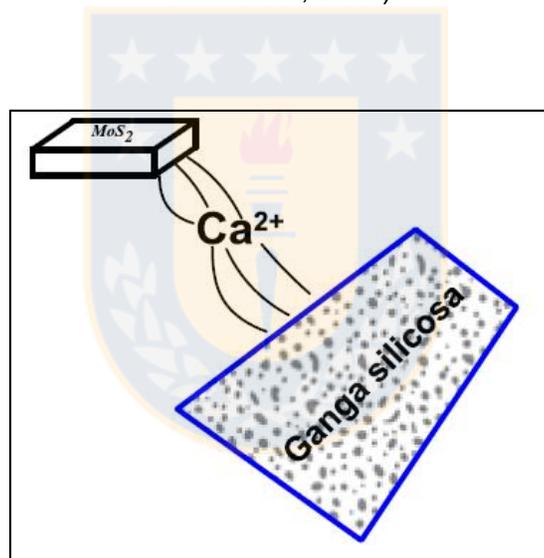


Figura 16. Fenómeno de Heterocoagulación entre partículas de molibdenita y ganga (Gutiérrez, 2014).

El fuerte efecto depresor de estos iones se puede explicar con las figuras mostradas a continuación, las cuales son diagramas de estabilidad de las diferentes especies de calcio y magnesio. La Figura 17 muestra que el precipitado de CaCO_3 se produce a valores de pH superiores a 8.3 y 9.3 a 10^{-2} M 10^{-4} M respectivamente, la formación de estos precipitados de CaCO_3 indican que una ligera disminución en la flotabilidad de la Molibdenita a pH superior a 9, lo cual podría deberse a la presencia de CaCO_3 en la solución. En cuanto a la Figura 18 de las especies de magnesio, se observa precipitado de MgCl_3 a valores de pH superiores a 9.4 y 10.4 a 10^{-2} M 10^{-4} M respectivamente. De los dos precipitados, ya sea el de Calcio o Magnesio se hace notar que ambos son perjudiciales a

valores de pH mayor 9, pero el efecto depresor mayor lo hacen los precipitados de magnesio y a concentraciones de 10^{-2} M, ya que a concentraciones de 10^{-4} M la formación de precipitados es mínima (por Nagaraj y Farinato 2014)

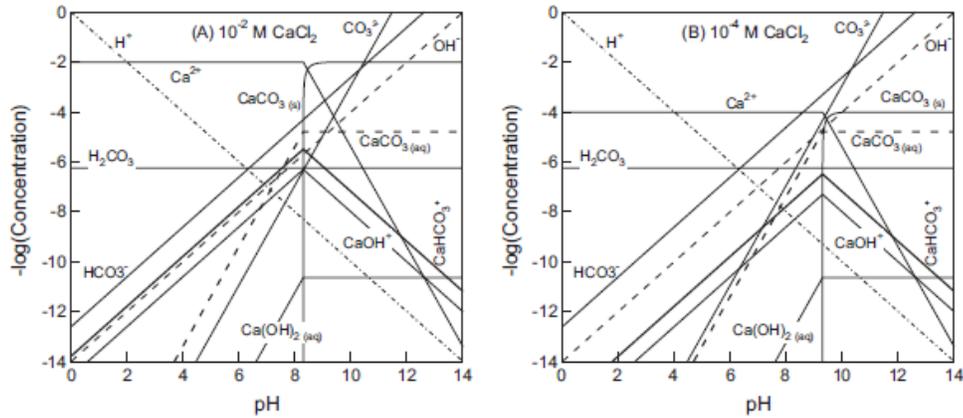


Figura 17. Diagrama de Especies para el CaCl_2 en Solución acuosa (Hirajima, 2016).

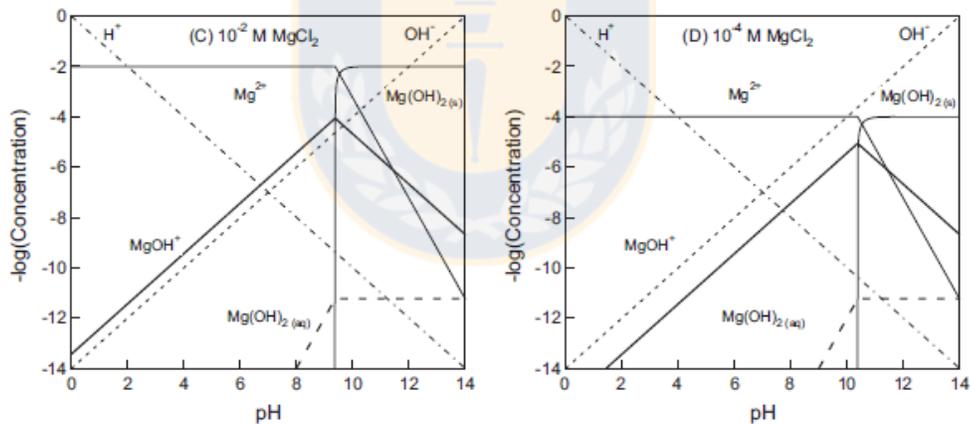


Figura 18. Diagrama de especies para el MgCl_2 en solución acuosa (Hirajima, 2016).

En la Figura 19 se puede apreciar la relación entre el pH y el ángulo de contacto a diferentes concentraciones tanto para CaCl_2 y MgCl_2 , con esto podemos entender la incidencia de estos iones en el ángulo de contacto de la fase sólida y la fase húmeda, o una medida de la humectabilidad de la superficie en presencia de estos iones. En la Figura 19.a) se puede observar que el ángulo de contacto en presencia de CaCl_2 permanece casi constante hasta un valor de pH 8, a valores superiores se observa una leve disminución llegando a un valor mínimo de 67° a un pH de 11. En cuanto a la presencia de MgCl_2 se logra ver que el ángulo de contacto permanece constante hasta un valor de pH 7, en este valor existe un fuerte quiebre, siendo este más agudo a medida que

aumenta el pH y la concentración de MgCl_2 , llegando a un valor mínimo de 25° a un valor de pH igual a 11 (Figura 19.b)

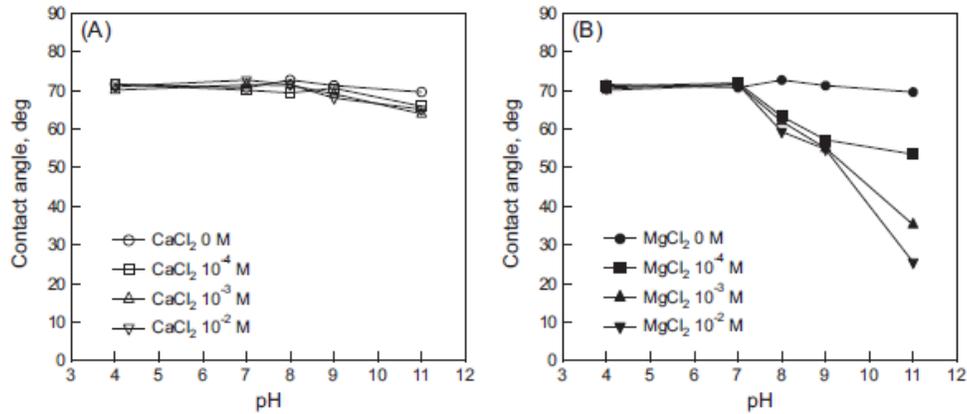


Figura 19. Efecto del CaCl_2 y MgCl_2 en el ángulo de contacto de la molibdenita a diferentes valor de pH (Hirajima, 2016).

En cuanto al potencial Z, el cual indica la carga aparente que adquiere la superficie del mineral en un medio acuoso y predice el comportamiento coloidal de una suspensión (Gutiérrez, 2014). Se observó que no existe incidencia de los iones y del pH en este valor ya que siempre permanece negativo en todo rango como se aprecia en la Figura 20 y Figura 21.

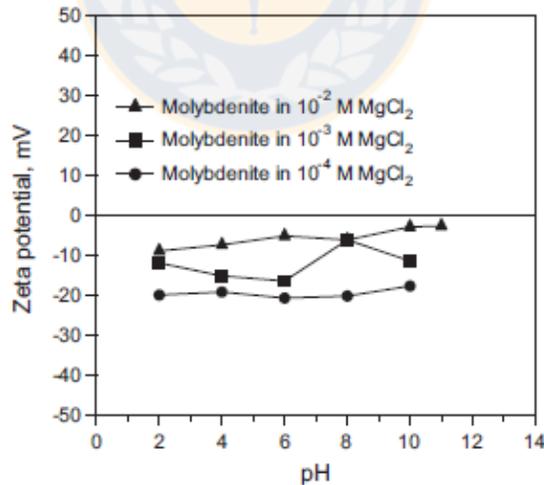


Figura 20. Efecto del CaCl_2 y MgCl_2 en el potencial z de la molibdenita a diferentes valor de pH (Hirajima, 2016).

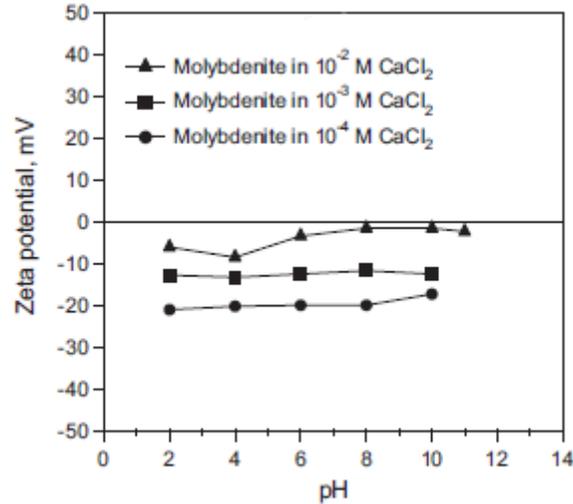


Figura 21. Efecto del CaCl₂ y MgCl₂ en el potencial Z de la molibdenita a diferentes valor de pH (Hirajima, 2016).

Podemos concluir que la presencia de estos iones en solución claramente produce un efecto depresor en la flotabilidad de la molibdenita, siendo este más notorio a valores de pH 7 y 8 para MgCl₂ y CaCl₂ respectivamente, esto debido a que en dichos pH existe la formación de precipitados en la superficie de esta, estos hacen que su superficie sea menos hidrofóbica, esta al estar más humectada aumenta los tiempos de inducción partícula-burbuja (Suyantara et al. (2016), sin olvidar los fenómenos de heterocoagulación, los que en definitiva van en desmedro de la flotación de este mineral.

Efecto del tamaño de partícula

El tamaño de grano de la molibdenita tiene una gran incidencia en la flotabilidad de esta, como se dijo anteriormente las caras poseen hidrofobicidad mientras que los bordes son hidrofílicos, por lo cual existe una relación cara/borde la cual es directamente proporcional a la flotabilidad de esta especie. Dada la estructura de este mineral, en los procesos de reducción de tamaño la tendencia a la ruptura es a través de los bordes, con lo cual a reducirse de tamaño disminuye notablemente su relación cara/borde Figura 22.

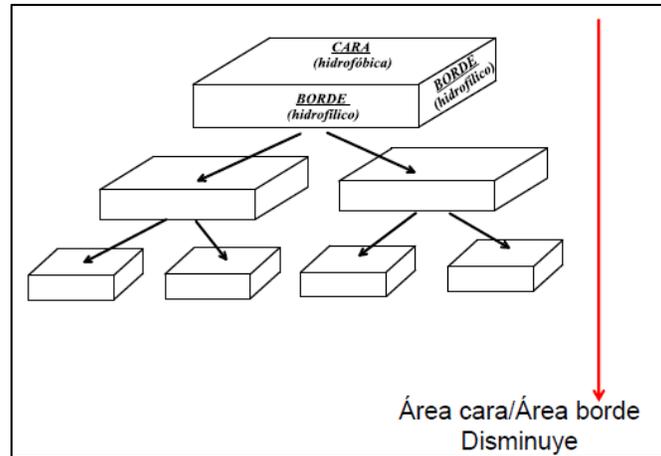


Figura 22. Efecto de la reducción de tamaño en la molibdenita en la relación cara/borde.

Con lo cual la partícula pierde gradualmente su hidrofobicidad natural, en la Figura 23 se logra apreciar el efecto del tamaño y el pH, la flotabilidad disminuye a medida que aumenta el pH y disminuye el tamaño de partícula.

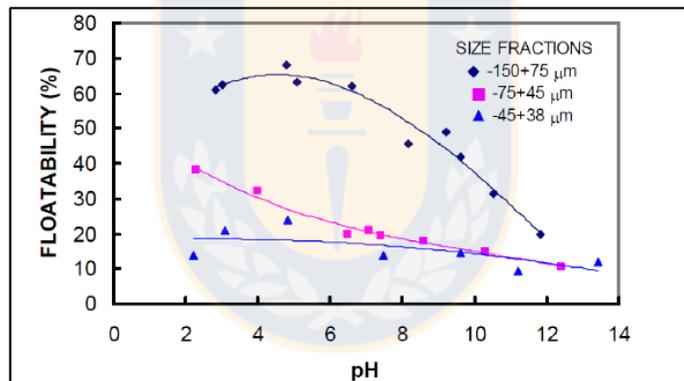


Figura 23. Flotabilidad de la molibdenita en función del pH y el tamaño de partícula (Tabares et al., 2006).

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Qemscan

El Qemscan (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) es un sistema de tipo automático el cual realiza análisis químicos y mapeo de minerales en alta resolución, funciona en base a un SEM (Scanning Electron Microscope) en conjunto con cuatro espectrómetros de rayos x (EDS:energy-dispersive x-ray spectrometers). Al emitir los electrones del SEM sobre la muestra se generan backscattered electrons (BSE) que son medidos para localizar las partículas individuales dentro de la muestra. Después de lo anterior, se realiza un barrido a través de la muestra con un espaciado que fija el operador, este generalmente se realiza con resolución entre 0.2 [um] y 25 [um], el haz de electrones genera una emisión de rayos X, debido a la liberación de energía emitida por los electrones de alta energía dentro del elemento los cuales ocupan los espacios dejados por los electrones de niveles energéticos más bajos, los que son sacados de su posición.

Los espectros de rayos X obtenidos son comparados con una base de datos y de esta forma se identifican todas las fases minerales presentes en la muestra en cada espacio de la grilla (Ayling et al., 2012; Pirrie et al., 2012).

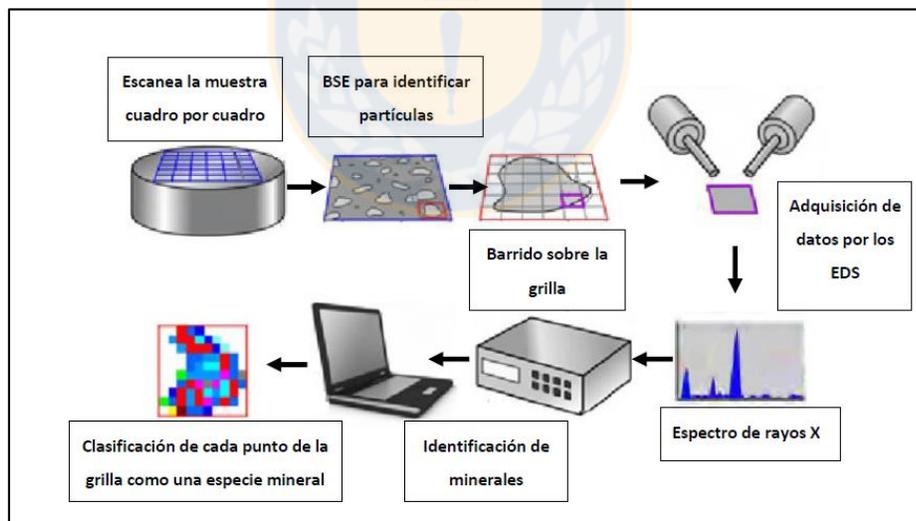


Figura 24. Esquema de funcionamiento del equipo Qemscan (Caracterización mineralógica del proceso metalúrgico y su impacto en la producción de concentrados de Cu y Mo en CMDIC).

Este análisis de mapeo bi dimensional donde se mide el área de cada partícula, se realiza mediante un espaciamiento predefinido, permite determinar imágenes de las partículas, mineralogía modal cuantitativa, estimación del tamaño de grano e información de asociación mineral (Gottlieb et al., 2000).

- Análisis Mineralógico en Masa (Bulk Mineral Analysis, BMA): El haz de electrones recorre la muestra mediante líneas paralelas equiespaciadas. Se utiliza para obtener una gran cantidad de datos ya que es más rápido que otros modos, sin embargo, no es posible contar con la imagen de la muestra, entrega la información de la mineralogía y las proporciones entre éstas (Gottlieb et al., 2000).

- Búsqueda de Mineral Específico (Specific Mineral Search, SMS): Este método sólo analiza una sub población de las partículas presentes. Basado en la premisa que la fase buscada emite más BSE que el resto de las fases. Esto permite que sólo se estimen puntos de la grilla que contengan la fase deseada. Este método se utiliza principalmente en menas con sulfuros de baja ley (Gottlieb et al., 2000).

- Búsqueda de Mineral Traza (Trace Mineral Search, TMS): Se identifica una fase mediante la acotación de la intensidad del BSE, analizando solo los puntos de la grilla que lo cumplan, maximizando la eficiencia del análisis y así poder detectar fases que se encuentran en trazas (Qemscan operational modes, SGS Minerals services, 2013).

- Field Scan: Este modo de medición sirve para mapear secciones pulidas. Recolecta el espectro químico en un intervalo determinado del campo de visión. Cada campo de visión es entonces procesado para generar una única imagen integrada con colores que identifican a cada fase mineral presente en la muestra (Qemscan operational modes, SGS Minerals services, 2013).

Notar que con el análisis Qemscan no es posible diferenciar entre poliformos, producto que la determinación del mineral se hace a base de la emisión de rayos X secundarios, los cuales dependen de los átomos y no de su ordenamiento espacial (estructura cristalina) Lo dicho anteriormente diferencia al Qemscan de técnicas como XRD, mientras que el primero detecta la emisión de rayos X secundarios producto de la incidencia de un haz de electrones, el segundo se basa en la difracción de rayos X producto de las nubes de electrones que envuelven a los átomos individuales de los minerales, y con esto caracteriza la estructura cristalográfica y la mineralogía.

Lo que implica que el XDR no es capaz de caracterizar material no cristalino (amorfo), a diferencia del Qemscan que no es afectado por eso (Ayling et al., 2012).

3.2 Análisis de Datos

El presente análisis tuvo como objetivo analizar las principales causas de las bajas recuperaciones de la especie molibdenita en el circuito colectivo de CMDIC, este se realizó en base a data operacional de los años 2015 al 2017, se pudo clasificar en dos tipos; data operacional y data Qemscan.

3.2.1 Data operacional

Este análisis tuvo como información la base de datos anuales de la compañía, en la cual se pueden encontrar tratamientos, leyes de alimentación, recuperaciones, origen de alimentación, P80, distribución granulométrica, producción de concentrado entre otros.

Cada una de estas variables se analizó tanto para la etapa de Flotación Rougher como la etapa de flotación Colectiva.

Análisis circuito de flotación colectiva: Para esta se recopiló data operacional de los años 2015/2016/2017 y se procedió a graficar en forma mensual tanto la recuperación y ley del molibdeno en el concentrado concol, esto en función de parámetros los cuales podrían dar indicios de la solución al problema de las bajas recuperaciones.

Análisis etapa rougher: A la fecha de realizar este trabajo no se tenía información en cuanto a las recuperaciones de molibdenita en esta etapa del circuito, por lo cual fue necesario hacer un trabajo un poco más exhaustivo para la obtención de información. Los dos puntos de salida del circuito de flotación son la etapa rougher y la scavenger, por lo que es muy importante el análisis de estas en cuanto a recuperación de concentrado, pero como se dijo anteriormente, no se posee información de la etapa rougher, como tampoco de la etapa scavenger.

Al realizar un balance de masa y fijar valores con el objetivo de obtener recuperaciones de las dos etapas, necesariamente se tendrá que sacrificar un tipo de información (recuperaciones y/o ley rougher o scavenger) ya que al hacer la aproximación aparecen valores irrisorios tanto de leyes como de recuperación (mayores a 100 %). Es por ello que se eligió la etapa rougher como etapa de estudio, ya que es la que mayor concentrado recupera. Como información de planta se tenía los tratamientos, leyes de alimentación y ley del concentrado rougher y relave total generado por lo que para obtener una estimación de la recuperación se necesitó calcular la cantidad de concentrado generado.

De un muestro global en condiciones de operación normal de planta se calculó que el aporte del relave rougher al relave total era de un 94% (Anexo E).

De esta manera se pudo estimar la cantidad de concentrado generado por la etapa, asumiendo que del relave total generado por la planta, el 94% es el aporte de la etapa rougher.

Con ello se estimó la cantidad de concentrado generado y con lo cual se realizó una estimación de la recuperación de la especie molibdenita.

La Figura 25 hace alusión a la metodología para poder estimar la recuperación rougher.

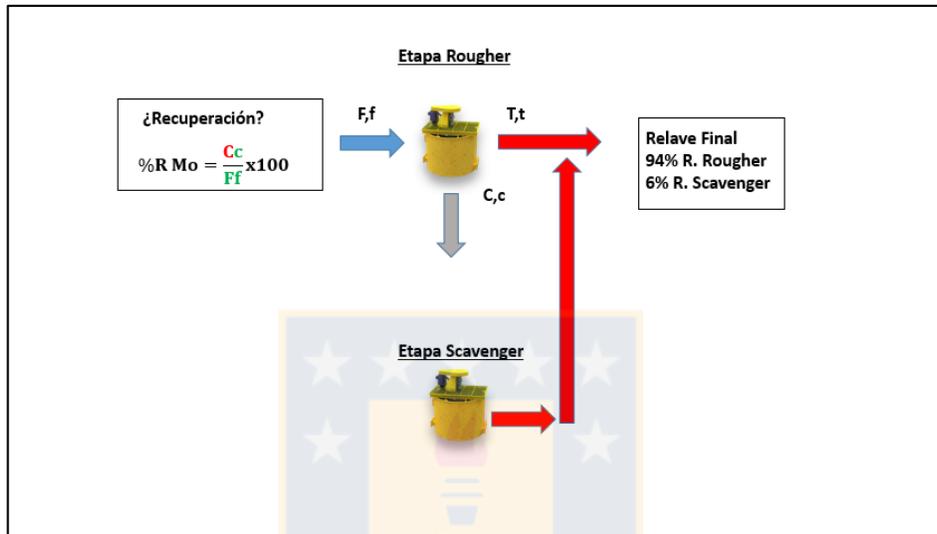


Figura 25. Esquema aproximación de recuperación rougher (Elaboración propia).

De esta manera se obtuvieron valores de recuperación, pero no todos ellos son válidos ya que en algunos casos la medición de las leyes no es un dato 100% confiable, ya que el medidor en línea o Courier no calcula valores correctos, por lo que se realizó un primer filtro, el cual consistió en eliminar los valores de ley igual o menor a 0, posterior a ello se filtró por recuperación de molibdenita, eliminando los valores de recuperación menores a 0 y mayores a 100%.

Finalmente se realizaron gráficos de control, con el objetivo de mejorar la confiabilidad de los datos obtenidos mediante esta aproximación, se realizaron con 3 intervalos de confianza, 68% (1 sigma), 95%(2 sigma) y 99%(3 sigma) con ello podemos asegurarnos que los datos están dentro del intervalo de confianza o alrededor de la media de los datos, el valor elegido fue de 68%, ya que los intervalos de 99% y 95% abarcaron valores que incluían recuperaciones del 100%, lo cual no tiene sentido.

En la Tabla 1 se muestra la media para cada año, junto a su desviación estándar y en la parte inferior los límites de control tanto superior como inferior. Mientras que desde la Figura 26 a la Figura 28 se muestra los gráficos de control de la recuperación de Mo rougher asociados a cada año.

Tabla 1. Media, desviación estándar y límites de control para cada año evaluado.

2015		2016		2017	
Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
64,6 %	21,2	45,6%	22,4	45,5%	17,4
LCS	LCI	LCS	LCI	LCS	LCI
85,9%	43,3%	68,1%	23,1%	62,9%	28,1%

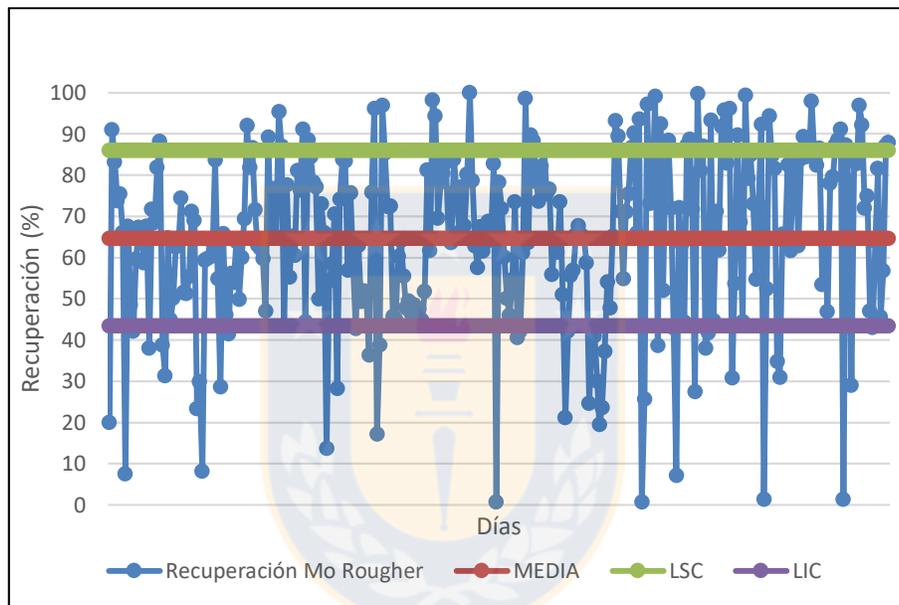


Figura 26. Gráfico de control recuperación rougher (2015) (Elaboración propia).

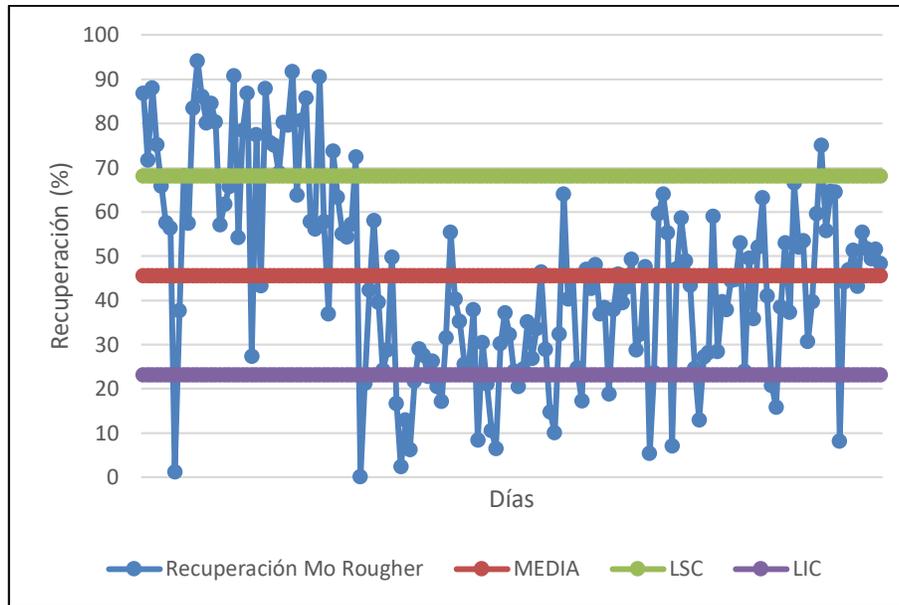


Figura 27. Gráfico de control recuperación rougher (2016) (Elaboración propia).

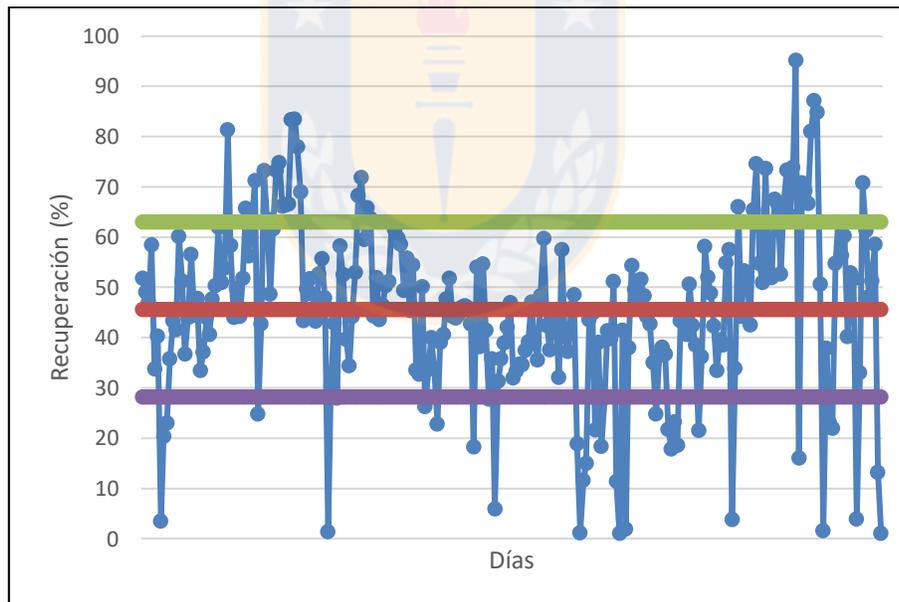


Figura 28. Gráfico de control recuperación rougher (2017) (Elaboración propia).

Con este tipo de gráficos es posible descartar los valores que están fuera del intervalo de confianza, con ello lograr una mayor confiabilidad de los datos, finalmente se procedió a graficar los valores de recuperación en función de parámetros de planta.

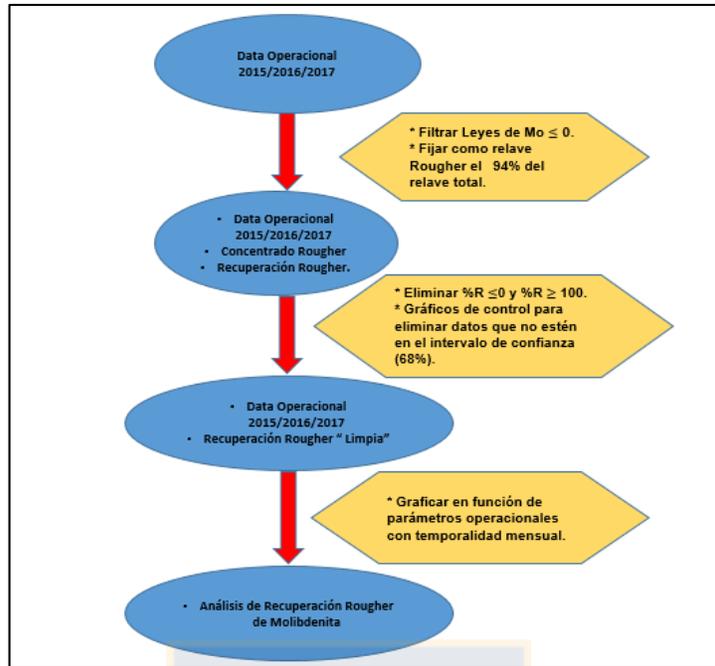


Figura 29. Esquema de plan de acción recuperación rougher de molibdenita.



Figura 30. Parámetros evaluados en flotación rougher.

3.2.2 Informes Qemscan

La información Qemscan corresponde a 85 informes (semanas) desde Junio del 2016 hasta Diciembre del 2017 los cuales recopilan información de las diferentes corrientes involucradas en el proceso, entre ellas alimentación a línea 3 (A.L.3), relave ABC, relave scavenger, concol. La alimentación a línea tres fue elegida por ser la que mayor mineral procesa, los relaves rougher y scavenger porque son salidas del proceso, por último el concol porque es el producto.

En conjunto se evaluaron 2500 datos, los cuales abarcaron grados de liberación de partículas y la distribución de tamaños de esta, asociaciones y tamaños de grano en cada etapa del proceso.

Estos informes entregan información de tipo

-Modal: Minerales encontrados en la muestra, es común que cada laboratorio mineralógico posea una “biblioteca de minerales” para cada minera.

-Distribución modal: agrupación de minerales por tipo ej.; sulfuros de cobre-hierro, sulfuros de cobre, silicatos, arcillas entre otros.

-Ocurrencia de cobre y arsénico: como se distribuye el cobre presente en la muestra en los distintos minerales presentes ej. calcopirita, bornita, calcosina, covelina, enargita y para arsénico enargita/tennantita.

-El grado de liberación: Este indicador quiere decir el porcentaje de superficie libre que posee la partícula mineral tanta para cobre, arsénico, hierro, molibdeno, ganga (Principalmente cuarzo). Distribuyéndose entre libre, mayor al 80 %, entre 50% y 80%, 20% y 50% y ocluida.

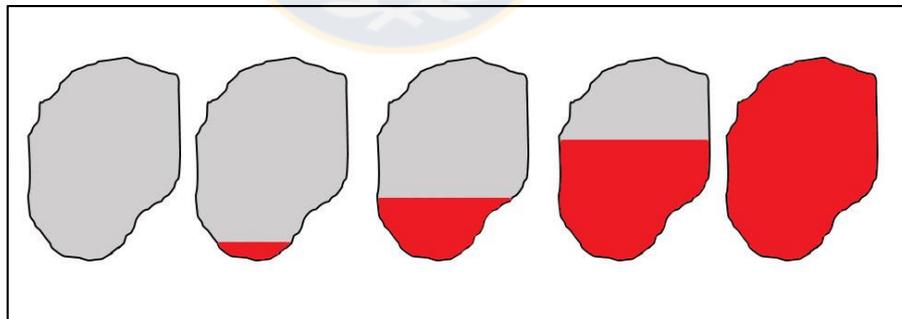


Figura 31 Esquema del grado de liberación.

-Asociaciones: las asociaciones que posee los minerales de cobre, arsénico, hierro, molibdeno, ganga.

-P80: es el tamaño de tamiz que dejaría pasar 80% de las partículas (tamaño de grano) encontrados en la muestra, expresados en micrones.

Esta información se trabajó en conjunto con la de la data operacional, en cuanto a leyes y recuperaciones con el objetivo de poder encontrar una tendencia que pueda ayudar a entender el porqué de las bajas recuperaciones de la molibdenita. Para esta etapa se utilizó el programa estadístico Minitab y Microsoft Excel. El primero para realizar estadísticas básicas, histogramas, regresiones lineales con ajuste, gráficas de intervalo (95% intervalo de confianza), mientras que el segundo fue principalmente para realizar gráficos combinados y de control.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Evolución de los indicadores molibdeno en CMDIC

En la Figura 32 se puede apreciar la evolución de los indicadores operacionales más importantes en cuanto a la molibdenita., se logra ver que desde el año 2007 hasta el 2017 existe una gran variabilidad en cuanto a las leyes de alimentación de molibdeno, siendo la más alta en el año 2014 y la más baja en el 2012, esto se debe a los diferentes sectores que son explotados, los cuales poseen diferentes grados de enriquecimiento de este mineral. Las recuperaciones también exhiben variabilidad y a la vez una leve tendencia de correlación a la ley de alimentación de Molibdeno.

En el año 2007 la ley de alimentación de molibdeno fue de 187 ppm y recuperación de 70%, 80% y 56% para la etapa colectiva, selectiva y global respectivamente. Las recuperaciones anteriormente dichas fueron aceptables a las condiciones de operación (Ley de Mo en Alimentación), pero desde el año 2008 se ve que todas las recuperaciones bajan notablemente, a tal punto que estas hasta la fecha nunca han vuelto a acercarse a los valores obtenidos antes de este año, obteniéndose los valores más bajos durante el año 2017, las cuales fueron de 45%, 54% y 24% para recuperación colectiva, selectiva y global respectivamente. Realizando un Benchmarking de algunas empresas mineras se hace notar que tales índices son inferiores en comparación al de otras operaciones a nivel nacional (Figura 33)

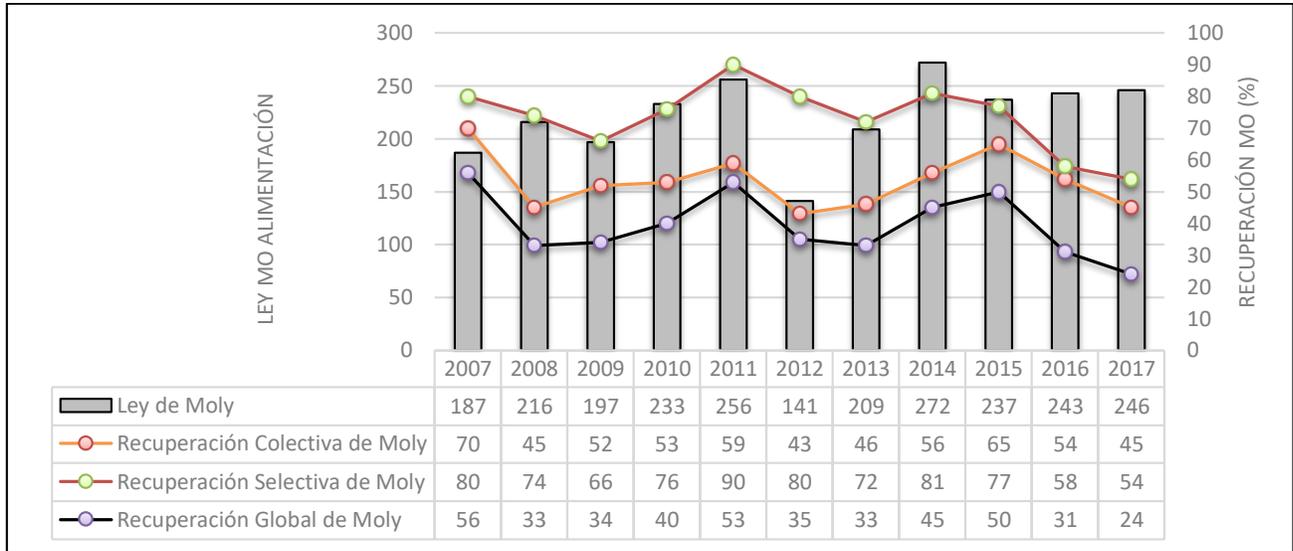


Figura 32. Evolución de indicadores de molibdeno en CMDIC.

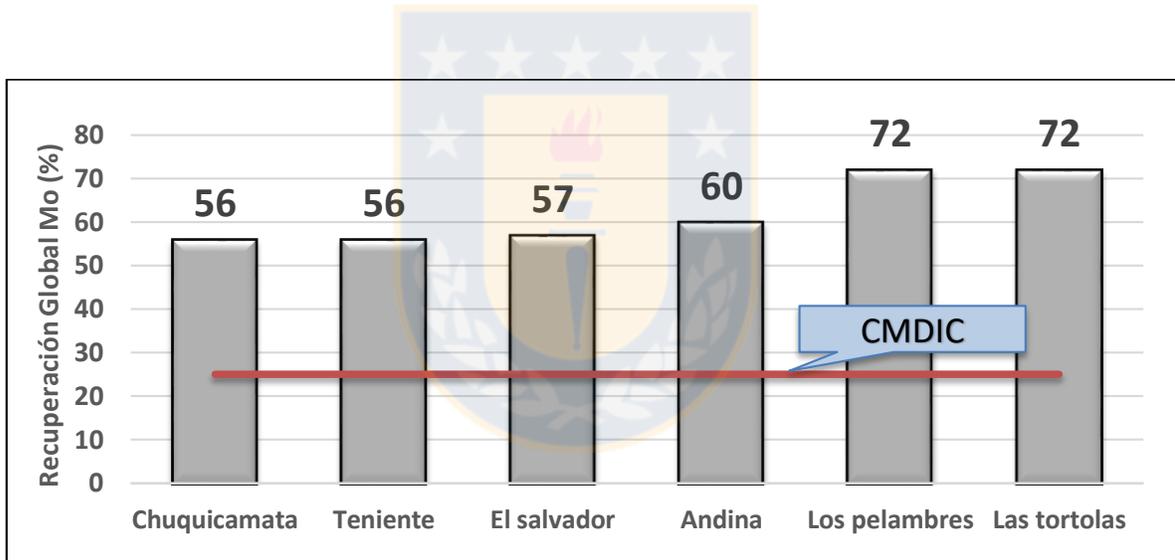


Figura 33. Benchmarking de recuperación global molibdeno en diferentes operaciones mineras.

4.2 Leyes de concentrado en etapa rougher y en el circuito de flotación colectiva

Para ambas etapas se realizó un seguimiento temporal tanto para la recuperación y ley de molibdeno en etapas rougher y en el circuito de flotación colectiva, para ambos indicadores operacionales se evaluó la incidencia de las variables operacionales y mineralógicas, obteniéndose así una correlación indicada por el coeficiente de correlación de Pearson, tal como se muestra en la Tabla 2 para etapa rougher y Tabla 3 para el circuito de flotación colectiva.

Los valores en azulado de ambas tablas muestran índices positivos en cuanto a cada variable, esto quiere decir que al aumentar su valor favorece el proceso, tanto en ley del concentrado como en recuperación, en cambio cuando aparece el valor en color plomo quiere decir que para esas variables al aumentar su contenido desfavorecen las variables analizadas (recuperación y ley).

De la Tabla 2 y Tabla 3 se puede apreciar la mayor correlación para la ley en el concentrado tanto para la etapa rougher y colectiva viene siendo la ley de Mo en la alimentación, obteniéndose una correlación de un 40 y 50.2 para la etapa la etapa rougher y colectiva respetivamente, se da a conocer que el circuito colectivo y selectivo de CMDIC es fuertemente condicionado por la ley de molibdeno en la alimentación.

En cuanto a la variable que no es favorable para la ley de Molibdeno en los concentrados, se destaca el contenido de arsénico en la alimentación ya que al aumentar la ley de este en la alimentación la ley de molibdeno baja considerablemente en ambas etapas de concentración, esto por tratarse de un elemento (a la forma de Enargita) que “ensucia” los concentrados.

4.3 Recuperación etapa rougher y circuito de flotación colectiva

En cuanto a la recuperación en ambas etapas, se hace notar la variable más incidente y positiva en cuanto a la recuperación de molibdenita en la etapa rougher es el contenido de hierro en el concentrado (Tabla 2).

Notar que el grado de asociación entre la molibdenita y la pirita es mínimo, ya que como se verá más adelante este mineral se encuentra mayoritariamente liberado en todas las etapas del circuito, esto se comprobó gracias a la información Qemscan recopilada. Con ello se postula que el principal variable incidente en la recuperación rougher no es debido a un input, sino a una variable de salida, debido principalmente a la relación existente entre el arrastre mecánico ocasionado por la pirita hacia el concentrado rougher.

En cuanto a las variables que al aumentar su valor inciden negativamente en la recuperación se hace notar el porcentaje de sólidos. Esto debido que al aumentar el valor de este parámetro, dificulta la movilidad y el proceso de selección en cuanto a las partículas minerales, con esto bajando la probabilidad de adhesión entre una partícula mineral y la burbuja, es por ello que en etapas posteriores, por ejemplo flotación columnar, se ocupa un porcentaje de solido inferior para favorecer la selectividad.

Tabla 2. Coeficiente de correlación de Pearson etapa rougher.

Variable	Ley Mo Concentrado Rougher (ppm)	Variable	Rec. Rougher Mo (%)
Mo Alimentación (ppm)	40,0	FeT en Concentrado Rougher (%)	41,3
FeT en Concentrado Rougher (%)	33,4	Densidad Mineral (t/m3)	14,6
AsT Alimentación (ppm)	32,5	Solidos Flotación Rougher (%)	15,6
UGM 5(%)	24,5	AsT Alimentación (%)	6,0

Tabla 3. Coeficiente de correlación de Pearson etapa colectiva.

Variable	Ley Mo Concol (ppm)	Variable	Rec. Mo Concol (%)
Mo Alimentación (ppm)	50,2	Rec. Mo 2°Limpieza (%)	27,0
Rec. Mo Concol (%)	40,2	Densidad Mineral (t/m3)	20,0
AsT en Concol (%)	32,6	AsT en Concol (ppm)	19,4
UGM 5 (%)	27,7	Malla +325 en Concol (%)	10,5

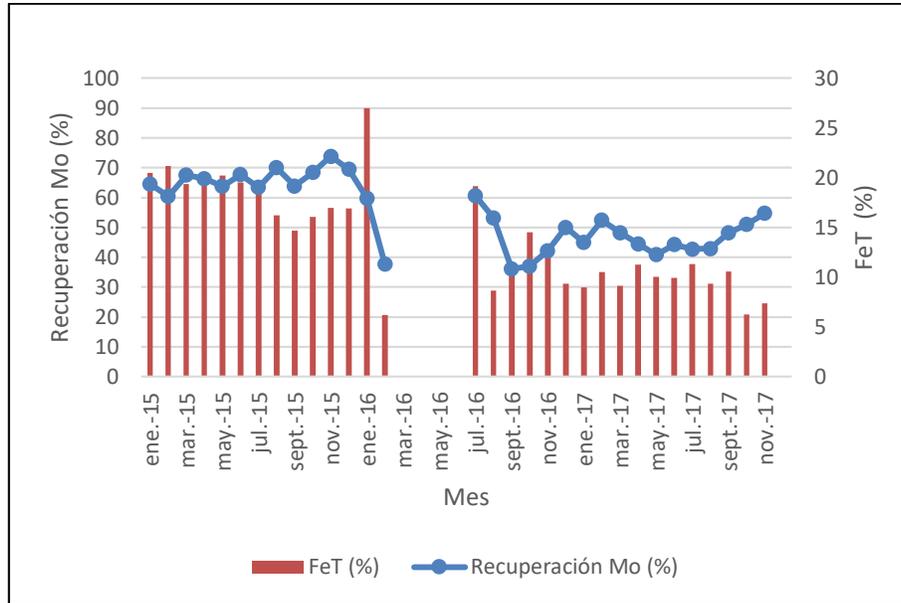


Figura 34. Evolución recuperación Mo rougher vs FeT concentrado rougher.

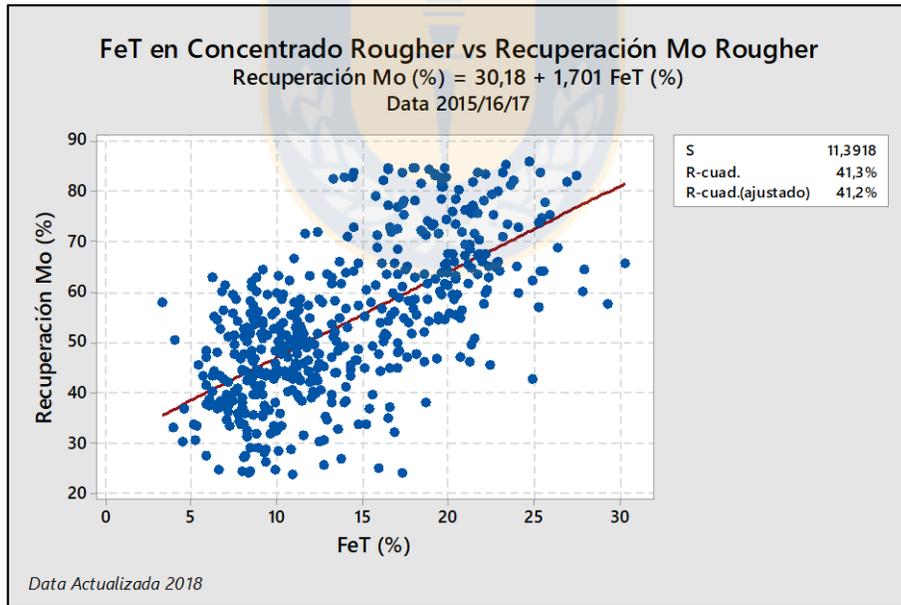


Figura 35. Correlación recuperación rougher Mo vs FeT en el concentrado rougher.

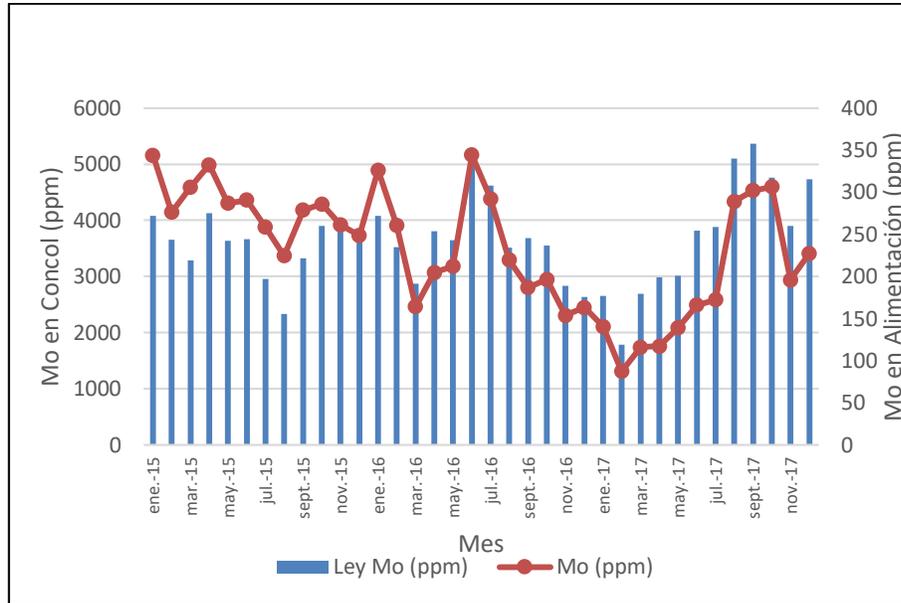


Figura 36. Evolución ley Mo concol vs Mo en alimentación a planta.

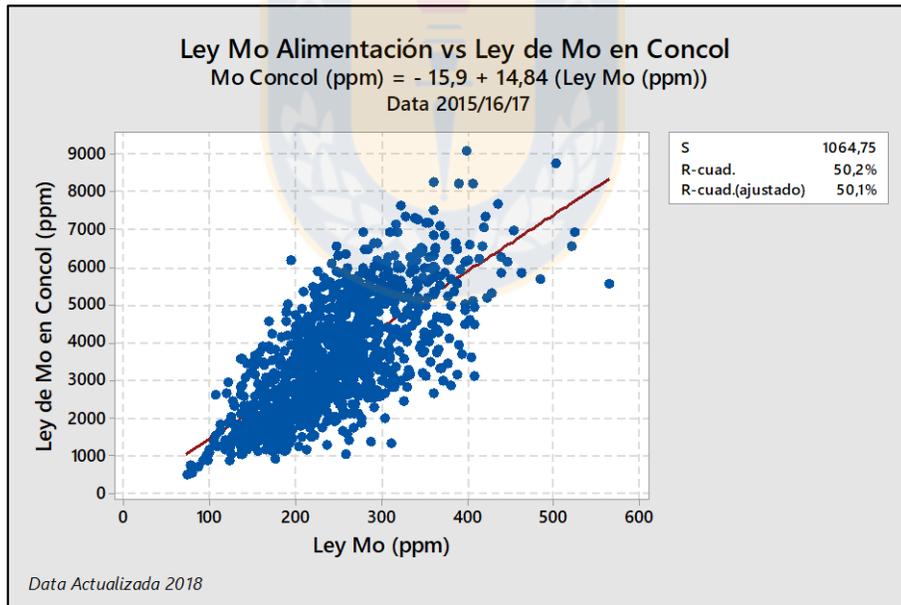


Figura 37. Correlación ley Mo concol vs Mo en alimentación a planta.

4.4 Análisis P80 enviado a etapa de flotación rougher o bulk

En las siguientes figuras se muestran histogramas de granulometría obtenida como producto de la molienda, este P80 de mineral es enviado a flotación rougher, se puede observar que CMDIC trabaja con un P80 alto, esto producto de que se le da un mayor énfasis al tratamiento, con ello los tiempos de residencia disminuyen y por ende la granulometría es más gruesa que en otras plantas concentradoras.

Desde el año 2015 la granulometría promedio ha tenido un leve aumento, teniendo el 2015 un P80 promedio de 198 [um] al año 2017 un P80 de 214 [um], ello debido a los planes de producción los cuales buscan privilegiar el aumento de tratamiento.

Notar que una de las causales de las pérdidas de la molibdenita en el circuito colectivo es la gran cantidad de Molibdenita fina y ultra fina entrando al circuito de flotación colectiva, ello no es una contradicción considerando el alto P80 que produce la molienda, ya este índice muestra un punto de la curva granulométrica pero no su forma, por lo cual podemos decir que el P80 no influye para la recuperación de molibdenita en el circuito colectivo.

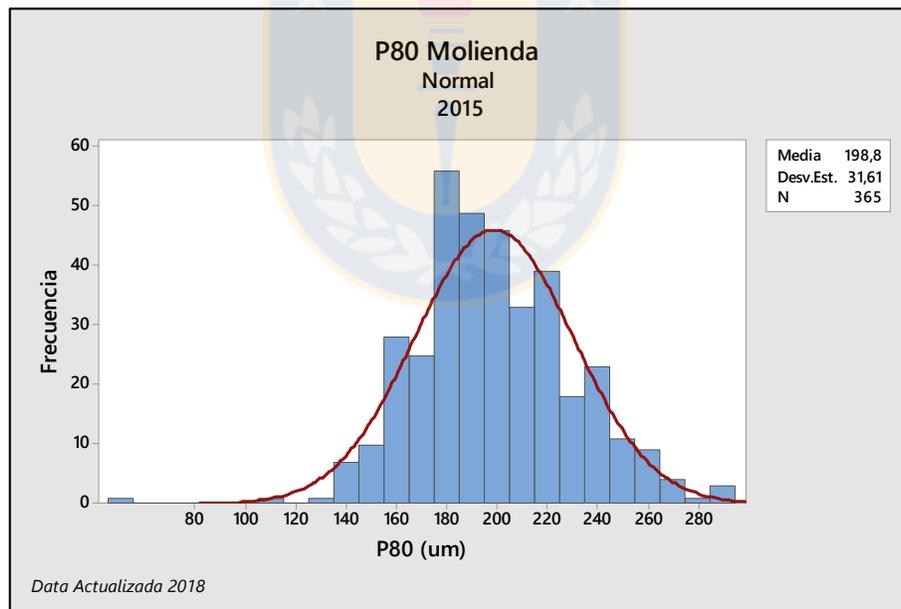


Figura 38. Histograma de P80 planta (2015).

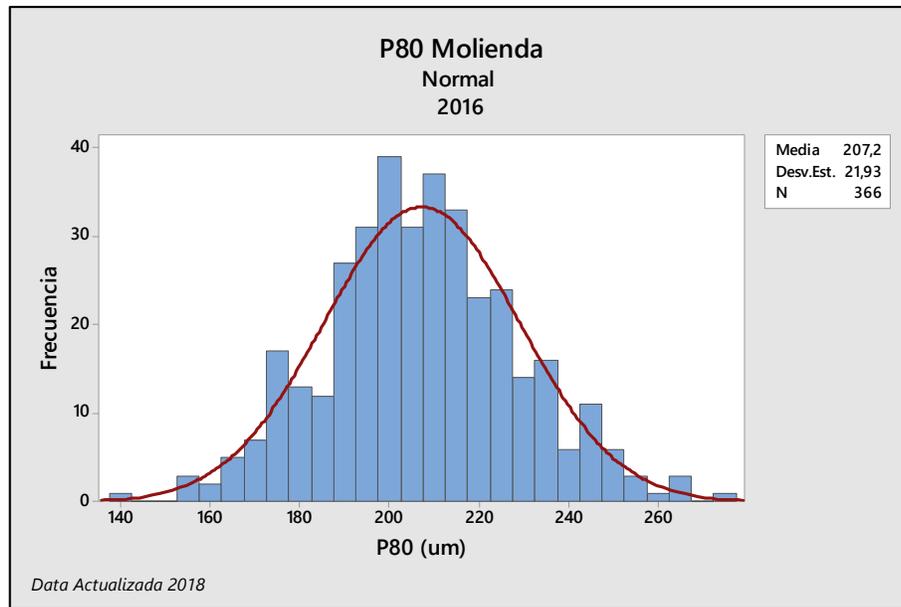


Figura 39. Histograma de P80 planta (2016).

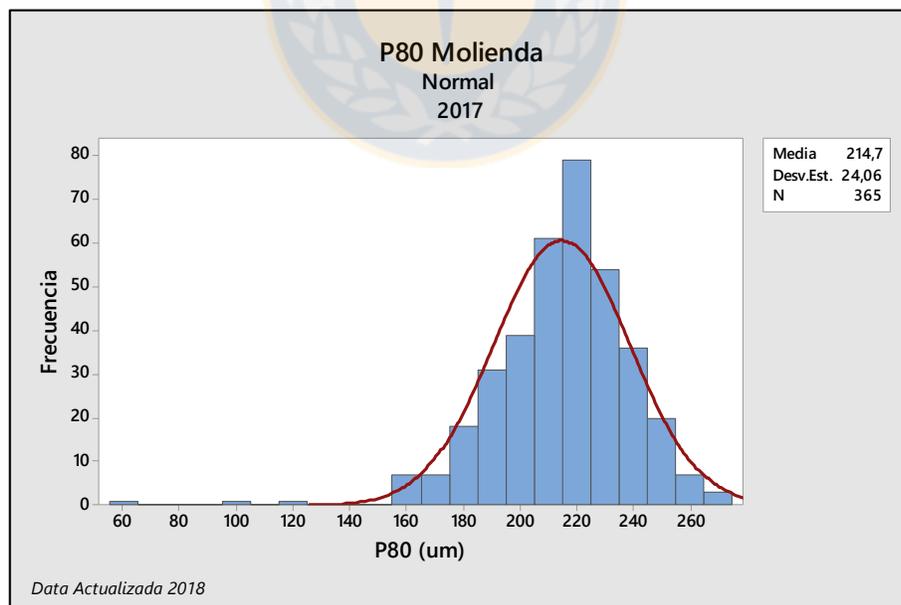


Figura 40. Histograma de P80 planta (2017).

4.5 Análisis de aguas de proceso

Como se mencionó anteriormente existen iones presentes en el agua que son perjudiciales en cuanto a la recuperación de la molibdenita, en particular iones calcio y magnesio, en particular el ion magnesio, el cual es un fuerte depresor de este mineral tal como se dijo en el capítulo 3. CMDIC hace uso de distintos puntos de extracción de agua para sus procesos (Tabla 4), entre ellos sector Coposa, Ujina y dewatering (drenaje desde fondo de mina).

En cuanto a Coposa Norte se comenzó a extraer agua de ahí a comienzos del 2008, fecha en la cual calza perfectamente con la caída de las recuperaciones de Molibdenita, con ello se hace evidente que el agua extraída en esos pozos es de una mala calidad metalúrgica logrando un gran efecto depresor en la recuperación de este mineral.

Tabla 4. Derechos autorizados de extracción de agua fresca

Fuente	Valor [lps]
Coposa (Norte, Sur, Portezuelo, Tradicional)	1.041
Ujina (Pabellón del Inca, Michincha, Quebrada Blanca)	322
Agua del minero (dewatering Rosario)	240
Total Extracción	1.603

En la Tabla 5 se puede apreciar el resultado a un análisis hecho al agua el año 2013, en donde se hace notar el alto contenido de magnesio en esta agua el cual es de 1.002 [mg/l], un gramo por litro, lo cual es fuertemente perjudicial para la recuperación de molibdenita, ya que para que este ion no tenga efectos perjudiciales, su concentración debe ser inferior a los 5 [mg/l] con ello se hace notar que CMDIC lidia con un problema muy complejo, incluso más que si trabajara con agua de mar (Castro, 2018).

Tabla 5. Análisis químico al agua de coposa norte, coposa sur y portezuelo 2013.

Parámetro	Unidad	Coposa Norte	Coposa Sur	Portezuelo
Calcio Total	mg/L	790	93	375
Magnesio Total	mg/L	1.002	55	256

En la Figura 41 se aprecia un antes y un después del 2008 (3 años antes y 4 después) en cuanto a leyes de alimentación de molibdeno y recuperación de este en el circuito colectivo, antes de ese año las leyes de alimentación son en promedio de 150 [ppm], mientras que después, hasta el año 2012

son de 208 [ppm], lo cual hacen condición totalmente normal para obtener una buena recuperación de molibdeno.

Pero a pesar de que desde el año 2008 en adelante las leyes de alimentación aumentaron, no fue así con la recuperación de este mineral, pasando en el 2007 de una recuperación aproximada del 65%, al año 2012 una recuperación promedio de 50%, decayendo 15 puntos porcentuales. En base a lo anterior, es que el ingreso de agua desde coposa norte con alto contenido en iones Magnesio, se identifica como la principal causa de las pérdidas de este mineral en el circuito colectivo en CMDIC.

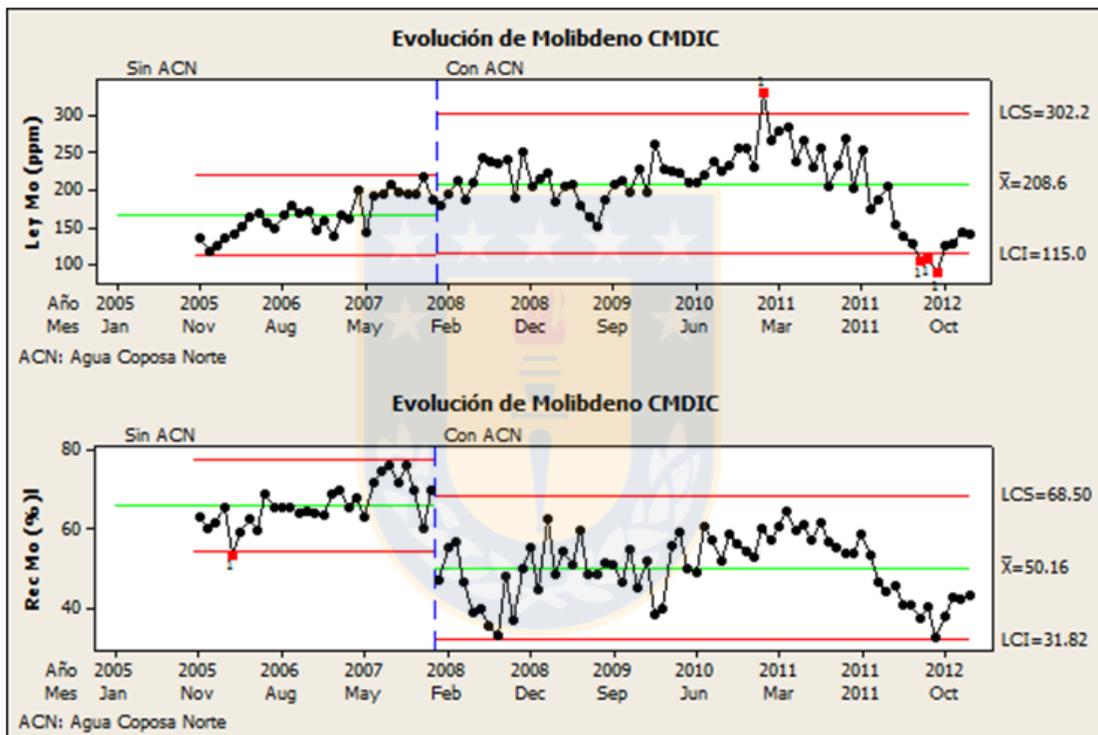


Figura 41. Efecto de la inclusión de agua fresca coposa norte sobre los índices metalúrgicos.

4.6 Análisis Qemscan

La siguiente información hace alusión al grado de liberación y a la distribución de tamaños de la partícula de Molibdenita en las diferentes etapas del circuito de flotación. En este punto hay que tener en cuenta dos consideraciones de suma importancia, el primero radica en que la flotación de molibdenita es en extremo sensible a el tamaño de grano o partícula, siendo los tamaños más pequeños los que más dificulta su flotación, dada que la relación cara/borde disminuye y con ello aumenta su hidrofiliidad, considerándose partículas ultra finas (no flotables) inferior a los 20 [um] (Castro, 2018).

El segundo punto a considerar, es que el grado de asociación de la molibdenita puede influenciar su recuperación, es sabido que la cal es usada en los circuitos de flotación como modificador del pH y con ello deprimir la flotación de la pirita la cual podría estar asociada a la molibdenita.

Del párrafo anterior y de lo dicho anteriormente “La recuperación Rougher de Molibdenita está relacionado con el contenido de Fe en el concentrado”, Se podría pensar que la molibdenita posee gran asociación con la pirita y con ello, se estaría deprimiendo ambos minerales. La afirmación anterior tendría mucho sentido, pero como se observa desde la Figura 42 a la Figura 49 esto queda descartado.

Se observa en la Figura 42 que la Molibdenita entra al circuito de molienda (A.L3) liberada en un 58,3% y con un porcentaje bajo los 20 [um] de 56,4%. Con ello se puede decir que las partículas liberadas, ultra finas y con bajo potencial de flotabilidad corresponden a un 32,8% de la alimentación. Con ello podemos asegurar que un 32,8% de la Molibdenita alimentada al circuito posee una probabilidad en extrema baja de flotar, más aun, este porcentaje aumentara a medida que pase por los circuito de reducción de tamaño.

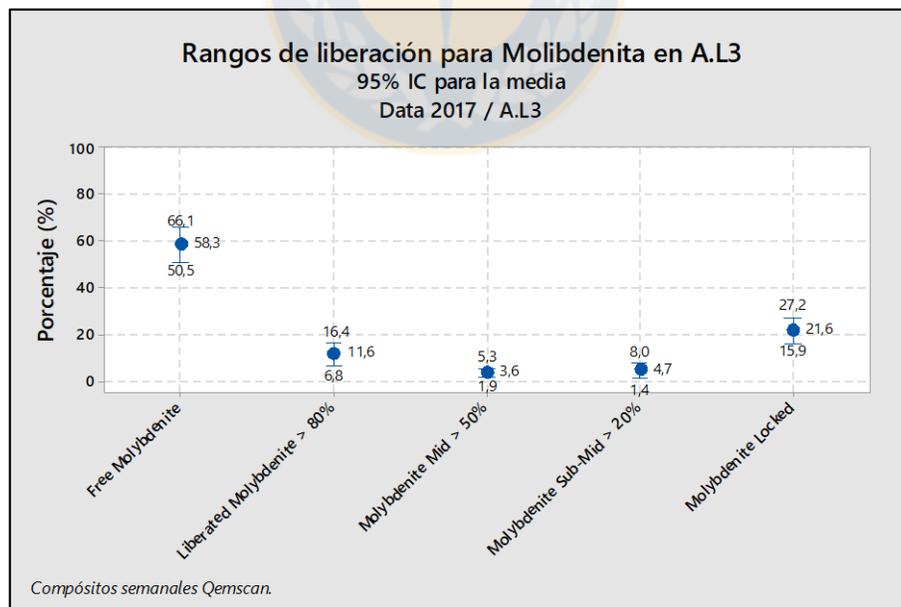


Figura 42 .Rangos porcentual de liberación de Molibdenita en AL.3 (2017)

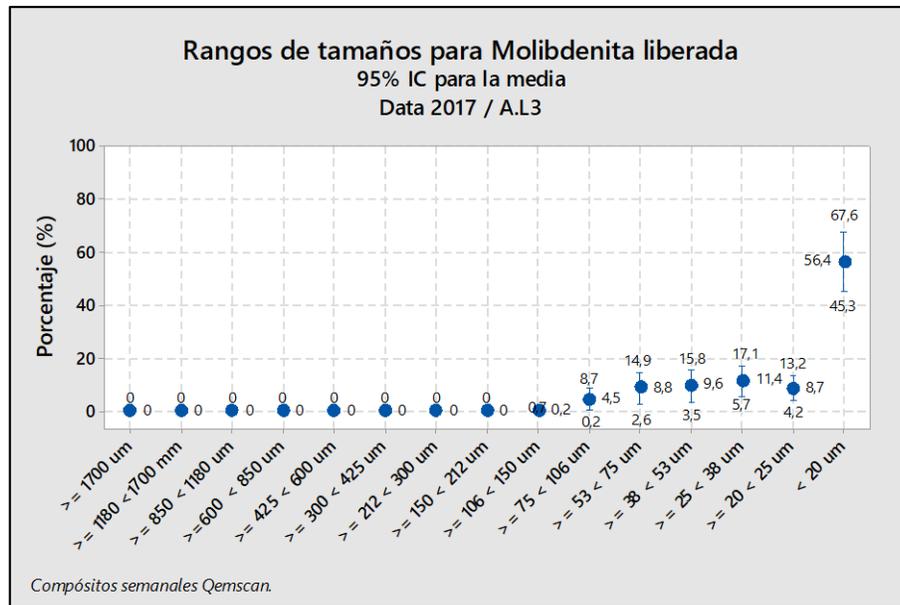


Figura 43. Distribución de tamaños porcentual de molibdenita liberada de en AL.3 (2017).

La Figura 44 y Figura 45 muestra un análisis hecho a la corriente del relave ABC, en el existe gran cantidad de molibdenita liberada (53,3%), lo cual en un circuito de flotación es deseable, dado que la partícula se encontraría en condiciones óptimas para su flotación, además se hace ver el aumento de la molibdenita ocluida de 21,6% (A.L3) a 29,08% (relave ABC) lo cual es normal ya que se trata de una corriente de relave la cual debería tener en su mayoría molibdenita en estas condiciones.

Al ver la Figura 45 se hace notar porque sigue habiendo molibdenita liberada en la corriente de relave, la Molibdenita aun estando liberada no es capaz de flotar debido a que en su mayoría (44,5%) se encuentra bajo los 20 um (- 625 #).

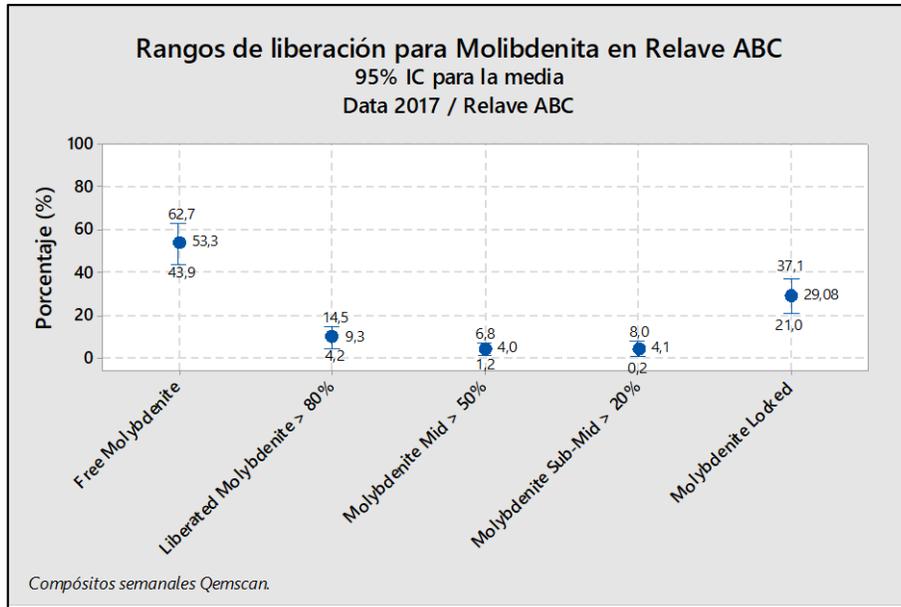


Figura 44. Rangos porcentuales de liberación de Molibdenita en Relave ABC (2017).

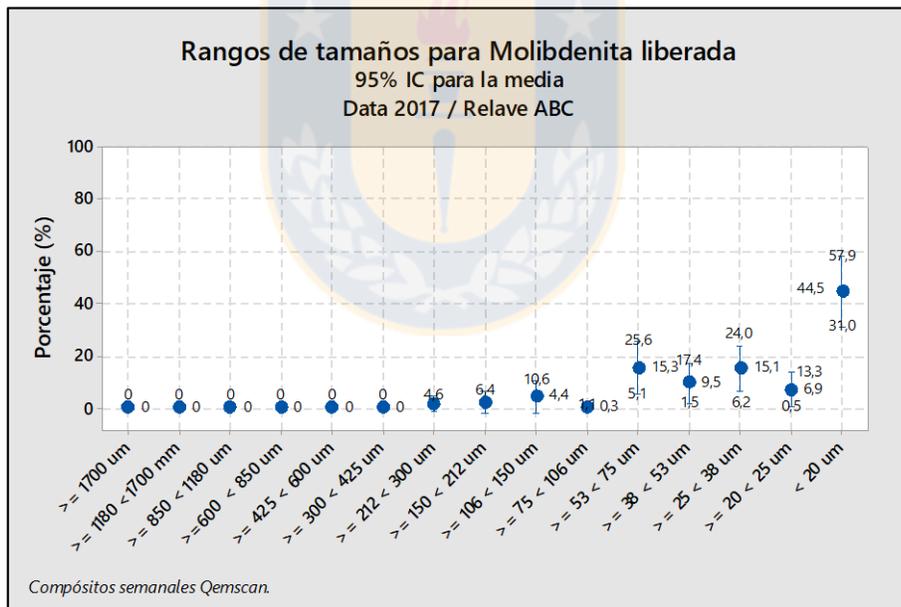


Figura 45. Distribución de tamaños porcentual de Molibdenita liberada en Relave ABC (2017).

En la Figura 46 se aprecia que el grado de liberación (58,7%) es el más alto hasta ahora en el proceso, esto debido a que el mineral paso por el proceso de remolienda, lo que afina más aun su grado de liberación y tamaño, esto se puede apreciar en el porcentaje bajo los 20 [µm] (- 625 #) el cual llega a 70,5%, lo cual vuelve a explicar que a pesar de que la molibdenita esta liberada,

mayoritariamente se encuentra bajo los 20 [um], lo cual hace en extremo difícil su recuperación, es por ende que esta se va hacia las colas del proceso.

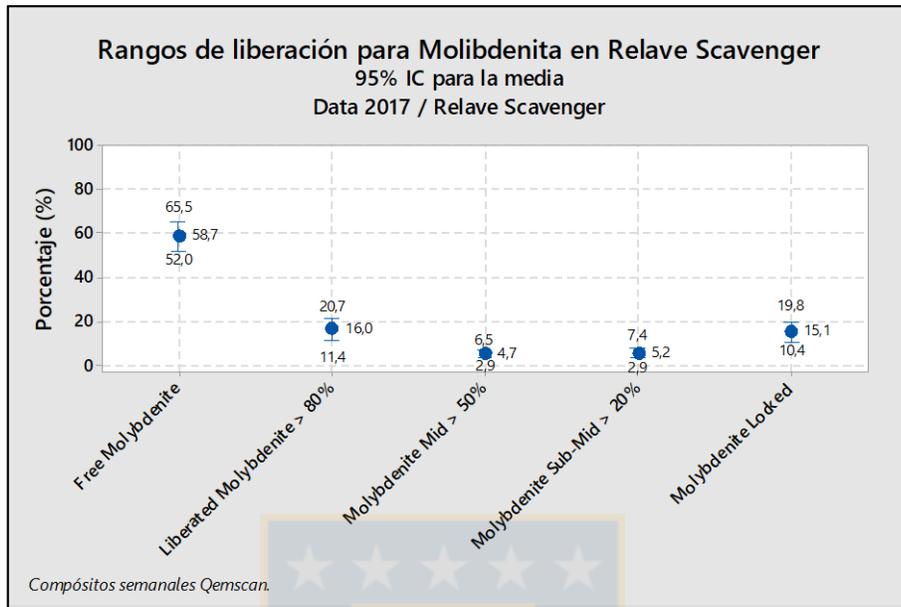


Figura 46. Rangos porcentuales de liberación de molibdenita en relave scavenger (2017).

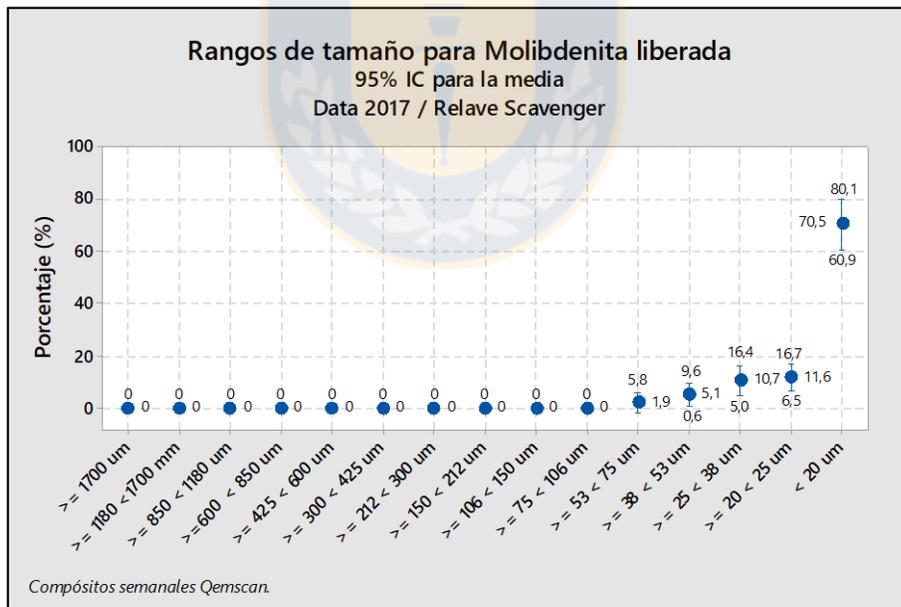


Figura 47. Distribución de tamaños porcentual de molibdenita liberada en relave scavenger (2017).

Finalmente, en la Figura 48 y Figura 49 se muestra el análisis hecho a la corriente de concentrado final del proceso (concol).

En la Figura 48 notamos que existe el mayor grado de liberación en todo el proceso, con un 79,2% esto es de esperarse, ya que el proceso de flotación privilegia a las partículas de mineral que se

encuentran liberadas dejando hacia el relave a las ocluidas, es así como se puede apreciar que en esta corriente se encuentra el menor grado de oclusión de la molibdenita, con un 2,4% lo cual es completamente deseable.

Mientras que la Figura 49 confirma la hipótesis anterior, en cuanto a que el proceso no favorece la recuperación de las partículas con tamaños inferiores a 20 [um], esto se hace notar ya que el porcentaje encontrado en esta corriente es de un 39,8% bajo esta granulometría, el cual es el más bajo entre todas las corrientes analizadas, a pesar que sigue siendo el mayoritario se debe a que la mayor parte de la molibdenita que entra al proceso ya está bajo ese tamaño.

Finalmente se observa que hay un 20,7% de molibdenita entre 25 [um] y 38 [um], el cual es el segundo porcentaje de tamaño más grande entre todas las corrientes analizadas, lo cual nos indica que ese rango de tamaño es óptimo para la flotación de esta especie mineral.

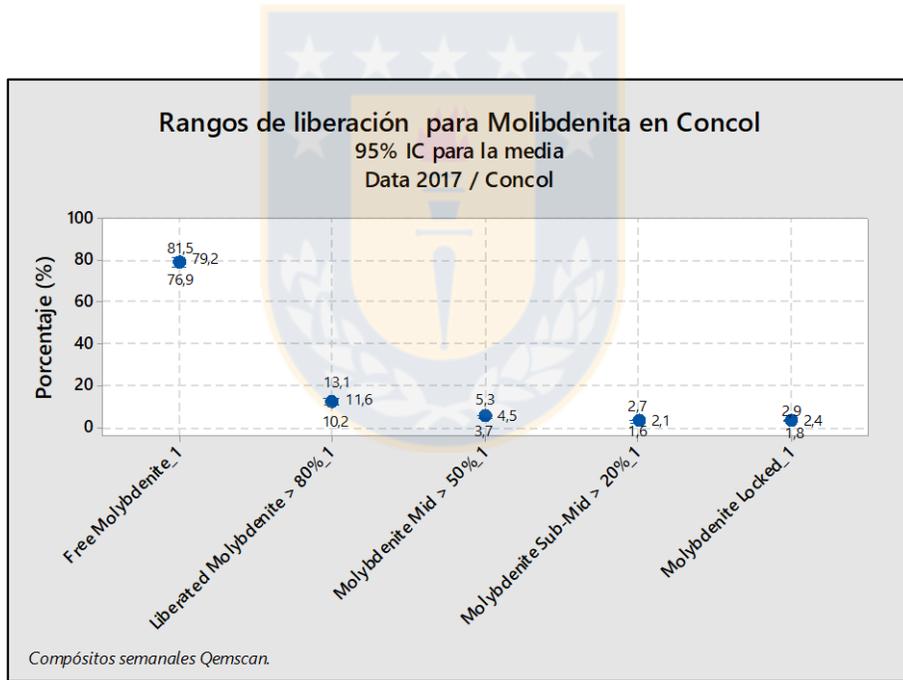


Figura 48. Rangos porcentuales de liberación de molibdenita en concol (2017).

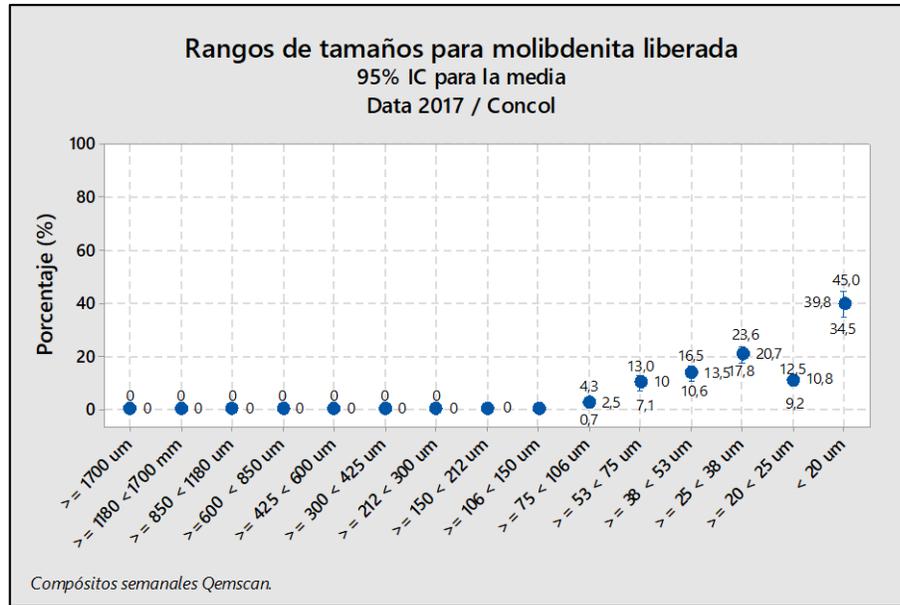


Figura 49. Distribución de tamaños porcentual de Molibdenita liberada en Concol (2017).

4.7 Tamaño de grano de molibdenita P80

La siguiente sección muestra el P80 asociado al tamaño de grano de molibdenita en las diferentes corrientes del proceso, se analizó estadísticamente la información de la corriente A.L3, relave rougher, relave scavenger y concol obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 6. Estadísticos tamaño de grano en corrientes del proceso, 2016.

Variable	N	Media	E. E. M	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
concol	28	41,28	3,13	16,58	274,9	17,2	29,2	37,99	47,39	90,75
R. scavenger	8	30,9	5,06	14,3	204,5	16,86	23,7	27,36	32,01	64,24
R.ABC	7	35,24	8,6	22,75	517,5	15,01	25,4	28,74	35,67	84,74
A.L3	24	66,4	11	53,8	2894	11,6	25,5	47,8	105,9	228

Tabla 7. Estadísticos tamaño de grano en corrientes del proceso, 2017.

Variable	N	Media	E.E.M	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
concol	48	36,71	1,54	10,66	113,7	17,69	27,5	37,29	45,6	67,8
R. scavenger	32	26,13	3,54	20,04	401,7	6,53	15,8	24,52	28,66	112,1
R.ABC	37	56,64	8,89	54,1	2927	10	25,1	39,77	63,68	247,1
A.L3	40	55,1	11,6	73,2	5352	7,5	25,8	43,2	61,6	485,3

En la Figura 50 se aprecia un esquema de la planta de beneficio de CMDIC, en ella se puede ver los P80 asociados al tamaño de grano de la molibdenita, tanto los que entran por la línea 3 (A.L3) como los que salen por el concentrado colectivo (concol). En valor indicado en cada extremo corresponde al menor P80 encontrado en toda la serie de datos, tanto para el año 2016 como 2017. Se observa que el P80 de entrada entre los años 2016 y 2017 es levemente diferente, mientras que el de salida para ambos años es en extremo cercano por no decir similar, esto a pesar de que entre los años pudieron existir diferentes condiciones de operación.

Se observa claramente lo que se ha venido diciendo anteriormente, el proceso no beneficia tamaños de partícula inferiores a 20 [um] (- 625 #), por tratarse de partículas ultra finas cuya flotación es en extrema complicada.

Por lo que la planta concentradora de CMDIC actúa como un clasificador de partículas, beneficiando en gran parte partículas de molibdenita con tamaño superior a 17 [um] ~20 [um].

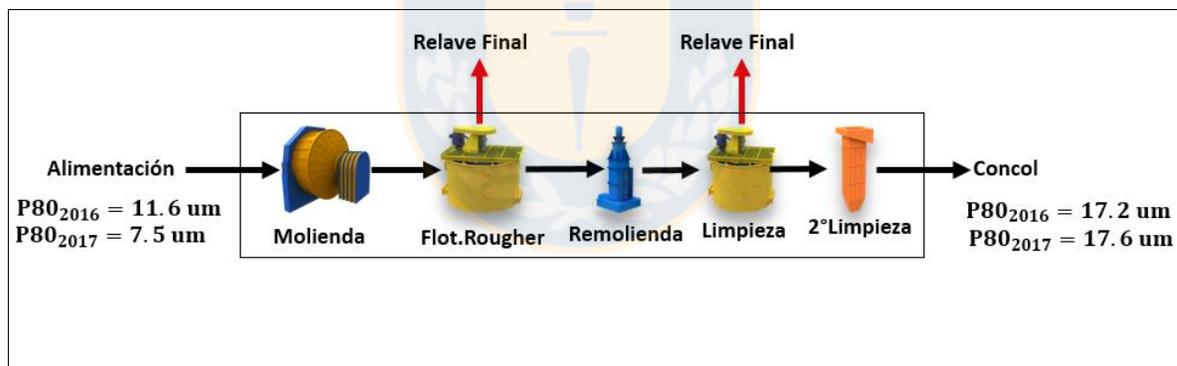


Figura 50. Esquema de flotación CMDIC y P80 asociado al tamaño de grano molibdenita (Elaboración propia).

De un muestreo en planta realizado el año 2014 se aprecia que la recuperación de molibdenita en la segunda etapa de limpieza es de 18.8%, lo cual es en extremo baja. Con ello las partículas finas y ultra finas (-625 #) de molibdenita retornan a la primera etapa de limpieza la cual es sobrecargada de molibdenita fina, lo que implica que esta no es capaz de recuperarlo en su totalidad, enviando gran parte de ella a la etapa scavenger en donde finalmente se pierde en el relave final de la planta.

En la Figura 51 se muestra la ley de molibdeno en el concol versus el porcentaje de molibdeno en el concentrado selectivo. Como se puede ver existe una relación lineal entre el contenido de molibdeno en ambos concentrados, como se dijo anteriormente la ley de molibdeno en el concol está directamente relacionada con la ley de alimentación, por ende la ley de cabeza controla en gran medida tanto la ley de molibdeno en el concol, como la ley de molibdeno en el concentrado selectivo, por ello es un parámetro de suma relevancia en cuanto al proceso y a la hora de realizar un modelo geometalúrgico.

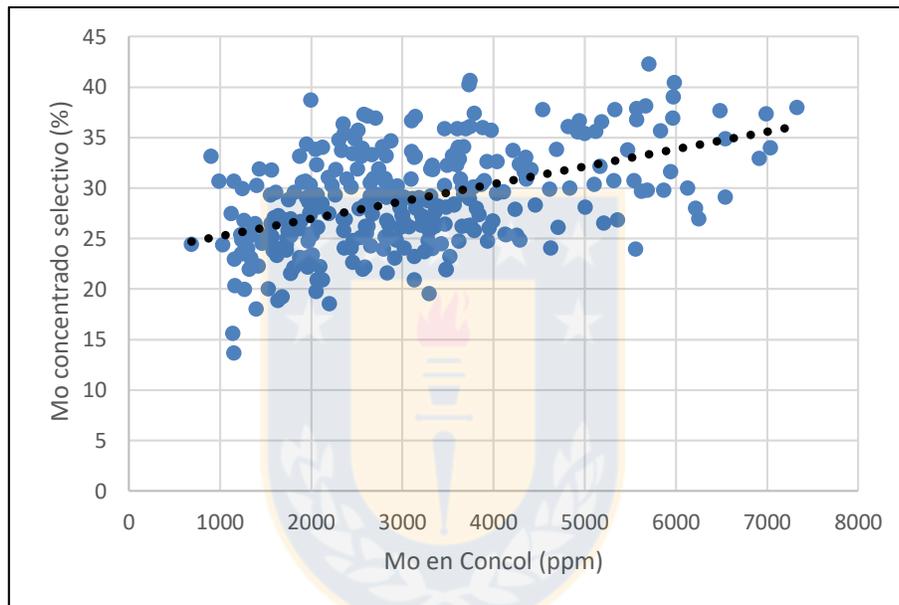


Figura 51. Correlación entre la ley de Mo en el concol y el porcentaje de Mo en el concentrado selectivo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Del análisis hecho en el capítulo anterior se muestra claramente que CMDIC posee bajas recuperaciones de molibdenita en su circuito colectivo. En vista de ello se realiza las siguientes conclusiones con el objetivo de entender el fenómeno que está ocurriendo, y a la vez encaminar planes de acción que ayuden a subir los índices metalúrgicos.

Las causales de las bajas recuperaciones metalúrgicas en cuanto a molibdenita en el circuito colectivo de CMDIC se enumeran como dos, la primera y más relevante hace alusión al ingreso de agua del sector “Coposa Norte” al proceso. Esta agua con gran contenido iónico, en especial iones fuertemente depresores como lo son el Calcio y el Magnesio. Este ingreso en el año 2008 implicó una baja extrema en la recuperación de la molibdenita tanto Colectiva, selectiva y Global, en especial esta última, la cual desde el 2007 al 2017 bajo 32 puntos porcentuales, situándose en este último año con una recuperación de 24%.

La segunda condición encontrada hace referencia al tamaño de disseminación de la molibdenita en la alimentación, la cual se encuentra en gran parte en tamaños finos y ultra finos, como se dijo anteriormente.

Lo anterior, sumado a etapas de molienda y remolienda hacen que su tamaño de grano se afine aún más, comprobándose que el circuito colectivo actúa como un clasificador de partículas, ya que solo las superiores a 17 [um] ~ 20 [um] (rango mínimo analizado) son colectadas hacia el concentrado final, mientras que las más pequeñas de ese tamaño son perdidas en el relave final, lo cual se puede comprobar en los análisis hechos a la corriente de las etapas scavenger y rougher pertenecientes al circuito de flotación colectiva, en donde la Molibdenita se encuentra mayoritariamente liberada y bajo los 20 [um].

Se muestra además de la Figura 49 que parece existir un tamaño óptimo para la flotación columnar de la molibdenita, el cual es entre 25 a 38 [um] ya que se presenta un aumento en la cantidad de molibdenita (20,7%), aumento en el porcentaje único en todas las etapas del circuito colectivo.

De un muestreo de planta (anexo E) se aprecia una anomalía en cuanto la baja recuperación de la molibdenita en la segunda limpieza (18,8%), esto implica gran cantidad de este mineral se va por las colas de la columna hacia la primera limpieza, en donde el circuito sobrecargado de molibdenita

finas no es capaz de recuperarlo, así se va por el relave hacia la etapa Scavenger en la cual se pierde por las colas hacia el relave final.

En cuanto a las recuperaciones y leyes de molibdenita en los concentrados, se aprecia una correlación clara entre la ley de los concentrados, tanto rougher como concol y la ley de molibdeno en la alimentación.

En cuanto a la recuperación de molibdenita, en la etapa rougher se aprecia una correlación entre la anterior y la recuperación de Pirita (FeT), esto principalmente al fenómeno de arrastre mecánico hacia el concentrado.

Por último la recuperación global en el año 2017 fue de 24%, en comparación a otras mineras cuyas recuperaciones están entre en un rango de 50% a 75%, por lo cual existe un amplio rango de mejoramiento, en la medida que se tomen acciones en función de lo analizado anteriormente.

5.2 Recomendaciones

Como se dijo las principales causas de la baja recuperación radican en el agua de coposa norte con alto contenidos en iones depresores y la alimentación de molibdenita en tamaños finos y ultra finos.

Realizar recomendaciones no es fácil, ya que el negocio de CMDIC es abocado al cobre y cambiar condiciones operacionales implicaría cambios hacia el negocio de este los cuales pueden no ser positivos. El tamaño de mineral alimentado a la planta (65% -2 pulgadas) no se puede modificar, ya que con ello se modificaría la eficiencia de la molienda SAG, la cual es crítica para el proceso.

Lo mismo ocurre para el agua de los pozos de coposa norte, esta agua es necesaria y no se pueden modificar los puntos de extracción, por lo que se debe trabajar con ella. En base a lo anterior se realizan 4 recomendaciones o alternativas, las tres primeras con un enfoque a las partículas finas, y la cuarta hacia el agua con alto contenido iónico, para mitigar las bajas recuperaciones se podrían usar las propuesta tanto del primer grupo como del segundo, lo ideal sería solucionar ambos problemas, pero ello quizás conllevaría una fuerte inversión.

El uso de celdas Jameson, es sabido que estas celdas poseen una distribución de burbujas (promedio 0.3 [mm]) mucho menor que las celdas convencionales (1 a 3 [mm]). Por ende el uso de estas celdas en la cola de la segunda limpieza sería propicio para recuperar molibdenita fina y ultra fina (menor 20 [um]) con ello disminuirá considerablemente la carga circulante hacia la primera limpieza.

Esta opción es de una considerable inversión, por ello está sujeto a una evaluación económica y técnica.

En el año 2018 con el objeto de aumentar la producción CMDIC puso la puesta en marcha del proyecto “24 celdas”, este proyecto consiste en la instalación de 24 celdas de 300 [m³] en la etapa rougher, con el objetivo de aumentar los tiempos de residencia y el tratamiento. De lo anterior han quedado en “stand by” una línea con 9 celdas, cada una de 127 [m³] auto aspiradas, estas se podrían ocupar como línea de “repaso” o scavenger de las colas de la segunda limpieza, a su vez un cambio en el porcentaje de sólidos que sea propicio para su recuperación, ello con el objetivo de bajar la tasa de recirculación de Molibdenita fina hacia la primera limpieza.

La tercera opción hace referencia a los reactivos, en especial al efecto sinérgico entre ellos, ya sea mejorando la cinética de flotación de la molibdenita aumentando la eficiencia del colector no polar, en cuanto a tipo o dosificación. En cuanto al diésel que es el colector usado, se recomienda que el punto de adición sea el mismo que el del espumante, actuando este último no como espumante, sino que como dispersante del diésel a la forma de emulsión.

La cuarta opción hace referencia al abatimiento de iones, mediante la precipitación de los iones magnesio a la forma de hidróxido de magnesio, esto mediante el uso de cal a un pH cercano a 10. Existen un estudio realizado en CMDIC que habla del agua acondicionada con cal para deprimir el magnesio, con lo cual se evidencia un aumento de 13 puntos porcentuales en cuanto a la recuperación de molibdenita y 1 punto porcentual en cuanto a la recuperación de cobre.

Por último se sugiere realizar un análisis multivariable que permita detectar relaciones entre variables de entrada (input), a su vez la realización de un modelo geometalúrgico que ayude como medida de control del proceso.

Bibliografía

Gutiérrez, L. (2014). Curso de flotación. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Concepción, Chile.

Yianatos, J. (2005). Flotación de minerales. Universidad técnica Federico Santa María, Chile.

M C. Fuerstenau, G Jameson, & R Hoan Yoon. (2007). Froth Flotation a Century of Innovation. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

Rao, S.R. (2004). Surface Chemistry of Froth Flotation, Volume 1: Fundamentals. Springer Science and Business Media. New York.

SM.Bulatovic (2007). Handbook of Flotation Reagents, Volume 1 Esvier (2007) Ontario, Canadá.

Yianatos, J. (2009). Avances en el diseño, caracterización y operación de celdas de flotación Universidad Técnica Federico santa María, Chile.

Hirajima (2016). Effect of Mg²⁺ and Ca²⁺ as divalent seawater cations on the flotability of molybdenite and chalcopirite. Minerals Engineering.

Lopez Valdivieso, A. (2005). “Flotación de calcopirita, piritita y molibdenita en minerales de cobre tipo pórfido”, X simposio sobre procesamiento de minerales, Chillán, Chile.

Méndez, X. (2013). “Optimización en la recuperación metalúrgica de molibdeno, plantas las I las tórtolas, división los bronces-División los bronces-Anglo american “, Proyecto para optar al título de ingeniero civil en metalurgia extractiva.

Minitab 2017, Introducción a Minitab.

Proyecto M40214 “Estudio para identificación de cuellos de botella CMDIC” (2014), Amec International Ingeniería y Construcción LTDA.

Molibdeno: Propiedades, Aplicaciones, Mercado, (2010). Difusión de tecnologías, aplicaciones y desafíos del molibdeno para la industria e investigadores a nivel nacional, Cimat, Chile.

Anexos

A. Recuperación Mo Concol

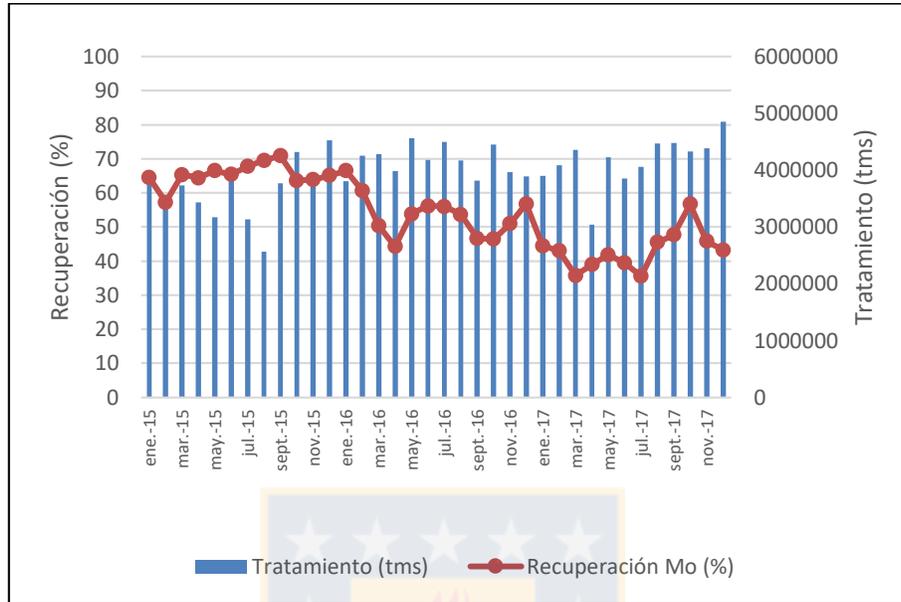


Figura 52. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Tratamiento Planta.

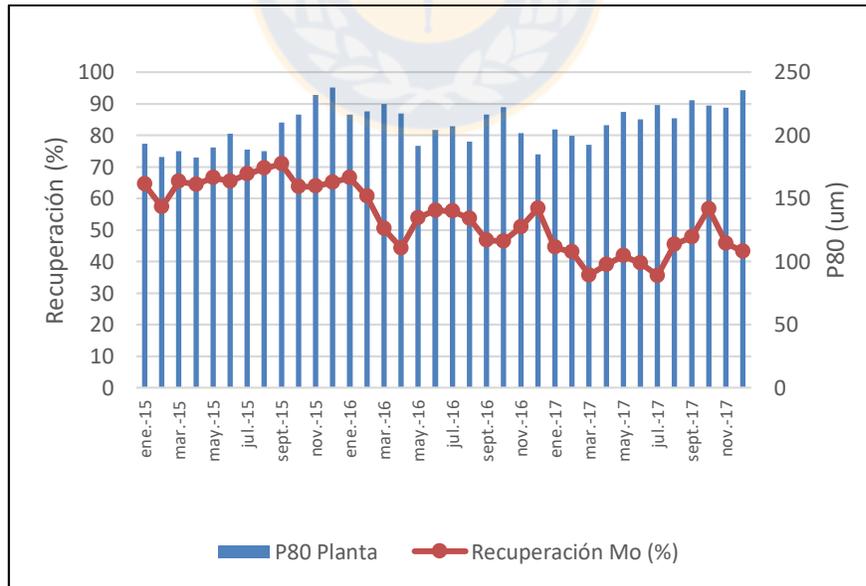


Figura 53. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs P80 Planta.

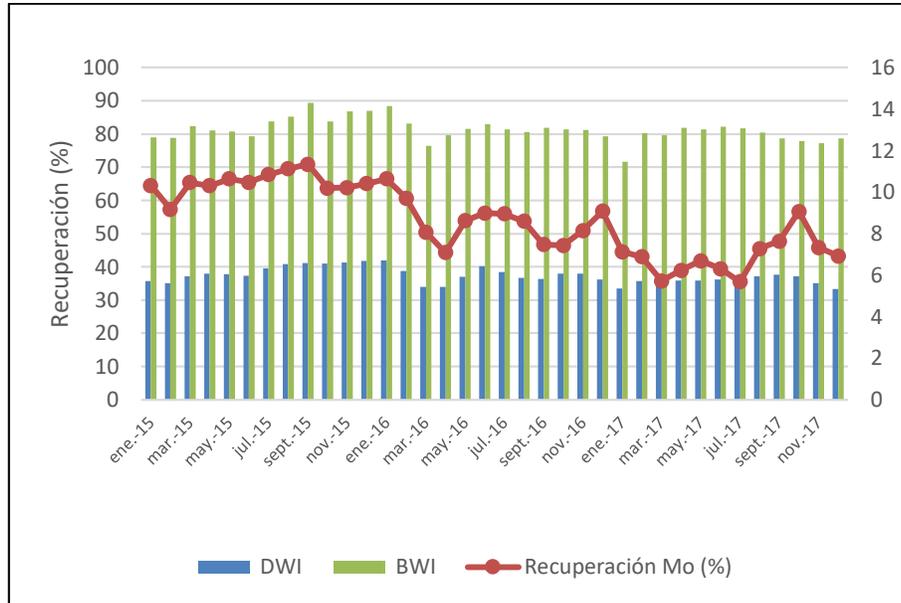


Figura 54. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs DWI/BWI.

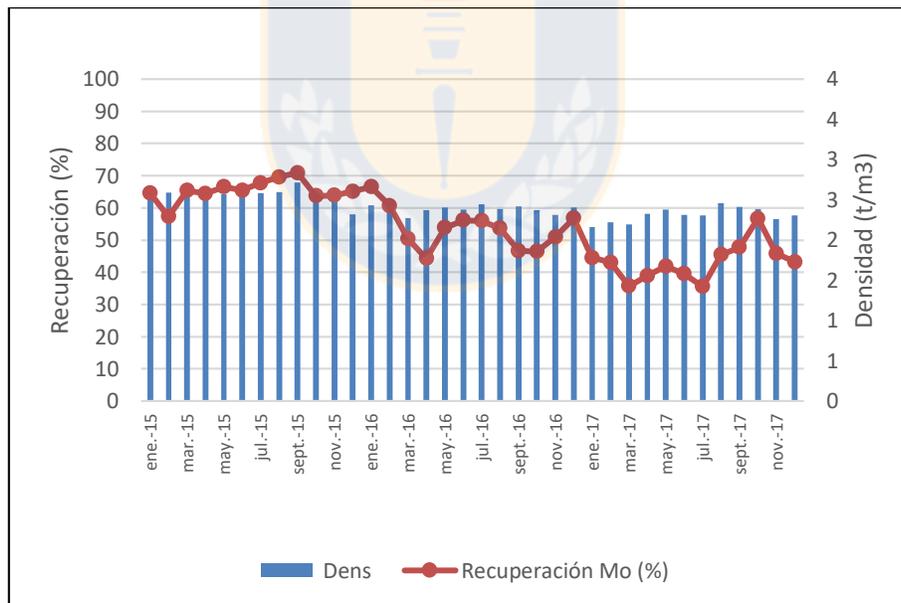


Figura 55. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Densidad de Mineral Alimentado a Planta.

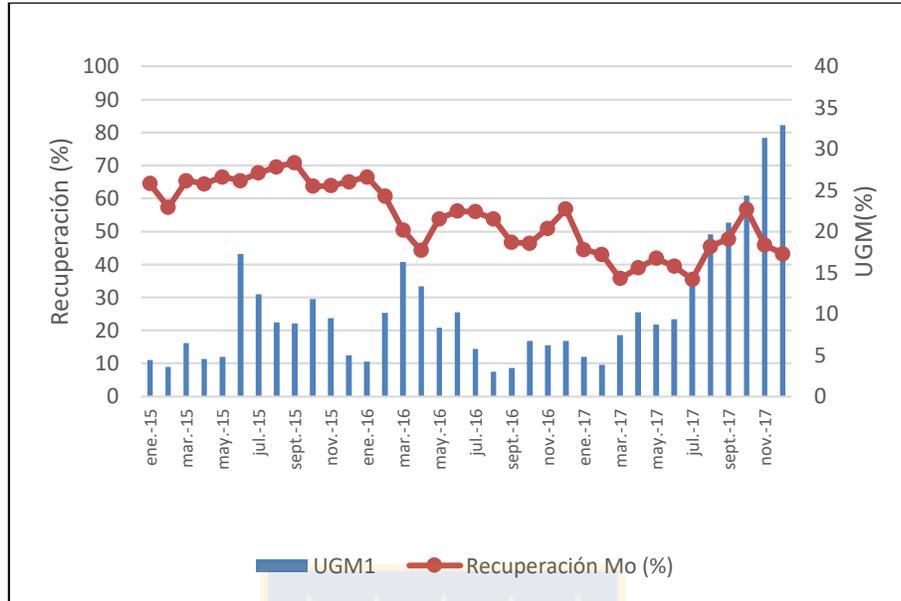


Figura 56. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs UGM 1.

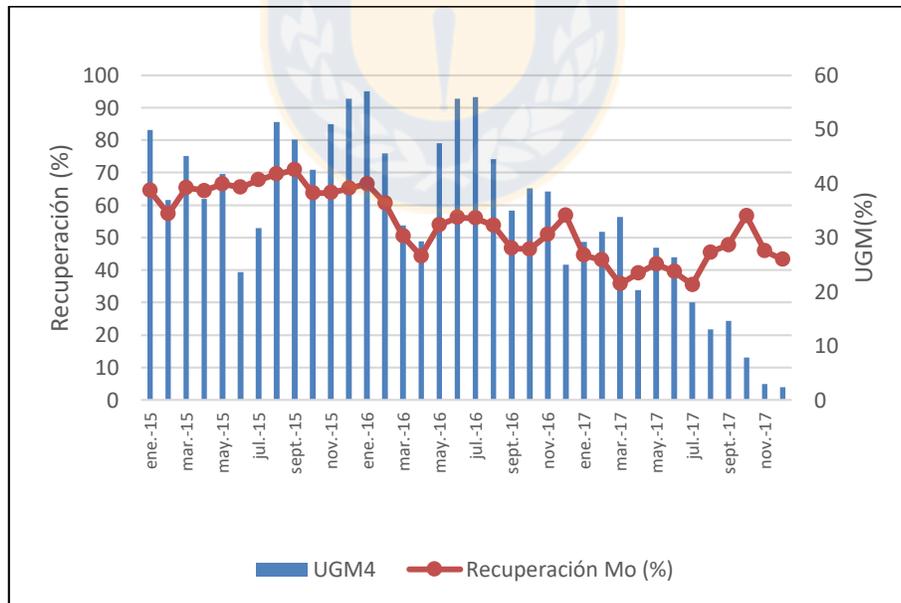


Figura 57. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs UGM 4.

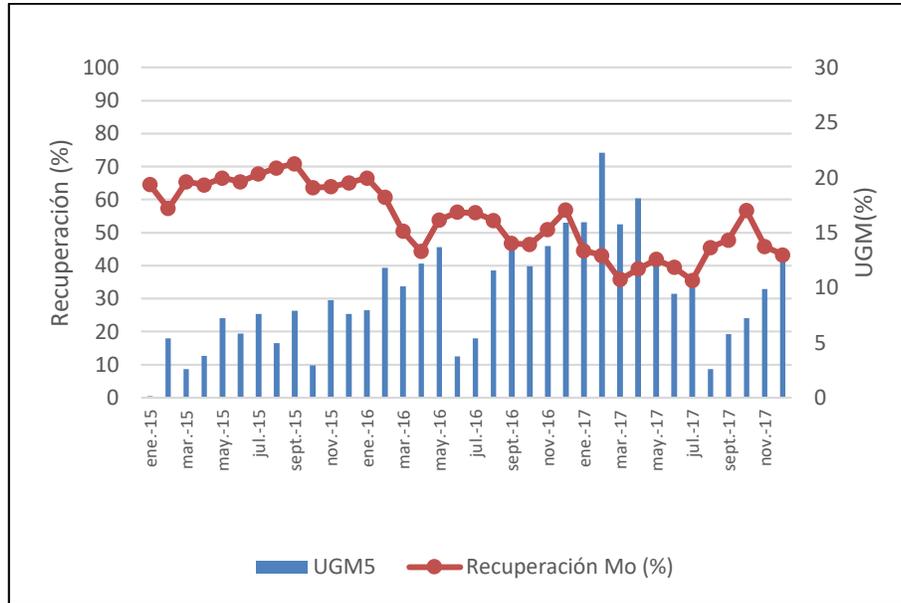


Figura 58. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs UGM 5.

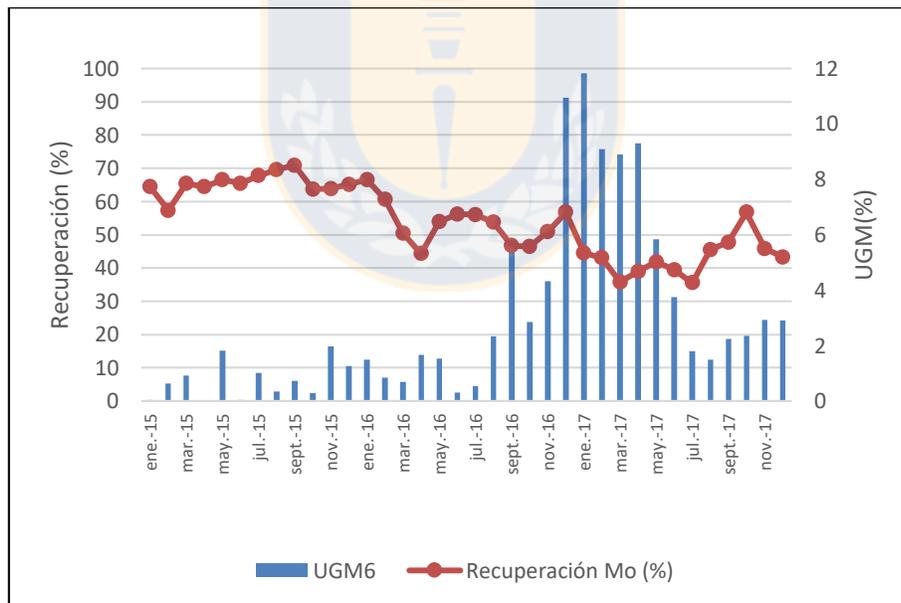


Figura 59. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs UGM 6.

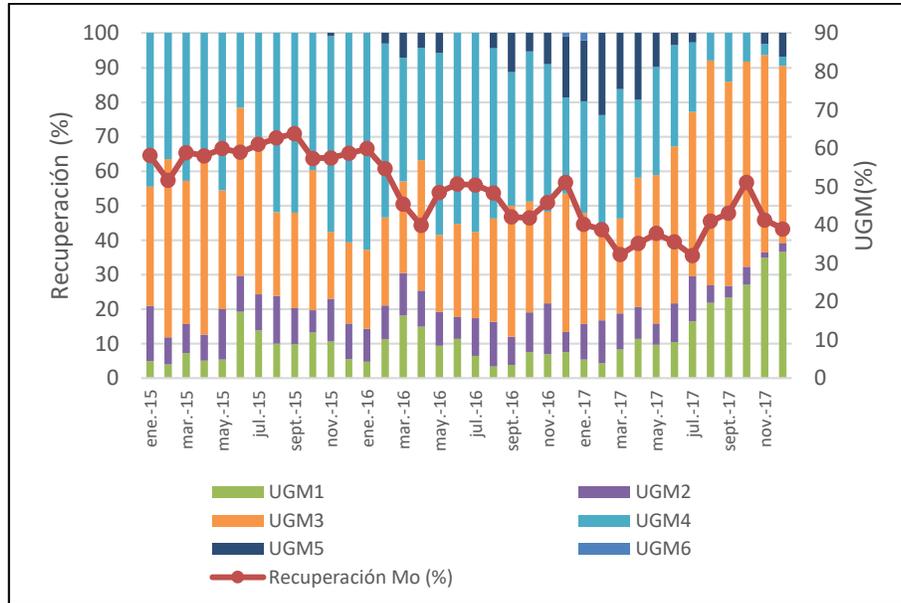


Figura 60. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs UGM Alimentado a Planta.

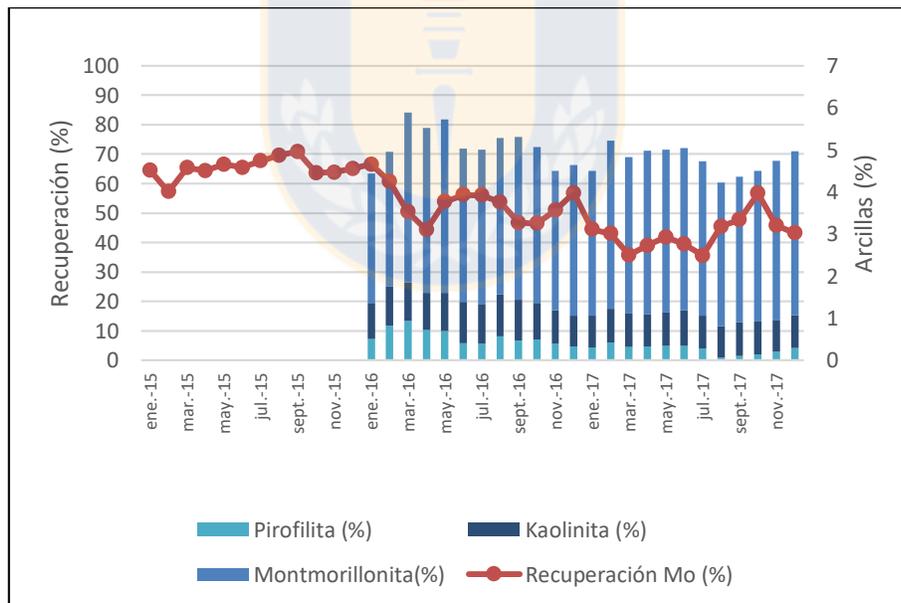


Figura 61. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Arcillas Alimentadas a Planta.

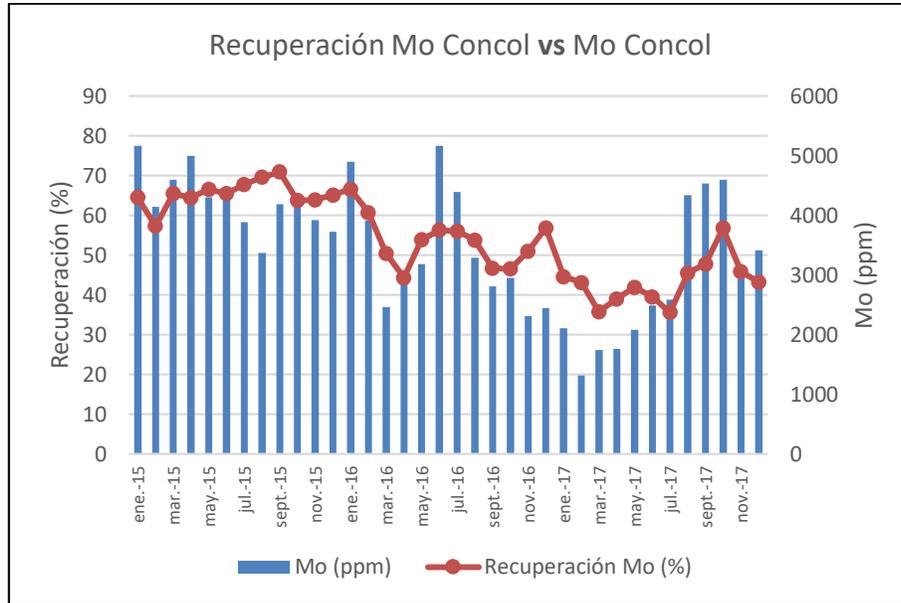


Figura 62. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Mo Concol.

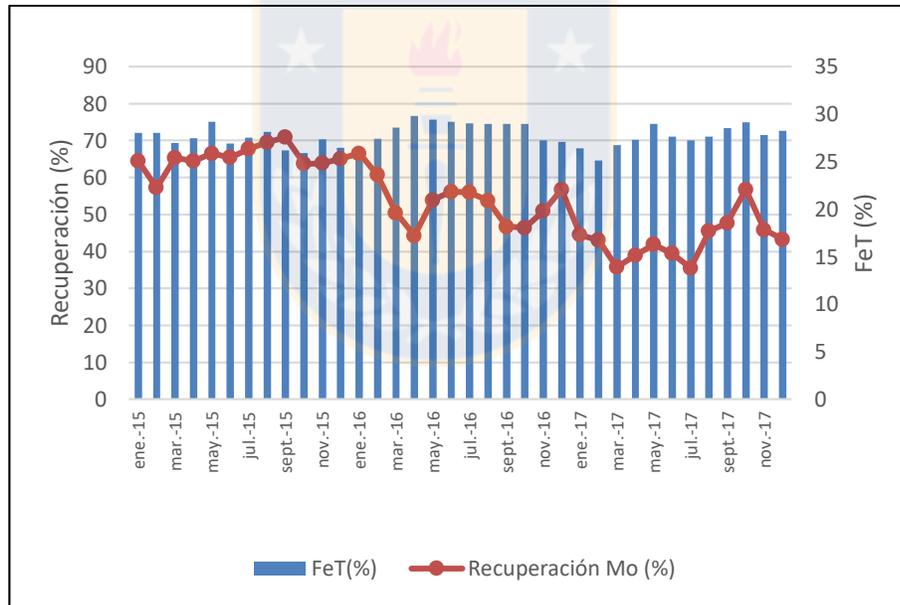


Figura 63. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs FeT Concol.

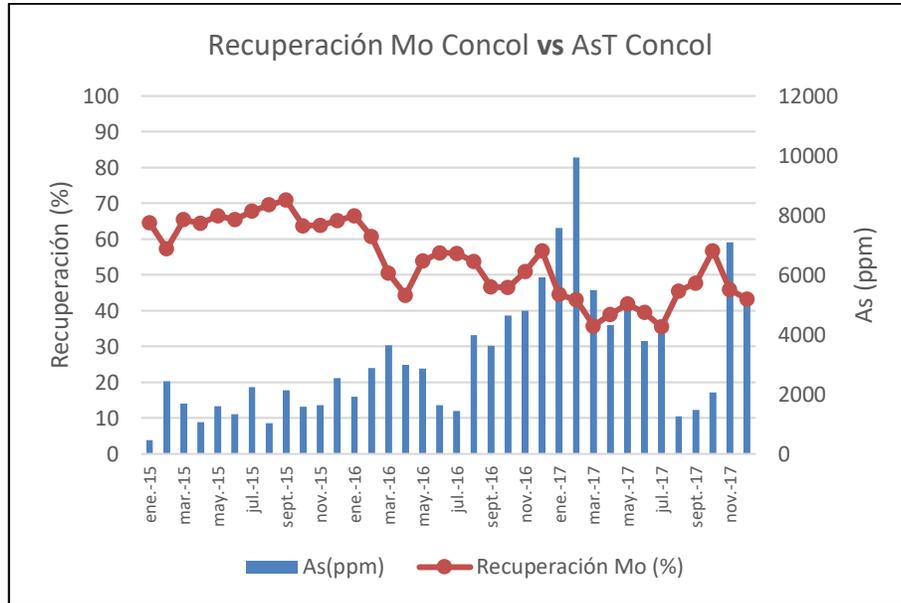


Figura 64. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs AsT Concol.

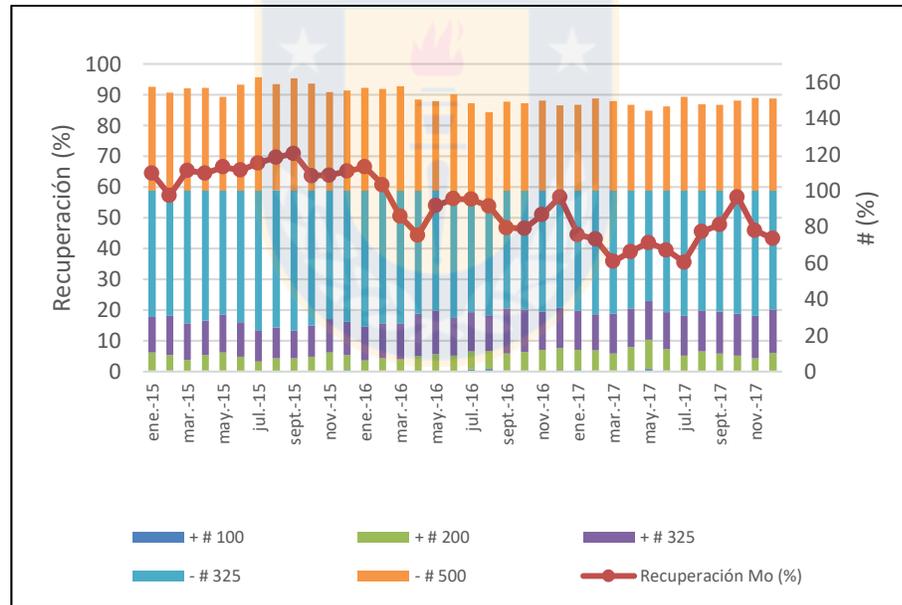


Figura 65. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Malla en Concol.

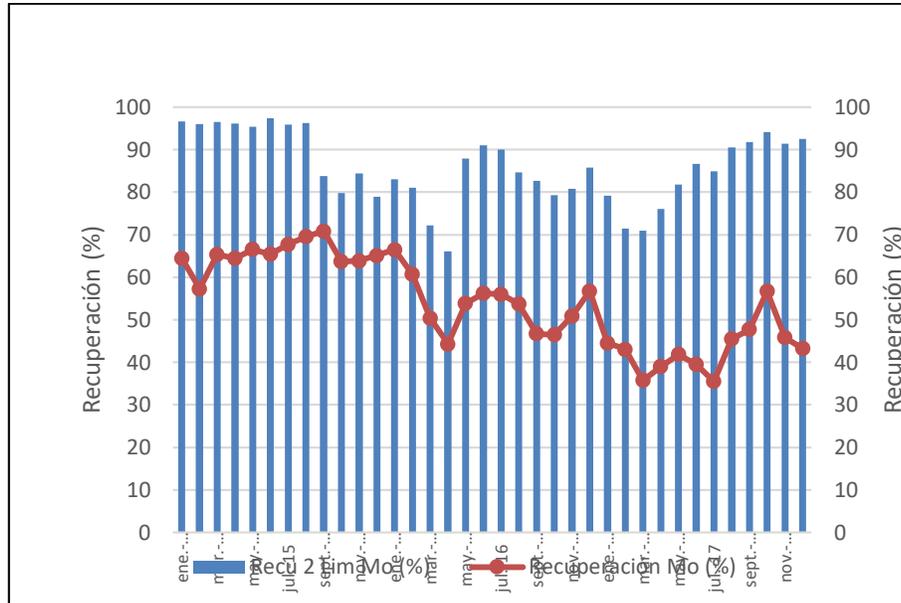


Figura 66. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Recuperación 2° Limpieza Mo.

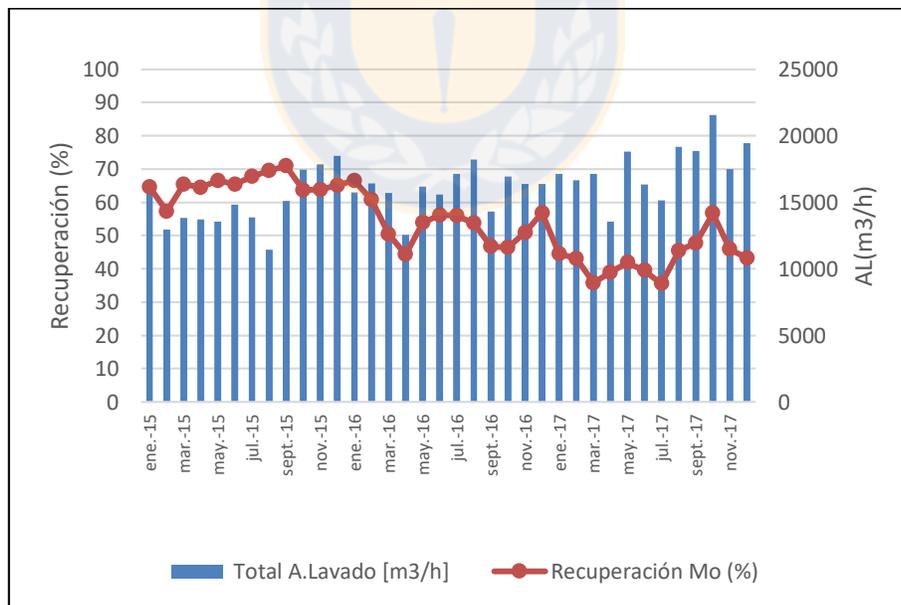


Figura 67. Evolución de la Recuperación Mo Concol vs Agua Lavado.

B. Ley de Mo Concol

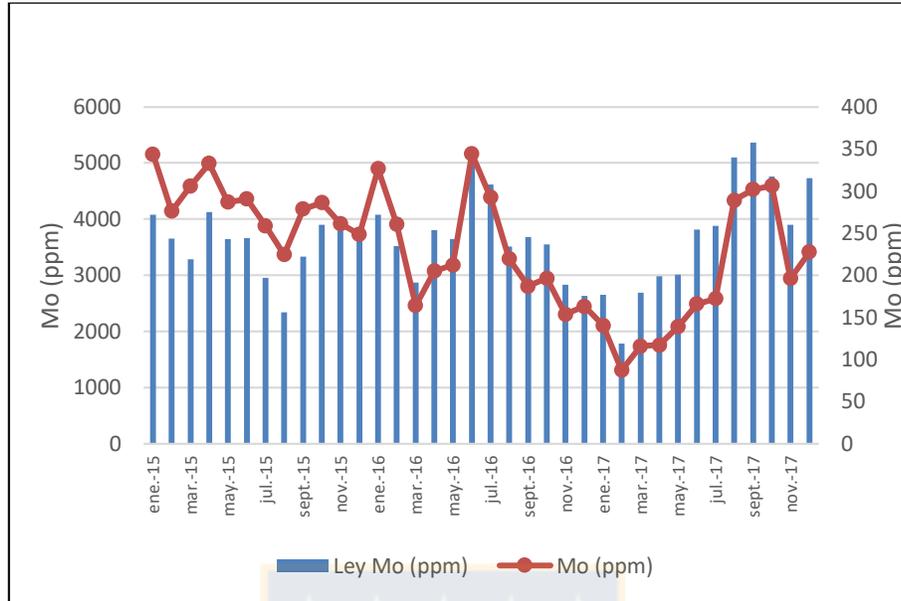


Figura 68. Evolución de la ley Mo Concol vs Mo Alimentación en Alimentación a Planta.

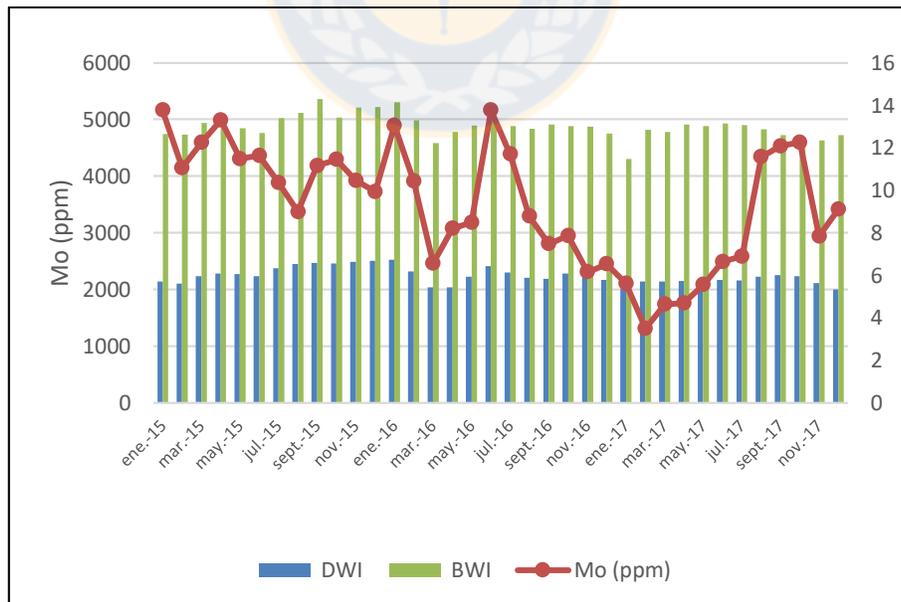


Figura 69. Evolución de la ley Mo Concol vs DWI/BWI.

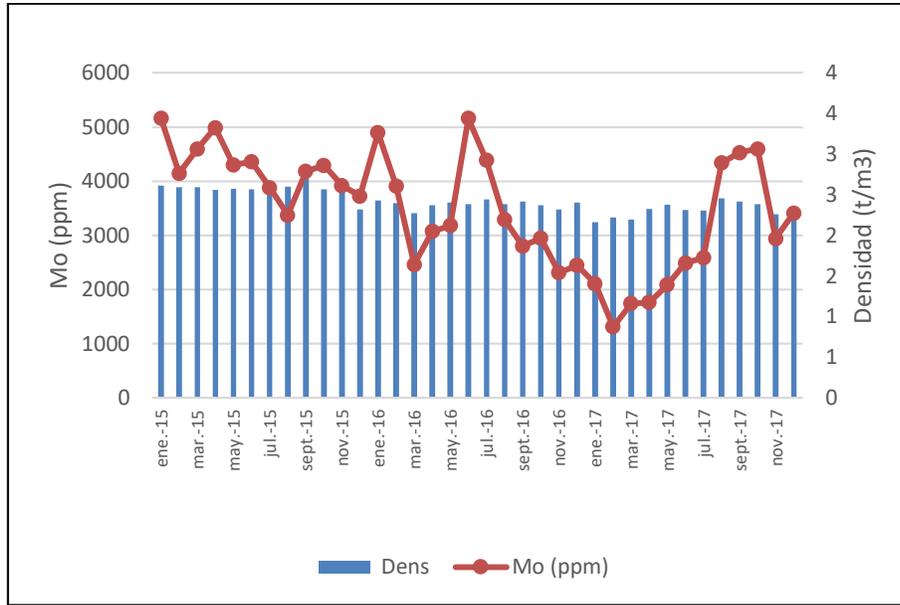


Figura 70. Evolución de la ley Mo Concol vs Densidad de Mineral Alimentado a Planta.

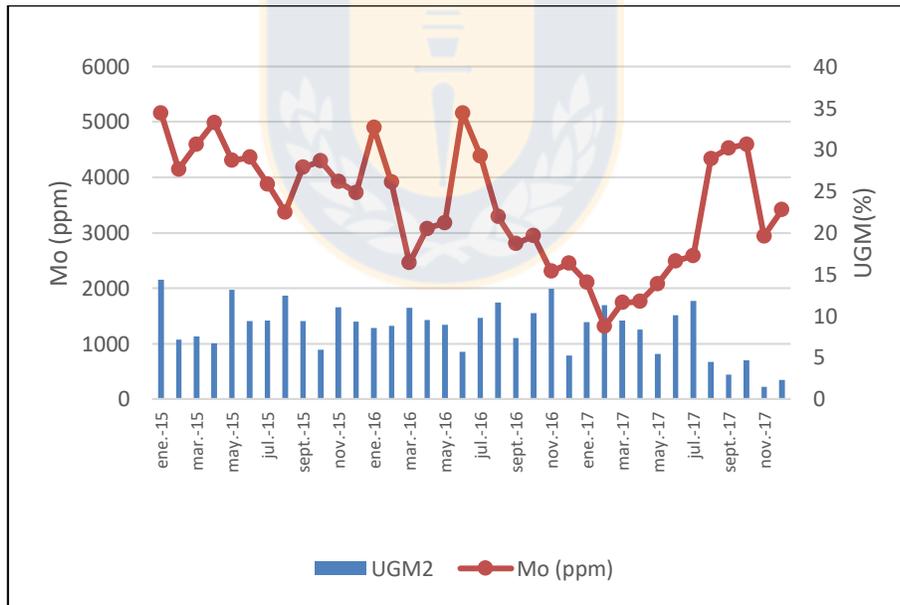


Figura 71. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM 2.

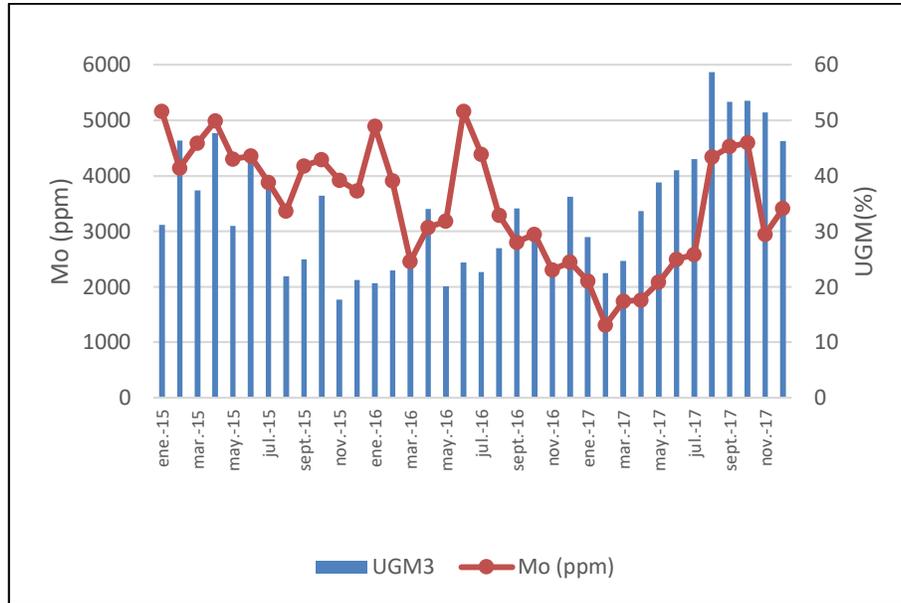


Figura 72. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM 3.

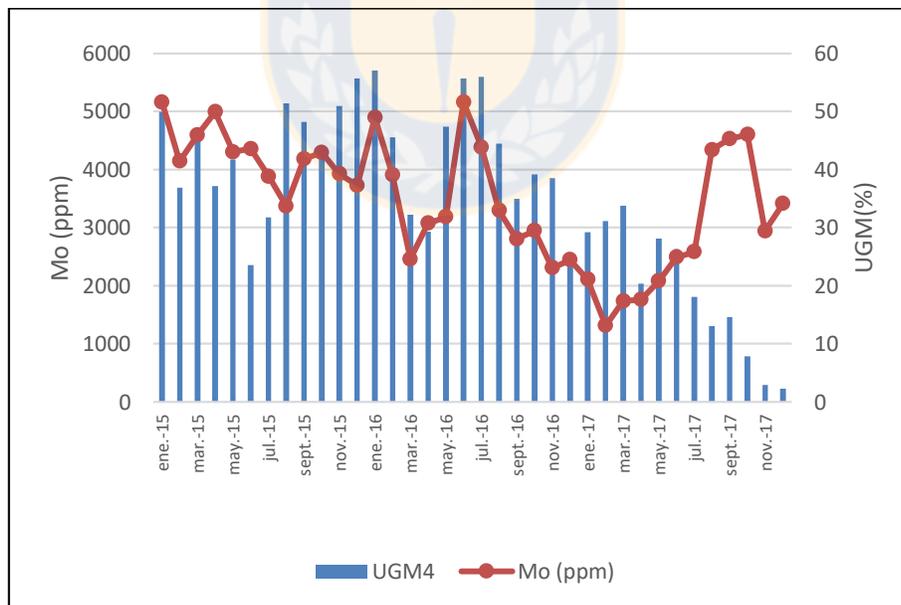


Figura 73. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM 4.

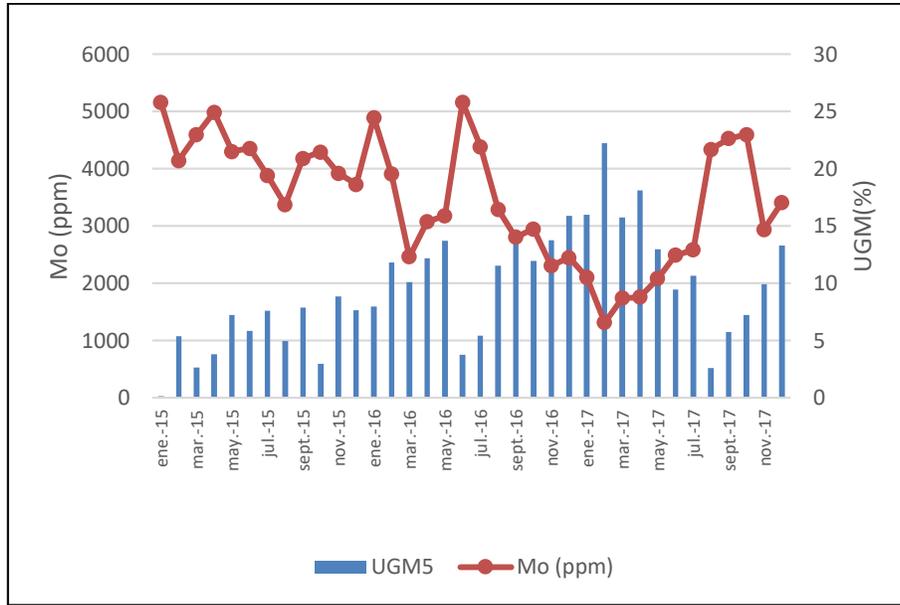


Figura 74. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM 5.

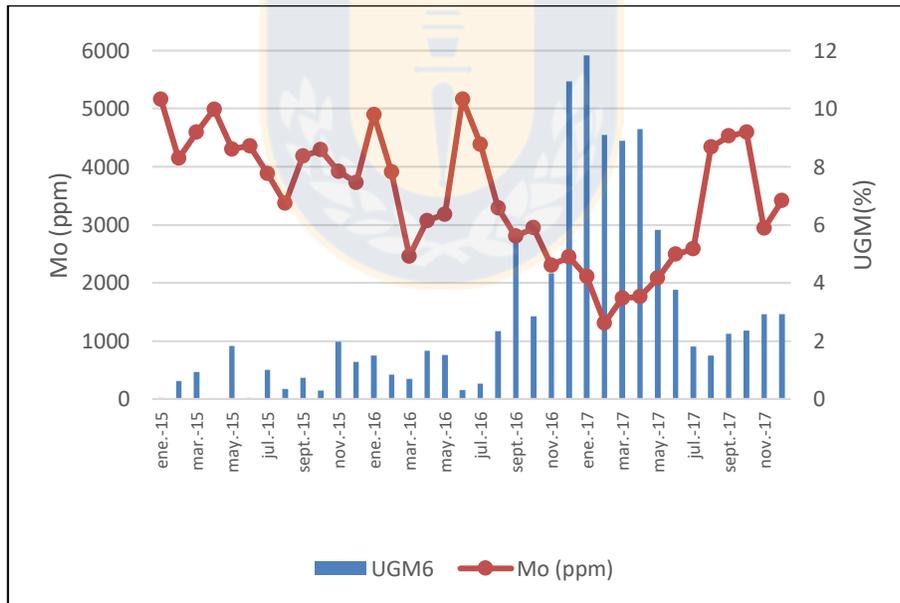


Figura 75. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM 6.

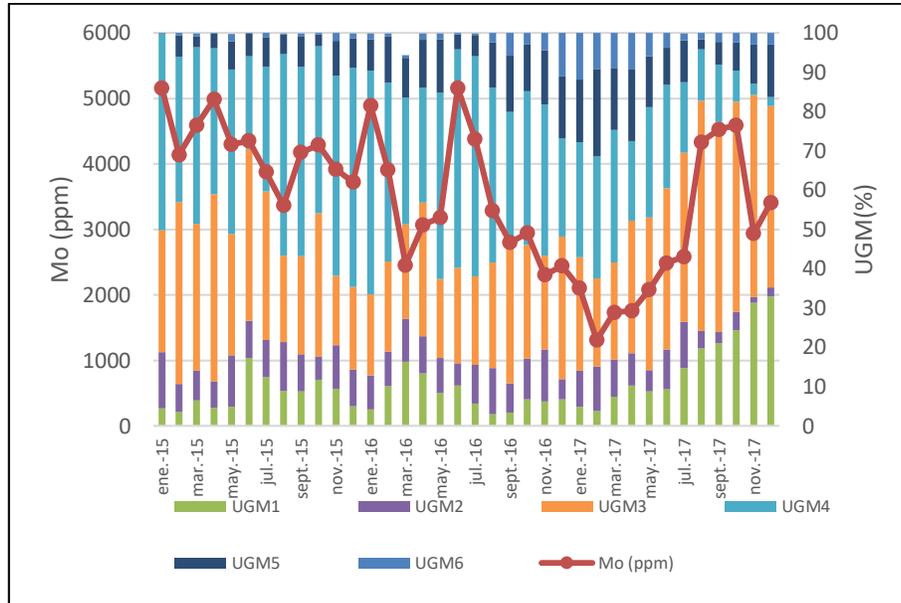


Figura 76. Evolución de la ley Mo Concol vs UGM.

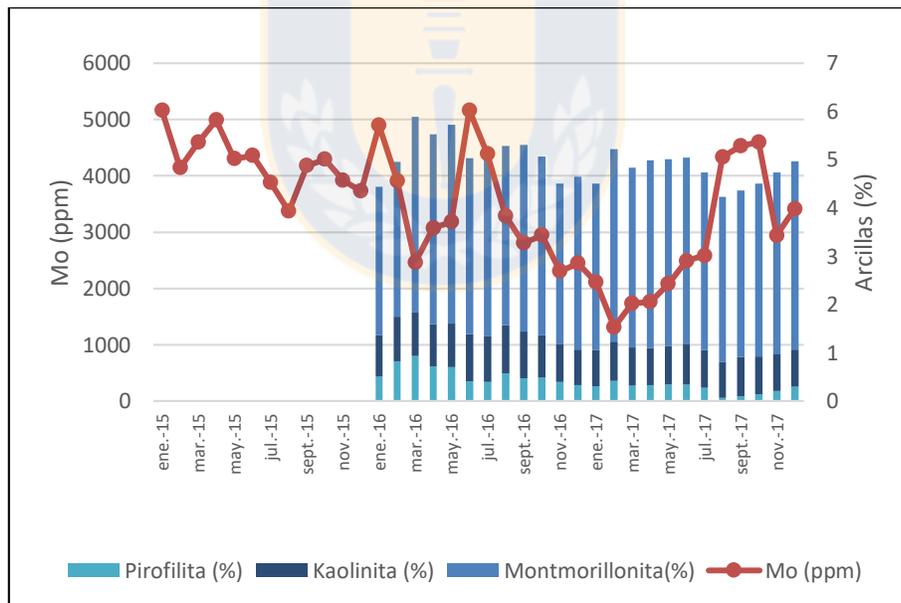


Figura 77. Evolución de la ley Mo Concol vs Arcillas.

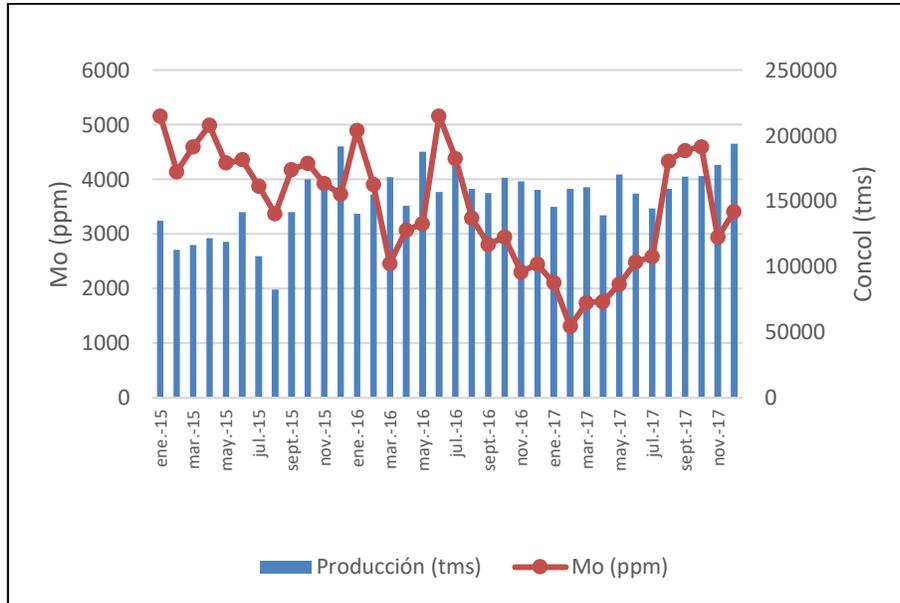


Figura 78. Evolución de la ley Mo Concol vs Producción Concol.

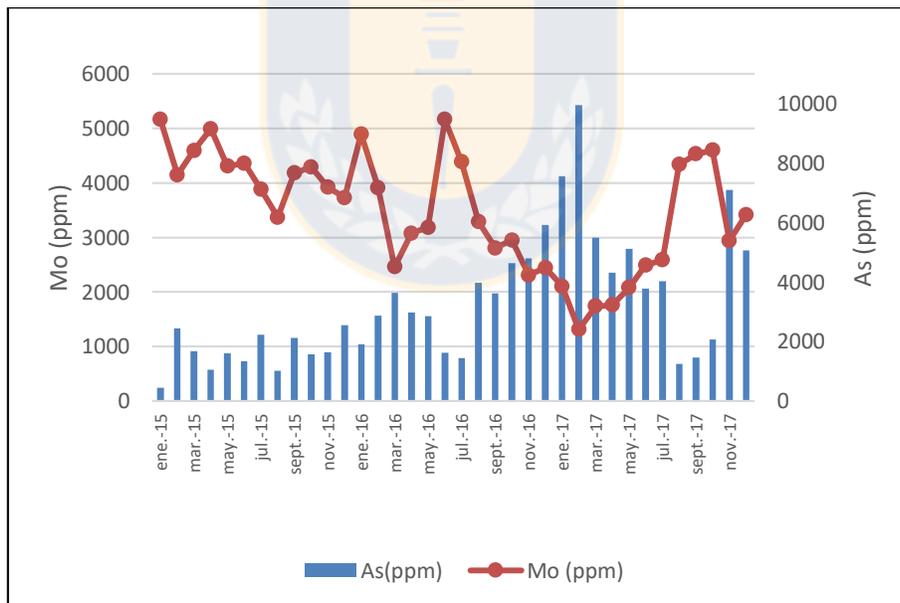


Figura 79. Evolución de la ley Mo Concol vs AsT Concol.

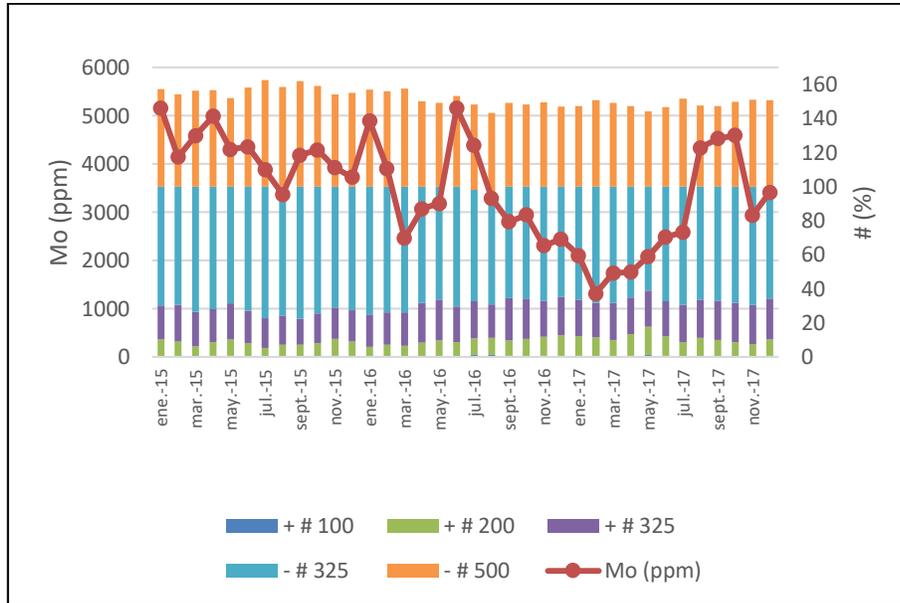


Figura 80. Evolución de la ley Mo Concol vs Malla en Concol.

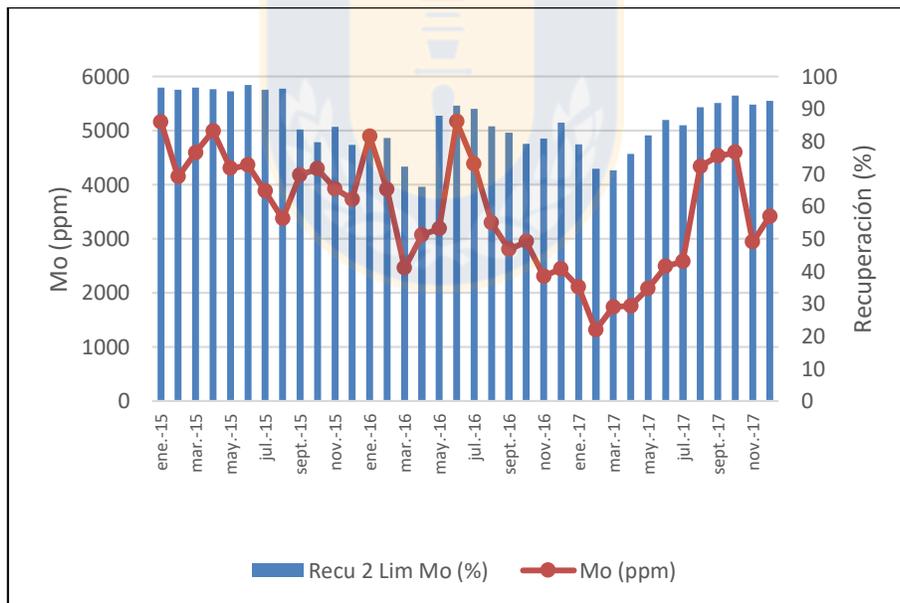


Figura 81. Evolución de la ley Mo Concol vs Recuperación Mo 2° Limpieza.

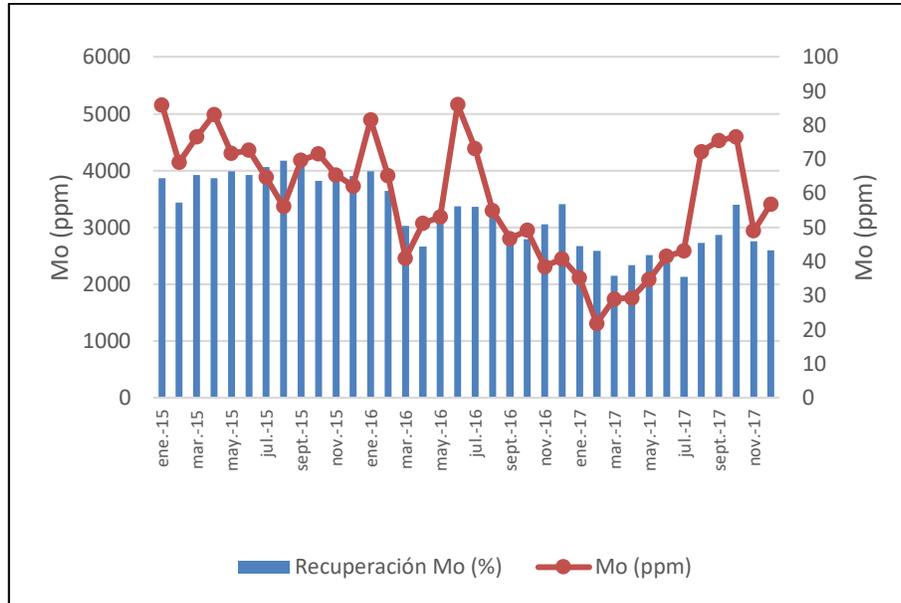


Figura 82. Evolución de la ley Mo Concol vs Recuperación Mo Concol.

C. Asociaciones de la Molibdenita en las Diferentes Corrientes del Proceso

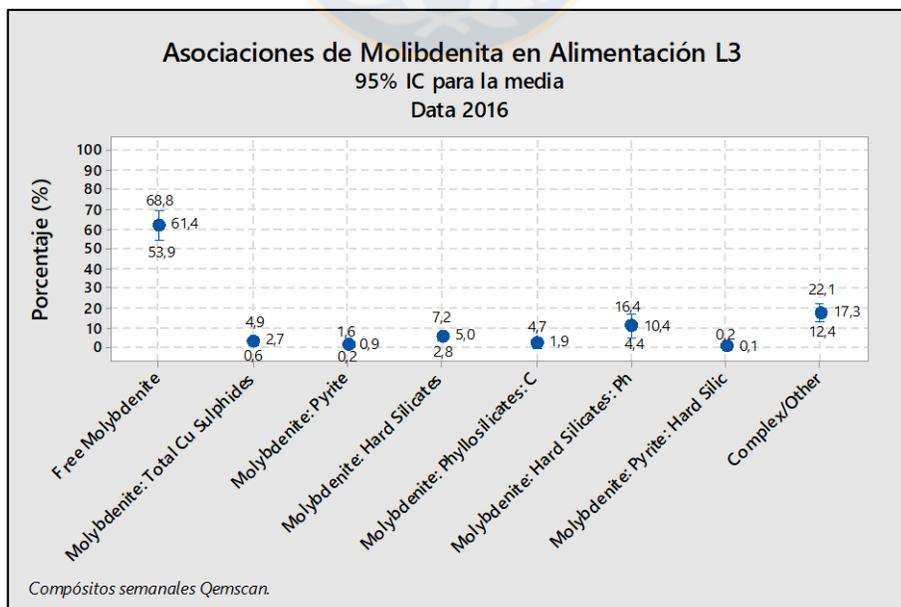


Figura 83. Asociación de la Molibdenita en AL3 (2016).

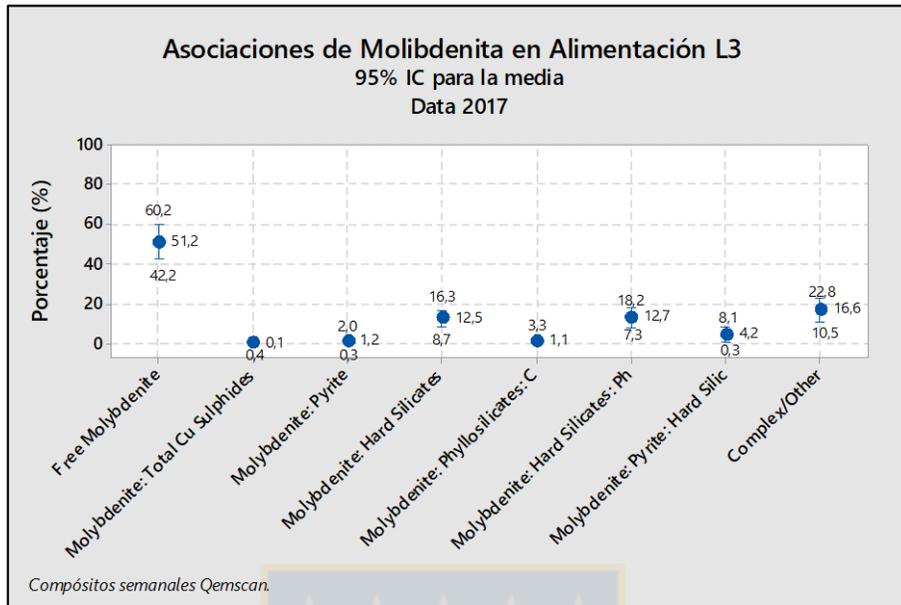


Figura 84. Asociación de la Molibdenita en AL3 (2017).

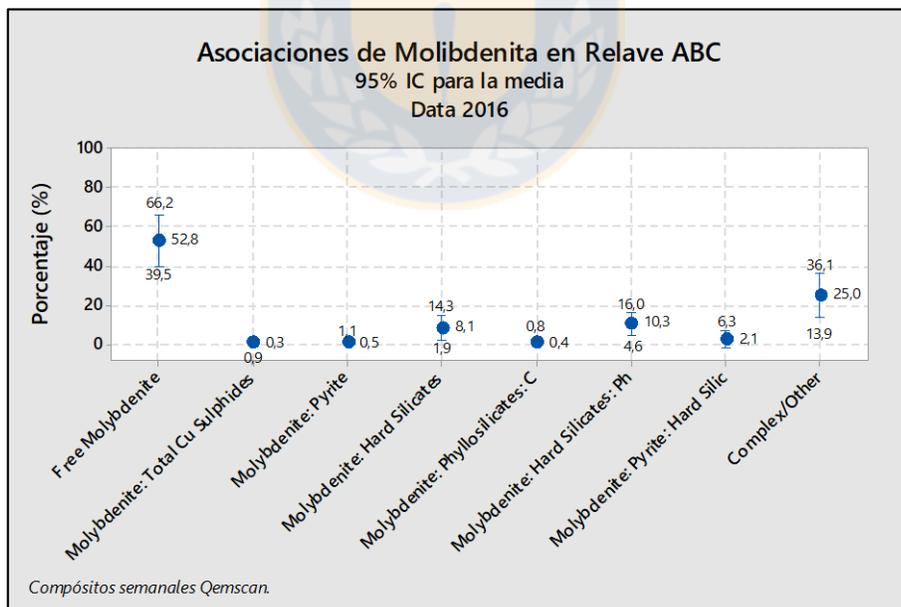


Figura 85. Asociación de la Molibdenita en Relave ABC (2016).

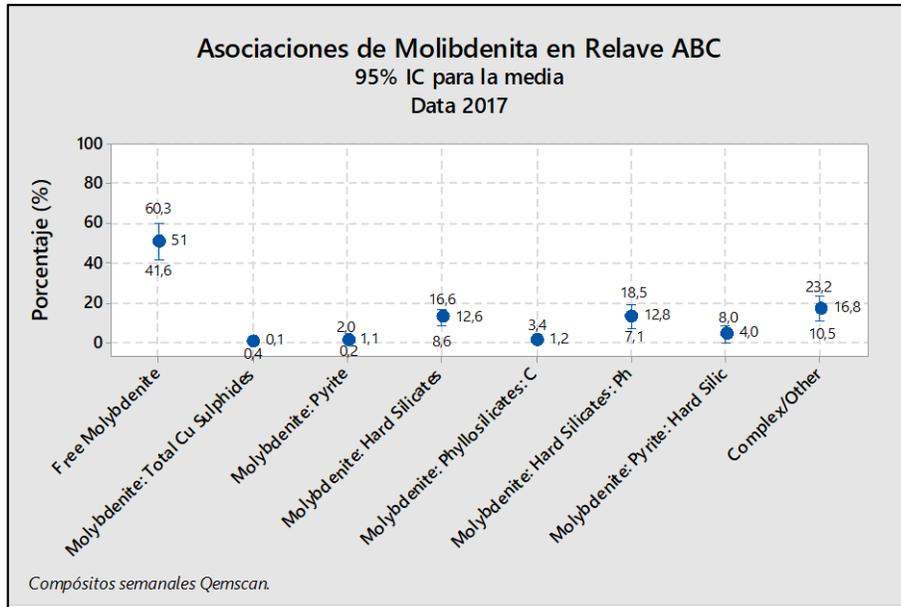


Figura 86. Asociación de la Molibdenita en Relave ABC (2017).

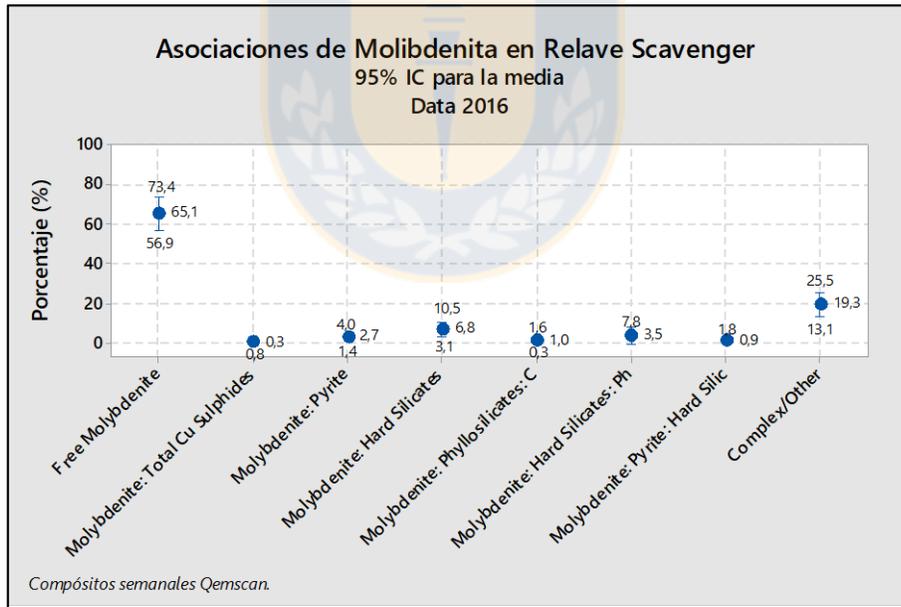


Figura 87. Asociación de la Molibdenita en Relave Scavenger (2016).

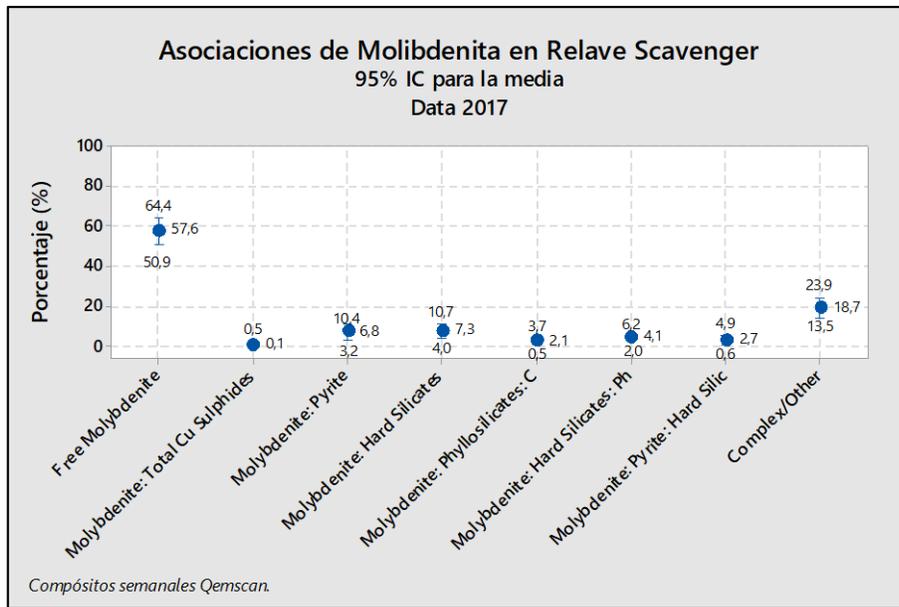


Figura 88. Asociación de la Molibdenita en Relave Scavenger (2017).

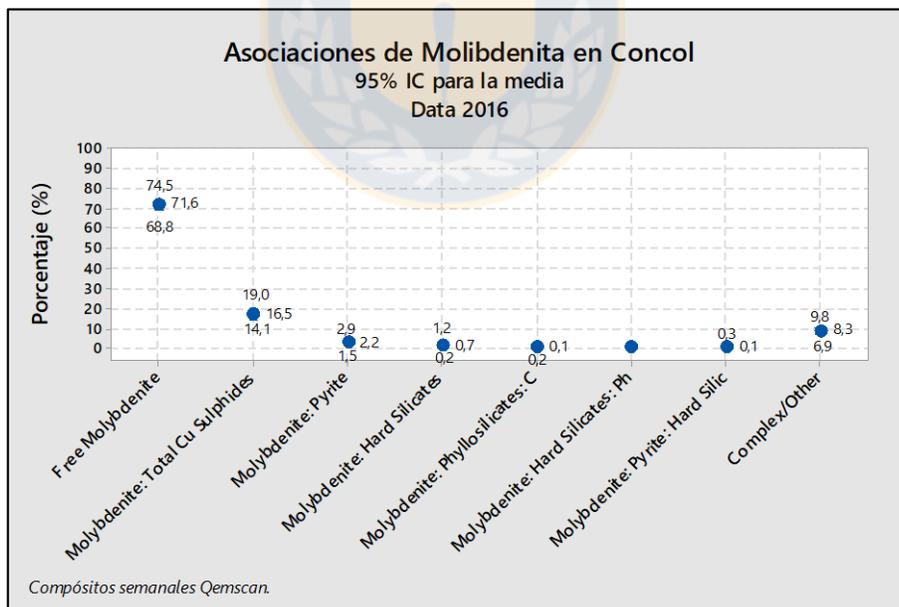


Figura 89. Asociación de la Molibdenita en Concol (2016).

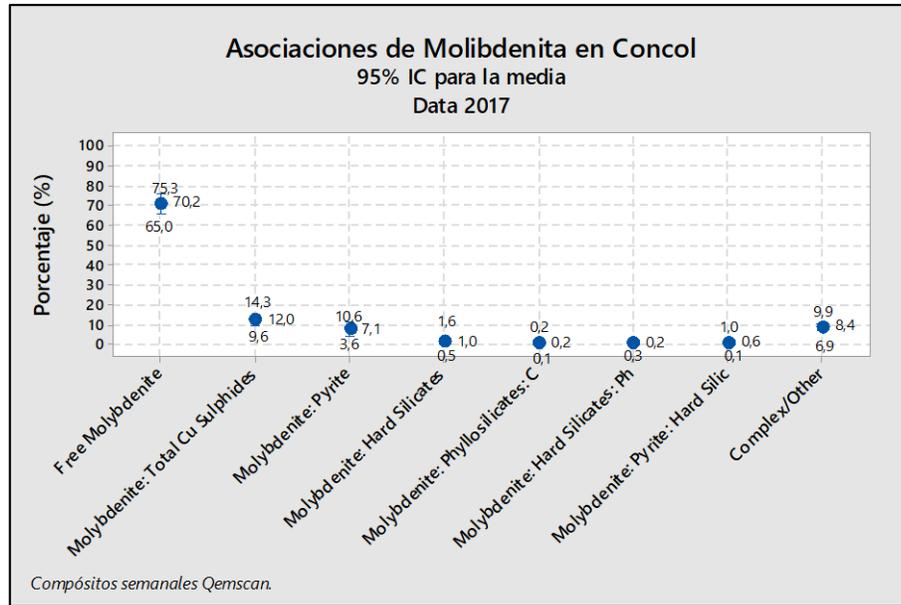


Figura 90. Asociación de la Molibdenita en Concol (2017).

D. Coefficientes de correlación de Pearson para concentrado Rougher y Concol

Tabla 8. Coeficiente de Correlación de Pearson etapa Concol

Variable	Ley Mo Concol (ppm)	Variable	Rec. Mo Concol (%)
Mo Alimentación (ppm)	50.2	Rec. Mo 2° Limpieza (%)	27.0
Rec. Mo Concol (%)	40.2	Densidad Mineral (t/m3)	20.0
Rec. Mo 2° Limpieza (%)	27.1	Malla -500 en Concol (%)	18.1
DWI	15.1	DWI	17.8
Densidad Mineral (t/m3)	11.7	UGM 4 (%)	11.1
Factor A	11.1	BWI	10.1
UGM 4 (%)	6.6	Malla -325 en Concol (%)	9.9
Malla -500 en Concol (%)	6.2	Solidos Concentrado 2° Limpieza (%)	5.1
BWI	3.9	Caolinita (%)	1.7

Malla -325 en Concol (%)	3.2	Insolubles (%)	0.7
UGM 3 (%)	2.5	Mo Alimentación (ppm)	0.5
Solidos Concentrado 2° Limpieza (%)	0.8	Pirofilita (%)	0.4
FeT en Concol (%)	0.4	UGM 2 (%)	0.0
Caolinita (%)	0.1	AsT en Concol (ppm)	19.4
pH 2° Limpieza	0.1	Malla +325 en Concol (%)	10.5
AsT en Concol (%)	32.6	UGM 5 (%)	8.2
UGM 5 (%)	27.7	UGM 6 (%)	6.7
UGM 6 (%)	14.7	Malla +200 en Concol (%)	6.5
Montmorillonita (%)	11.7	Tratamiento Planta (tms)	5.1
Suma de Arcillas (%)	7.4	P80 Planta (um)	5.1
Pirofilita (%)	5.1	Montmorillonita (%)	3.8
Malla +200 en Concol (%)	4.9	UGM 1 (%)	3.0
UGM 2 (%)	1.3	Agua de Lavado (t/m3)	1.2
Malla +100 en Concol (%)	0.9	FeT en Concol (%)	1.1
Malla +325 en Concol (%)	0.8	Suma de Arcillas (%)	0.7
Tratamiento Planta (tms)	0.6	UGM 3 (%)	0.4
Insolubles (%)	0.6	pH 2° Limpieza	0.2
UGM 1 (%)	0.3	Malla +100 en Concol (%)	0.2
P80 Planta (um)	0.3		
Agua de Lavado (m3/h)	0.2		

Tabla 9. Coeficiente de Correlación de Pearson etapa Rougher

Variable	Ley Mo Concentrado Rougher (ppm)	Variable	Recuperación Rougher Mo (%)
Mo Alimentación (ppm)	40.0	FeT en Concentrado Rougher (%)	41.3
FeT en Concentrado Rougher (%)	33.4	Densidad Mineral (t/m ³)	14.6
Densidad Mineral (t/m ³)	22.7	DWI	2.7
Factor A	12.3	BWI	1.1
DWI	6.4	UGM 4 (%)	0.9
UGM 3 (%)	4.4	UGM 2 (%)	0.6
UGM 4 (%)	1.7	UGM 3 (%)	0.2
BWI	0.8	Malla -200 (%)	0
UGM 1 (%)	0.2	UGM 1 (%)	0
Malla +100 (%)	0	FeT en Alimentación (%)	0
Tratamiento Planta (tms)	0	Mo Alimentación (ppm)	0
UGM 2 (%)	0	Solidos Flotación Rougher (%)	15.6
P80 Planta (um)	0	AsT Alimentación (%)	6.0
AsT Alimentación (ppm)	32.5	Factor m	4.7
UGM 5 (%)	24.5	UGM 6 (%)	4.4
UGM 6 (%)	16.1	UGM 5 (%)	4.1
Solidos Flotación Rougher (%)	12.4	P80 Planta (um)	1.4
Factor m	4.3	Malla +100 (%)	0.7
FeT en Alimentación (%)	3.1	Tratamiento Planta (tms)	0.5
Malla -200 (%)	0.5		

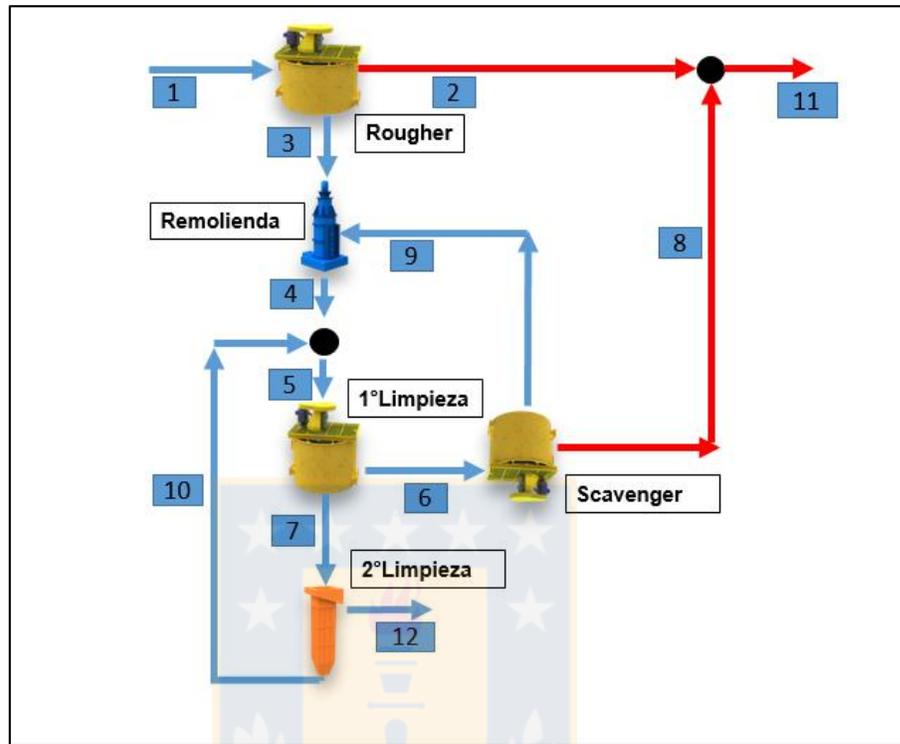
E. Muestreo Industrial (2013)

Figura 91. Esquema del Muestreo Industrial Planta Concentradora.

Tabla 10. Recuperaciones Obtenidas en Base al Muestreo Industrial

Recuperaciones	Masa	Cu	Mo
Rougher	8,4%	87,6%	58,5%
1° Cleaner	61,7%	84,3%	65,8%
2° Cleaner	19,2%	26,3%	18,8%
Barrido	43,0%	96,0%	92,3%
Limpieza	35,2%	97,3%	82,5%
Global	3,0%	85,2%	48,2%

Tabla 11. Resultados del Muestreo Industrial

		Flujo Másico (tph)	Leyes (%)		Flujo Finos (tph)	
			Sólido	Cu	Mo	Cu
1	Alimentación	7.100	1,05	0,020	75	3
2	Relave Rougher	6.503	0,14	0,009	9	1
3	Concentrado Rougher	597	10,94	0,151	65	3
4	Producto Remolienda	889	12,20	0,310	108	9
5	Alimentación 1° CI	1.775	16,11	0,388	286	19
6	Relave 1° CI	679	6,61	0,292	45	7
7	Concentrado 1° CI	1.096	22,00	0,468	241	16
8	Relave Barrido	387	0,46	0,040	2	0
9	Concentrado Barrido	292	14,77	0,622	43	6
10	Relave 2° CI	886	20,05	0,497	178	15
11	Relave final	6.890	0,16	0,011	11	2
12	Concentrado Final	210	30,25	0,374	64	2

F. Características de la UGM'S

Tabla 12. UGM y su definición

UGM	Zona Mineral	Alteración	Litología
1	Primario + Primario Pirítico	Argílica+Clorita+Sericita	Pórfidos
2	Primario + Primario Pirítico	Argílica+Clorita+Sericita	Roca de Caja
3	Primario + Primario Pirítico	Cuarzo-Sericita+Propilítico+Potasico	Pórfidos
4	Primario + Primario Pirítico	Cuarzo-Sericita+Propilítico+Potasico	Roca de Caja
5	Secundario	Argílica+Clorita+Sericita	Todas
6	Secundario	Cuarzo-Sericita+Propilítico+Potasico	Todas

G. Fórmulas para Temporalidad de Parámetros

SP: Suma producto

S: suma

1) Tratamiento (tms)

s(tratamiento(tms))

2) Ley de CuT (%)

$$\frac{\text{sp (CuT (\%));Tratatamiento Planta(tms)}}{\text{s (Tratamiento Planta(tms))}}$$

3) Ley de Mo (ppm)

$$\frac{\text{sp (Mo (ppm);Tratatamiento Planta(tms))}}{\text{s (Tratamiento Planta(tms))}}$$

4) P80 Planta (um)

$$\frac{\text{sp (P80 Planta (um);Tratatamiento Planta(tms))}}{\text{s (Tratamiento Planta(tms))}}$$

5) DWI

$$\frac{\text{sp (DWI;Tratatamiento Planta(tms))}}{\text{s (Tratamiento Planta(tms))}}$$

6) BWI

$$\frac{\text{sp (DWI;Tratatamiento Planta(tms))}}{\text{s (Tratamiento Planta(tms))}}$$

7) Densidad de Mineral (t/m3)

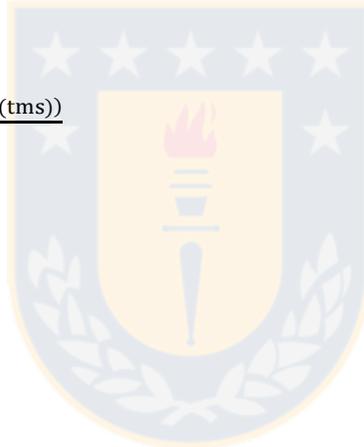
$$\frac{\text{sp (Densidad (\frac{t}{m^3});Tratatamiento Planta(tms))}}{\text{s (Tratamiento Planta(tms))}}$$

8) UGM (%)

$$\frac{\text{sp (UGM (\%);Tratatamiento Planta(tms))}}{\text{s (Tratamiento Planta(tms))}}$$

9) Arcillas (%)

$$\frac{\text{sp (Arcillas (\%);Tratatamiento Planta(tms))}}{\text{s (Tratamiento Planta(tms))}}$$



10)Producción(tms)

s(Concol(tms))

11)Recuperación Mo Colectivo (%)

$$\frac{\text{sp (R.Mo.Colectiva (\%));Tratatamiento Planta(tms);Ley Mo alimentación(ppm))}}{\text{s (Tratamiento Planta(tms);Ley Mo alimentación(ppm))}}$$

12)Mo en Concol (ppm)

$$\frac{\text{sp (Mo.Concol(ppm);Concol Producido(tms))}}{\text{s (Concol Producido(tms))}}$$

13)FeT en Concol (%)

$$\frac{\text{sp (FeT en Concol (\%);Concol(tms))}}{\text{s (Concol(tms))}}$$

14)Mallas en Concentrado (%)

$$\frac{\text{sp (Malla (\%);Concol(tms))}}{\text{s (Concol(tms))}}$$



H. Diagrama Actual CMDIC

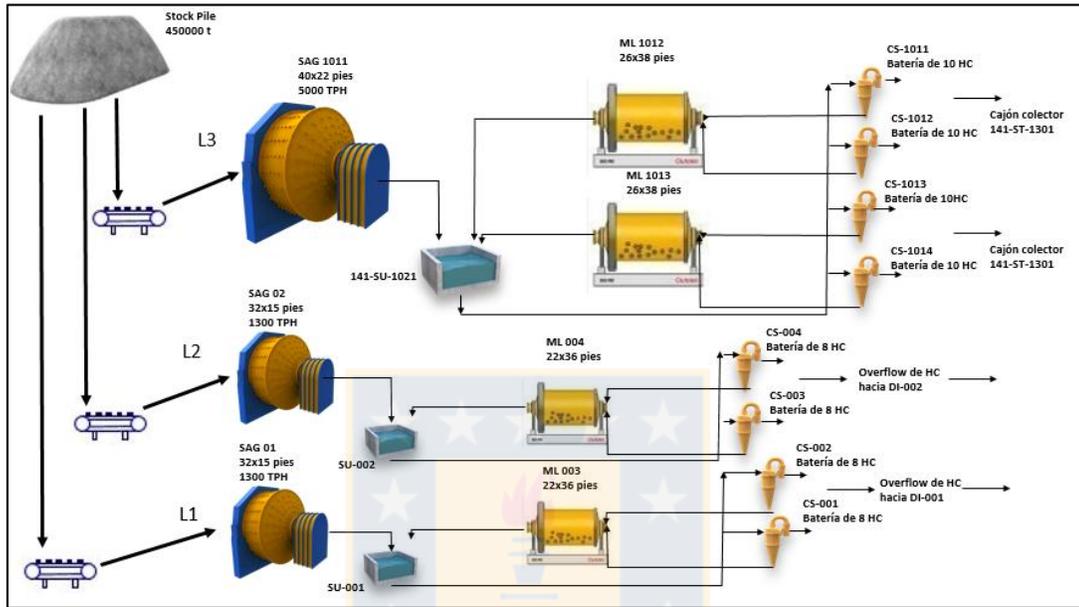


Figura 92. Circuito de Molienda y Clasificación CMDIC (2018).

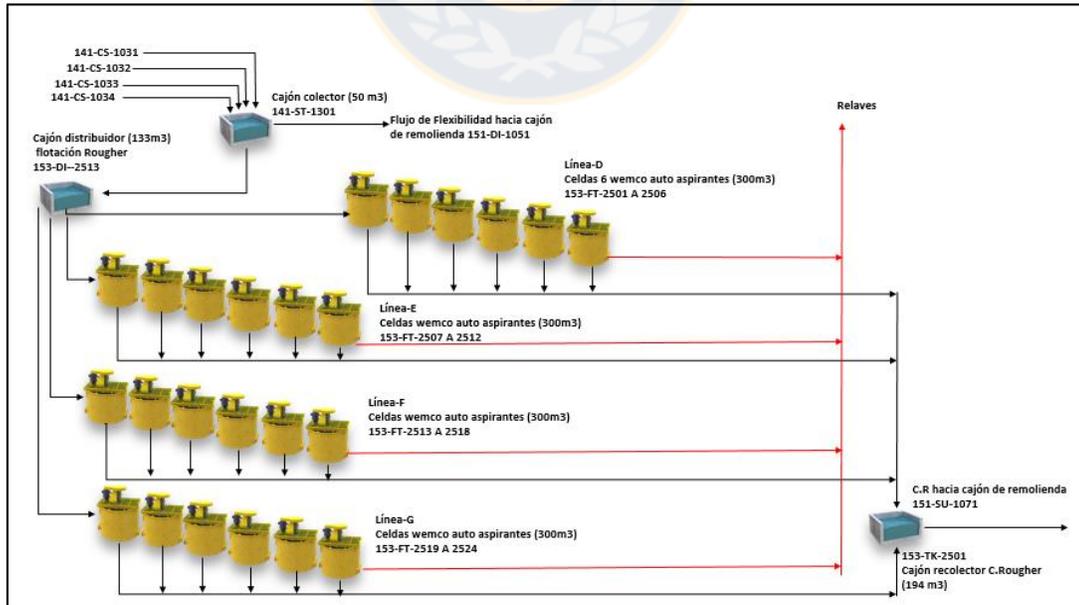


Figura 93. Flotación Rougher E, D, F, G CMDIC (2018)

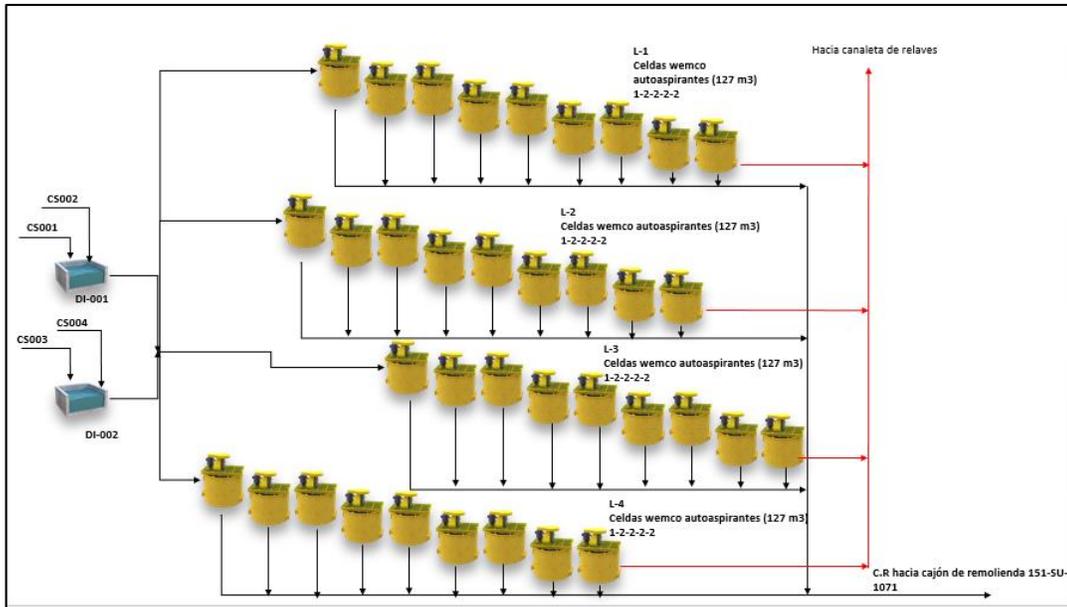


Figura 94. Flotación Rougher L1, L2, L3 y L4 CMDIC (2018)

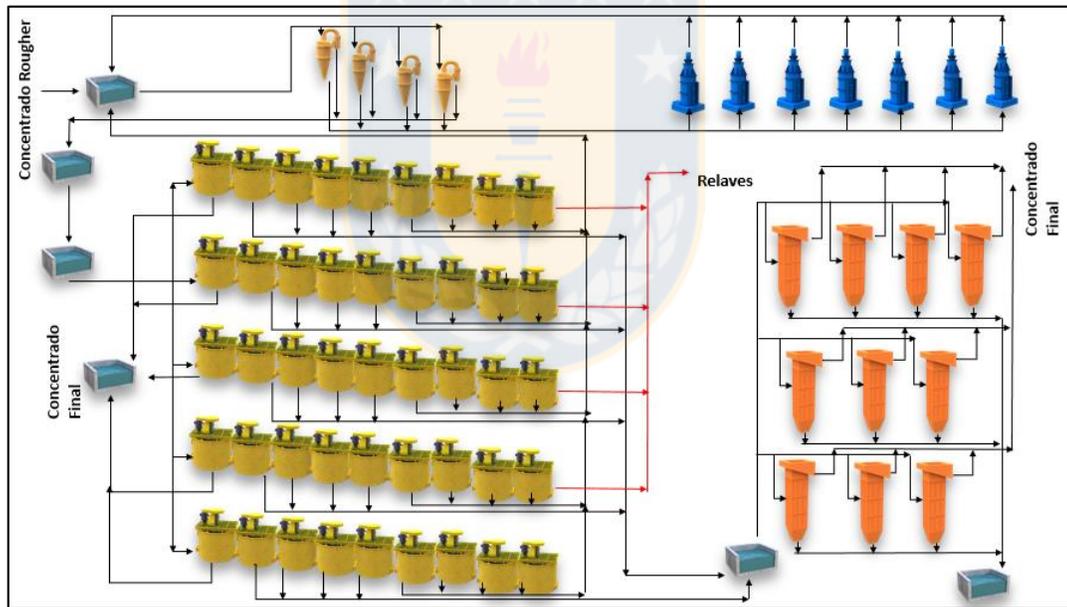


Figura 95. Circuito de Remolienda y Limpieza CMDIC (2018)

I. Puntos De adición de dosificación reactivos

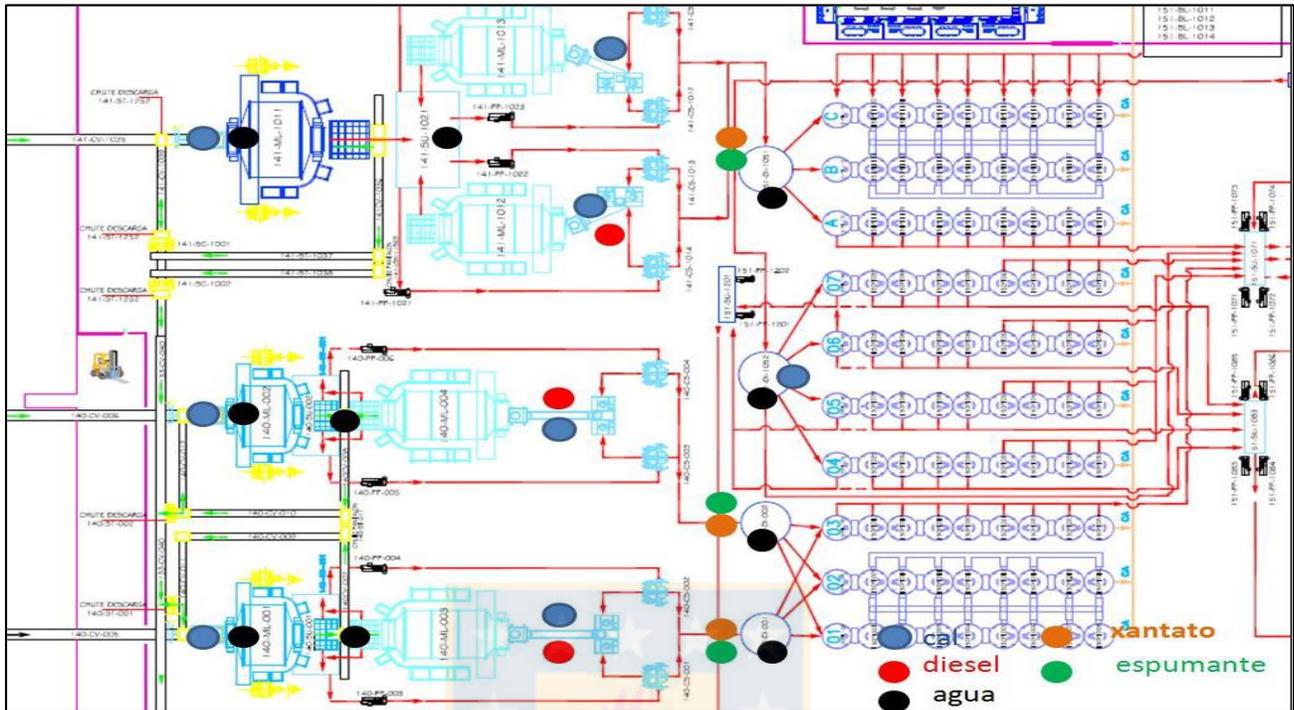


Figura 96. Puntos de adición de reactivos.

Tabla 13. Dosificación de reactivos.

Colector Primario	
Nombre	Isopropil Xantato de Sodio
Proveedor	SNF-FLOMIN
Punto de Adición	Canaleta de alimentación de celdas Rougher
Dosificación [gpt]	30-40
Espumante	
Nombre	Nalflote 9837P
Proveedor	Nalco
Punto de Adición	Canaleta de alimentación de celdas Rougher
Dosificación [gpt]	8-20
Colector Molibdeno	
Nombre	Diésel, Copec
Punto de adición	Molienda Secundaria
Dosificación [gpt]	30
Modificador	
Nombre	Cal Viva, 75% Cao libre y 17% +1/2" /Lechada de Cal al 15%
Punto de adición	Molienda Primaria/secundaria y etapa de Limpieza
Dosificación [Kg/t]	1,8-2,7