



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**IMPACTO ECONÓMICO DE LA CARACTERIZACIÓN
GEOMETALÚRGICA Y VARIABLES OPERACIONALES DE
MOLIBDENO EN LA PLANTA DE FLOTACIÓN SELECTIVA
CODELCO DIVISIÓN ANDINA**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA

EDUARDO ANDRÉS MORIN CERLIANI

PROFESOR GUÍA
JOSÉ CHARANGO FERNANDO MUNIZAGA ROSAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

GONZALO MONTES ATENAS
CRISTIAN IVÁN ESPINOZA CAMUS
DAVID GONZALO VARGAS NUÑEZ

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: Magíster en Minería
POR: Eduardo Morin Cerliani
FECHA: 11/11/2021
PROFESOR GUÍA: José Munizaga Rosas

**IMPACTO ECONÓMICO DE LA CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA Y
VARIABLES OPERACIONALES DE MOLIBDENO EN LA PLANTA DE
FLOTACIÓN SELECTIVA CODELCO DIVISIÓN ANDINA**

División Andina CODELCO ha presentado en los últimos cinco años una caída en la calidad del mineral alimentado desde la mina Rajo asociado a la disminución de la ley de molibdeno. Como consecuencia la Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno ha presentado mermas en los indicadores de recuperación declarados en la planificación, generando dificultades para concentrar selectivamente el mineral y cumplir con los compromisos comerciales.

Actualmente, compañías mineras en operación, así como también proyectos en estudio, se encuentran planificando su producción a través de modelos geometalúrgicos definidos como fenomenológicos que incorporan la variabilidad de los minerales. En base a lo anterior, es esencial poder mejorar y estandarizar el proceso de planificación de la producción en calidad, precisión y exactitud a través del desarrollo, actualización y validación de los modelos de procesos de recuperación asociados a los principales parámetros que afectan la recuperación de molibdeno en la etapa de flotación selectiva. Previo a la realización de este trabajo, la división contaba con un modelo de recuperación de molibdeno con desviaciones porcentuales por sobre lo requerido en los procesos de planificación.

El presente estudio incluye una evaluación del impacto económico generado por la desviación en la caracterización geo metalúrgica de molibdeno, mediante el desarrollo e implementación de un nuevo modelo de recuperación de molibdeno para la planta de flotación selectiva de División Andina, constituido de tal robustez de información que permita predecir y ejecutar de manera oportuna la planificación y que además facilite la toma de decisiones en la operación para cumplir con los compromisos comerciales presupuestados para el sostenimiento del negocio.

La metodología de trabajo incluye la definición de la unidad geometalúrgica para la variable recuperación de molibdeno en el modelo de bloques y el desarrollo de un diagnóstico actualizado del comportamiento de la recuperación a través de un muestro en Planta de Flotación Selectiva. Se desarrolló y validó finalmente un modelo predictivo de recuperación de molibdeno, utilizando sus resultados de predicción en el proceso de planificación corto plazo 2020 y planificación anual 2021.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
2	Marco Teórico	2
2.1	Planteamiento del problema	2
2.2	Justificación de la Investigación-Hipótesis	3
2.3	Objetivos	3
2.3.1	Objetivo General	3
2.3.2	Objetivos Específicos	4
2.4	Alcances	4
3	Marco Metodológico	5
3.1	Caracterización Geometalúrgica	5
3.2	Diagnóstico Operacional Metalúrgico	5
3.3	Desarrollo Modelo de Recuperación de Molibdeno	6
3.4	Desarrollo Modelo de Recuperación de Molibdeno	6
4	Antecedentes	7
4.1	Base de Datos de muestras Geometalúrgicas	7
4.1.1	Antecedentes Campaña 2018	7
4.1.2	Base de datos	8
4.1.3	Análisis estadístico	11
4.2	Recuperación de Molibdeno: Flotación Colectiva	17
4.3	Recuperación de Molibdeno: Flotación Selectiva	19
4.4	Diagnóstico Planta Flotación Selectiva	21
4.4.1	Tratamiento y Porcentaje de sólidos (Cp)	21
4.4.2	Consumo de reactivos	22
4.4.3	Grado de liberación en concentrado mixto	23
4.4.4	Factores sobre la recuperación de molibdeno	24
4.5	Modelo de Recuperación de Molibdeno	25
4.5.1	Revisión de modelo de procesos de recuperación primaria de cobre	26
4.5.2	Desarrollo modelo de procesos de recuperación colectiva de molibdeno	27
5	Desarrollo	30
5.1	Caracterización Geometalúrgica	30
5.1.1	Ensayos de laboratorio muestras campaña 2019	30
5.1.2	Base de datos de muestras geometalúrgicas	31

5.1.3	Antecedentes mineralógicos y mapeo geológico	33
5.1.4	Definición de unidades geometalúrgicas RecMo	38
5.1.5	Análisis estadístico de datos.....	42
5.1.6	Aseguramiento de calidad	45
5.2	Diagnóstico Operacional Metalúrgico.....	52
5.2.1	Descripción de instalaciones Planta Concentradora	52
5.2.2	Análisis de Diagnóstico.....	57
5.2.3	Muestreo en Planta.....	65
5.2.4	Alternativas de Mejora	67
5.3	Modelo de Procesos – Recuperación Primaria Colectiva Cu y Mo.....	68
5.3.1	Metodología.....	68
5.3.2	Desarrollo de modelo predictivo de recuperación primaria.....	69
5.3.3	Resultados del modelo predictivo de recuperación primaria de cobre	75
5.3.4	Resultados del modelo predictivo de recuperación primaria de molibdeno .	81
5.4	Modelo de Procesos – Recuperación Másica	85
5.4.1	Propuesta de metodología.....	85
5.4.2	Desarrollo de modelo predictivo de recuperación másica	85
5.4.3	Resultados del modelo predictivo de recuperación másica primaria	89
5.5	Modelo de Procesos – Ley de concentrado primario	91
5.5.1	Propuesta de metodología.....	91
5.5.2	Resultados del modelo predictivo de ley de concentrado primario.....	92
5.6	Modelo de Procesos – Recuperación circuito Limpieza/Barrido.....	93
5.6.1	Propuesta de metodología.....	93
5.6.2	Desarrollo de modelo predictivo de recuperación limpieza-barrido	94
5.6.3	Resultados del modelo de recuperación circuito limpieza-barrido.....	95
5.7	Modelo de Procesos – Recuperación Selectiva	96
5.7.1	Propuesta de metodología.....	96
5.7.2	Desarrollo de modelo predictivo de recuperación selectiva.....	97
5.7.3	Resultados del modelo de recuperación selectiva	98
5.8	Validación y Conciliación 2020	99
5.8.1	Evaluación Modelos de Procesos	99
5.9	Evaluación Impacto Económico	107
6	Conclusiones y Recomendaciones	111
7	Bibliografía.....	113
Anexos.....		115

Anexo A: Guías Técnicas de Etapas de Flotación Selectiva	116
Anexo B: Balance de Materiales Planta de Molibdeno Flotación Selectiva.....	132

Índice de Tablas

Tabla 1. Condiciones prueba estándar.	7
Tabla 2. Resumen Campañas de ensayos con datos de RecMo.	9
Tabla 3. Distribución de muestras por sector.	11
Tabla 4. Media, desviación estándar de recuperación de molibdeno por sector.....	13
Tabla 5. Estadística básica de recuperación de molibdeno agrupado por litología.....	15
Tabla 6. Base comparativa de aumento en el consumo de NaSH periodo 2014-2019.	23
Tabla 7. Resumen Campañas de Ensayos de Rec Mo	31
Tabla 8. Distribución de Muestras de RecMo por sector.	31
Tabla 9. Estadística básica recuperación molibdeno agrupado por alteración mapeada..	36
Tabla 10. Estadística básica recuperación molibdeno agrupado por mineralización mapeada.....	37
Tabla 11. Estadísticos Recuperación de Mo por UGM.....	43
Tabla 12. Estadística participación UGMs.....	57
Tabla 13. Estadística origen de mineral 2014-2019.	63
Tabla 14. Estadística del tratamiento horario de molienda.....	63
Tabla 15. Grado de molienda flotación colectiva periodo 2014-2019.	64
Tabla 16. Estadística granulometría de alimentación flotación colectiva.	64
Tabla 17. Leyes y concentración de sólidos en peso obtenidas por muestreo en planta División Andina, septiembre de 2019.....	65
Tabla 18. Kp Cu.....	79
Tabla 19. Pendientes “m” de corrección R_{inf} versus P80 para Cu.	80
Tabla 20. Resultados mensuales/anuales recuperaciones primarias de Cu.....	81
Tabla 21. Kp Mo.	82
Tabla 22. Pendientes “m” de corrección R_{inf} versus P80 para Mo.....	83
Tabla 23. Resultados mensuales y anuales recuperación primaria colectiva de Mo.	84
Tabla 24. Variación de recuperación primaria de Mo.	84
Tabla 25. Ajuste de P80 parámetro “f”.	88
Tabla 26. “ k_1 ” y “ k_2 ”	88
Tabla 27. Recuperación másica por UGM.	90
Tabla 28. Resultados anuales recuperación másica primaria colectiva.....	91
Tabla 29. Resultados anuales ley de concentrado primario.	92
Tabla 30. Resultados anuales de modelo recuperación limpieza-barrido.....	96
Tabla 31. Resultados anuales de modelo recuperación selectiva.	98
Tabla 32. Conciliación recuperación primaria de Cu Global.	100
Tabla 33. Conciliación recuperación primaria de Mo Global.....	101
Tabla 34. Conciliación recuperación colectiva global de Cu.....	103
Tabla 35. Conciliación recuperación colectiva global de Mo.	105
Tabla 36. Conciliación recuperación selectiva de Mo.....	106
Tabla 37. Recuperación Selectiva Real vs Programa 2017-2020	108
Tabla 38. Cumplimiento Anual Real vs Programa de Producción Molibdeno P0 2017 ...	109
Tabla 39. Cumplimiento Anual Real vs Programa de Producción Molibdeno P0 2018...	109
Tabla 40. Cumplimiento Anual Real vs Programa de Producción Molibdeno P0 2019...	109
Tabla 41. Cumplimiento Anual Real vs Programa de Producción Molibdeno P0 2020...	110
Tabla 42. Estimación Potencial Impacto Económico	110

Índice de Figuras

Figura 1. Leyes de alimentación a planta concentradora 2013-2030.....	2
Figura 2. A: Máquina de Flotación Agitair LA-500. B: Celda de Flotación.....	8
Figura 3. Plano con la Distribución de Muestras ensayadas en variable RecMo.....	10
Figura 4. Histograma de longitud de muestras con información de recuperación de molibdeno.....	11
Figura 5. Histograma Recuperación de Molibdeno.....	12
Figura 6. Histograma Recuperación de Molibdeno caracterizado por sector.....	12
Figura 7. Mean plot variable RecMo ordenados por coordenadas. A: Coordenada Este. B: Coordenada Norte.....	13
Figura 8-C: Mean plot variable RecMo por cota.....	14
Figura 9. A: Mean plot variable Mo ordenado por cota. B: Gráfico Ley de Mo (MOM) versus Recuperación de Molibdeno.....	14
Figura 10. Variable recuperación de molibdeno agrupada por litología. A: Blox Plot. B: Normal Probabilístico.....	16
Figura 11. Gráfico ley/recuperación in-situ Mo Real Alimentado mina rajo.....	17
Figura 12. Gráfico ley/recuperación in-situ Mo Real Alimentado mina subterránea.....	18
Figura 13. Leyes de alimentación flotación colectiva.....	18
Figura 14. Rendimiento flotación colectiva.....	19
Figura 15. Ley de alimentación flotación selectiva.....	20
Figura 16. Resultados mensuales flotación selectiva.....	20
Figura 17. Razón de enriquecimiento de flotación selectiva.....	21
Figura 18. Tonelaje por día y concentración de sólidos en concentrado mixto.....	22
Figura 19. Liberación de Mo en concentrado mixto.....	24
Figura 20. Factores que inciden en la recuperación de molibdeno.....	25
Figura 21. Metodología de predicción recuperación primaria colectiva.....	27
Figura 22. Plano con la Distribución de muestras ensayadas por %RecMo.....	32
Figura 23. Histograma de Longitud de Muestras RecMo.....	33
Figura 24. Gráficos mean plot variable recuperación de molibdeno quebrado por contenido mineralógico. A: Calcopirita. B: Feldespato potásico.....	33
Figura 25. Gráficos mean plot variable recuperación de molibdeno quebrado por contenido mineralógico. C: Plagioclasa. D: Sericita.....	34
Figura 26. Recuperación de molibdeno versus grado de liberación molibdenita. A: >80% molibdenita liberada. B: <20% molibdenita liberada.....	34
Figura 27. Ejemplo del Grado de liberación a un mismo P80. Para un mismo tamaño de partícula los sulfuros gruesos (en cúmulos o vetas) son liberados y una mineralización fina (diseminado) se aprecia ocluida (modificado de Martínez C., 2017).....	35
Figura 28. Recuperación de molibdeno quebrado por alteración mapeada. A: Gráfico box plot. B: Gráfico media versus desviación estándar, descartando alteraciones con menos de 15 datos.....	35
Figura 29. Recuperación molibdeno por zona mineral mapeada. A: Box Plot. B: Mean Plot. C: Media vs desviación estándar. D: gráfico normal probabilístico.....	36

Figura 30. Recuperación molibdeno por zona mineral mapeada. C: Media vs desviación estándar. D: gráfico normal probabilístico.	37
Figura 31. Análisis RecMo respecto a la cantidad de vetillas A y B por metros. A: Histograma. B: Mean plot.....	38
Figura 32. Recuperación Molibdeno por elevación (normalizado cada 32 metros) quebrado por primario-secundario.	39
Figura 33. Recuperación molibdeno por UGMREC. A: Box Plot. B: Mean Plot. C: Media vs desviación estándar. D: gráfico normal probabilístico.	40
Figura 34. Secciones modelo alteración. Línea color magenta corresponde a Techo Sulfatos. A: Río Blanco.....	40
Figura 35. Secciones modelo alteración. Línea color magenta corresponde a Techo Sulfatos. B: Don Luis.	41
Figura 36. Gráficos Mean Plot recuperación molibdeno versus grado de liberación, por UGMREC. A: Molibdenita >80% Liberada. B: Molibdenita <20% liberada.	41
Figura 37. Sección longitudinal NE-SW esquemática definición de Unidades para RecMo.	42
Figura 38. Histograma de Recuperación de molibdeno.	43
Figura 39. Gráfico de Comportamiento de Rec Mo por UGM REC.	44
Figura 40. Histograma de ley de Mo en muestras ensayadas.....	44
Figura 41. Gráficos comparativos Cu DAND vs Cu SGS.....	46
Figura 42. Leyes STD DAND-03 de Cu (A) y Mo (B) en muestras de cabeza.....	46
Figura 43. Leyes STD CCU-AND-01-10 de Cu (A) y Mo (B) para los concentrados de las pruebas geometalúrgicas estándar.	47
Figura 44. Leyes STD DAND-04 de Cu (A) y Mo (B) para los relaves de las pruebas geometalúrgicas estándar.....	47
Figura 45. Gráficos comparativos Rec Peso Tiempo fijo vs Rec Peso Cinética 11 min.	48
Figura 46. Gráficos comparativos Cu calculado Tiempo Fijo vs Cu calculado Cinética 11 min.	49
Figura 47. Gráficos comparativos Mo calculado Tiempo Fijo vs Mo calculado Cinética 11 min.	50
Figura 48. Gráficos comparativos Rec Cu Tiempo Fijo vs Rec Cu Cinética 11 min.....	51
Figura 49. Gráficos comparativos Rec Mo Tiempo Fijo vs Rec Mo Cinética 11 min.....	52
Figura 50. Diagrama chancado y molienda mina subterránea.	53
Figura 51. Diagrama chancado y molienda mina rajo.....	53
Figura 52. Diagrama flotación colectiva.....	54
Figura 53. Diagrama flotación selectiva.....	56
Figura 54. Gráfico Real Alimentado Cu mina rajo.....	58
Figura 55. Gráfico Real Alimentado Cu mina subterránea.	58
Figura 56. Gráfico ley/recuperación in-situ Cu Real Alimentado de mina rajo.	59
Figura 57. Gráfico ley/recuperación In-situ Cu Real Alimentado de mina subterránea.	59
Figura 58. Gráfico Alimentado Mo Real de mina rajo.....	60
Figura 59. Gráfico Alimentado Mo Real de mina subterránea.	60
Figura 60. Gráfico ley/recuperación in-situ Mo Real Alimentado de mina rajo.....	61
Figura 61. Gráfico ley/recuperación in-situ Mo Real Alimentado de mina subterránea.	62
Figura 62. Gráfico de origen mineral rajo y mina subterránea.....	62

<i>Figura 63. Tratamiento horario de molienda por planta.</i>	63
<i>Figura 64. Granulometría de alimentación a flotación colectiva.</i>	64
<i>Figura 65. Resultados de ley de Mo en concentrado final de flotación selectiva, agosto-octubre de 2019.</i>	66
<i>Figura 66. Área modelada flotación primaria.</i>	69
<i>Figura 67. Ejemplo de K_p y vector Factor de Escala.</i>	71
<i>Figura 68. Origen del mineral.</i>	76
<i>Figura 69. UGM de Cu Alimentadas a concentradora.</i>	76
<i>Figura 70. Ley y recuperación In-situ de Cu.</i>	77
<i>Figura 71. Tratamiento plantas de molienda.</i>	78
<i>Figura 72. Grado de molienda en plantas de molienda.</i>	79
<i>Figura 73. Resultados modelo de recuperación primaria de Cu.</i>	80
<i>Figura 74. Ley de minerales Mo.</i>	82
<i>Figura 75. Resultados modelo de recuperación primaria colectiva de Mo.</i>	83
<i>Figura 76. Correlación parámetro "f" UGM Codelco Andina.</i>	87
<i>Figura 77. Recuperación In-situ minerales División Andina.</i>	89
<i>Figura 78. Resultados modelo de recuperación másica primaria colectiva.</i>	90
<i>Figura 79. Resultados modelo de ley de concentrado primario.</i>	92
<i>Figura 80. Área modelada circuito limpieza-barrido.</i>	94
<i>Figura 81. Resultados modelo de recuperación limpieza-barrido.</i>	95
<i>Figura 82. Flotación selectiva División Andina.</i>	97
<i>Figura 83. Resultados modelo de recuperación selectiva.</i>	99
<i>Figura 84. Recuperación Primaria por circuito de flotación modelo actual y nuevo.</i>	100
<i>Figura 85. Recuperación Primaria de Cu modelo actual y nuevo.</i>	100
<i>Figura 86. Recuperación Primaria de Cu modelo actual y nuevo ajustado.</i>	101
<i>Figura 87. Recuperación Primaria de Mo modelo actual y nuevo.</i>	101
<i>Figura 88. Recuperación Primaria de Mo modelo actual y nuevo ajustado.</i>	102
<i>Figura 89. Recuperación Cu Circuito Limpieza-Barrido.</i>	103
<i>Figura 90. Modelo Recuperación Colectiva Global Cu.</i>	104
<i>Figura 91. Modelo Recuperación Colectiva Global Cu Ajustado.</i>	104
<i>Figura 92. Recuperación Mo Circuito Limpieza-Barrido.</i>	104
<i>Figura 93. Modelo Recuperación Colectiva Global Mo.</i>	105
<i>Figura 94. Modelo Recuperación Colectiva Global Mo Ajustado.</i>	106
<i>Figura 95. Modelo Recuperación Selectiva.</i>	107
<i>Figura 96. Modelo Recuperación Selectiva Ajustado.</i>	107
<i>Figura 97. Resultados mensuales flotación selectiva.</i>	108

1 Introducción

La División Andina de CODELCO se encuentra en un proceso de búsqueda en el marco de mejoras a los procesos que sustentan la operación, tomando en consideración las variables involucradas desde la definición geometalúrgica hasta la operación en planta.

En esta línea se encuentra el contexto actual de la Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno, la cual ha presentado mermas en los indicadores de recuperación producidas por las desviaciones entre la planificación de los recursos asociados a los modelos geometalúrgicos actuales y el comportamiento real de los minerales a nivel de planta.

Como consecuencia la Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno ha presentado mermas en los indicadores de recuperación declarados en la planificación, generando dificultades para concentrar selectivamente el mineral y cumplir con los compromisos comerciales.

En base a lo anterior y con el objetivo de disminuir las pérdidas económicas respecto al plan de negocios establecido en los ejercicios anuales de planificación, se propone realizar una evaluación del impacto económico generado por la desviación en el proceso de planificación del molibdeno en la división, mediante el desarrollo y validación de un nuevo modelo de recuperación de molibdeno.

En una primera instancia, se considera la realización de un estudio de las unidades geometalúrgicas de recuperación de molibdeno del modelo de bloques del yacimiento, con la finalidad de establecer un mejor modelo de predicción de recuperación colectiva y selectiva.

Para asegurar el desarrollo de un modelo con un fuerte componente fenomenológico pero ajustado por factores operacionales, se considera un estudio metalúrgico a nivel planta que permita la caracterización y respaldo de las variables aplicadas en los modelos actuales, identificando las razones que han afectado el desempeño, tales como disminución en ley de cabeza, pérdidas por oclusión y liberación del mineral, detenciones de planta, recirculación de material, entre otros.

En cuanto a la planificación, permitirá predecir el comportamiento a escala industrial del mineral futuro en las áreas operativas o productivas y en los proyectos en desarrollo, y a su vez, asegurar los compromisos comerciales de venta de concentrado.

2 Marco Teórico

2.1 Planteamiento del problema

División Andina CODELCO ha presentado en los últimos cinco años una caída en la calidad del mineral alimentado desde la mina Rajo además de una disminución de la recuperación primaria In-situ de cobre y molibdeno. Como consecuencia la Planta de Flotación Selectiva ha reflejado una tendencia a la baja en la ley de alimentación, concentrado y recuperación de molibdeno, generando dificultades para concentrar selectivamente el mineral y cumplir con los compromisos de la planificación.

La Figura 1 muestra las leyes reales y estimadas (según P0 2019) de cobre y molibdeno del mineral que alimenta actualmente y que alimentará a futuro a la planta concentradora.

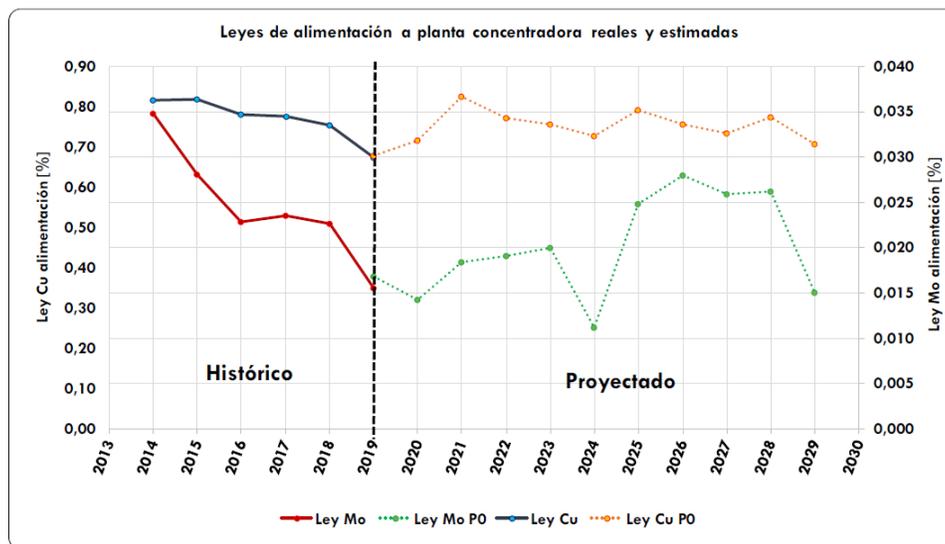


Figura 1. Leyes de alimentación a planta concentradora 2013-2030.

Se observa que la ley de molibdeno para el quinquenio próximo se encuentra bajo las leyes registradas en los últimos años, por debajo de 0.020%. Es por esta razón que surge la necesidad de analizar y replantear la estrategia de operación en el escenario en que las leyes de concentrado mixto se encuentren bajo las capacidades de diseño de la etapa de flotación selectiva.

En línea de lo anterior, factores como la correcta definición de las unidades en las campañas geometalúrgicas (UGM) así como la incorporación en el modelo de bloques del yacimiento de nuevos parámetros que inciden en los resultados de la operación, son determinantes para predecir los comportamientos del mineral en los años siguientes [1].

En base a lo comentado y visualizando las oportunidades de mejora de estas herramientas en su capacidad predictiva, se precisa el desarrollo de modelos geometalúrgicos de proceso de tal robustez de información que permitan ejecutar de manera oportuna el plan minero y el uso de los recursos, así como también, faciliten la toma justificada de decisiones en la operación planta para cumplir con los compromisos comerciales presupuestados para el sostenimiento del negocio.

2.2 Justificación de la Investigación-Hipótesis

Actualmente los modelos geometalúrgicos son una herramienta de gestión en la planificación minera y metalúrgica, sin embargo, la imprecisión de las variables consideradas no permite conciliar con los resultados obtenidos. Las mermas en los resultados productivos producidos por las desviaciones entre la planificación de los recursos asociados a los modelos geometalúrgicos actuales y el comportamiento real de los minerales a nivel de planta, se han reflejado mayoritariamente en la planta de flotación selectiva y no en la planta de flotación colectiva, resultando en un aumento del factor de enriquecimiento para poder cumplir con el grado comercial comprometido para la venta de los concentrados de molibdeno.

La hipótesis del trabajo consiste en demostrar que mediante el desarrollo de una herramienta integrativa para el análisis de información geometalúrgica se puede reducir la incertidumbre geológica y metalúrgica en el proceso de planificación de producción de molibdeno, generando un aporte de valor a la empresa. Además, corregir desviaciones y anticipar comportamientos de los diversos minerales en el proceso, mejorando así el uso de los recursos y ajustando los compromisos comerciales de venta y producción de molibdeno, de esta manera disminuyendo el impacto económico en relación a las pérdidas productivas, evitando además la aplicación de multas por incumplimiento de la calidad de comercialización. El presente estudio abordará el desarrollo de un modelo cuyos resultados de predicción permitan reflejarse en los planes de conciliación al comparar la respuesta de los minerales enviados a planta respecto de la predicción del modelo de bloques.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo General

Disminuir el impacto económico asociado al incumplimiento de los compromisos productivos de molibdeno, estandarizando los factores considerados en el proceso de planificación de la producción en calidad y precisión, desarrollando y validando un nuevo modelo de recuperación selectiva.

2.3.2 Objetivos Específicos

- Definir unidades geometalúrgicas de recuperación de molibdeno en modelo de bloques de yacimiento para caracterizar comportamientos de recuperación.
- Determinar los parámetros que afectan la cinética de recuperación de molibdeno de los modelos a través de la realización de muestreo en la Planta de Flotación Selectiva.
- Desarrollar la construcción de un nuevo modelo predictivo para la recuperación de molibdeno, a partir de la definición de características geológicas y de los parámetros operacionales.
- Realizar la validación del modelo de recuperación de molibdeno, conciliando las predicciones con resultados de planta.
- Analizar las desviaciones de los errores porcentuales actuales de recuperación de molibdeno en los procesos de flotación colectiva y selectiva.
- Evaluar económicamente la disminución de las pérdidas productivas al incluir un nuevo modelo de planificación de recuperación de molibdeno.

2.4 Alcances

El estudio se centrará principalmente en mejorar y estandarizar los procesos de planificación de los recursos mineros del yacimiento mediante el desarrollo y validación de un modelo predictivo de recuperación de molibdeno, establecido a partir de datos operacionales extraídos de muestreos de planta, data histórica, así como también de información y antecedentes mineralógicos obtenida en las campañas geometalúrgicas.

Estos temas serán revisados en conjunto a los especialistas de la Superintendencia de Geología y Superintendencia de Planificación de corto y largo plazo de la División Andina de CODELCO. Otros análisis serán abordados con las empresas de consultoría y asesorías contratadas por la división.

De obtener buenas correlaciones, los resultados obtenidos en este estudio serán considerados en los futuros procesos de planificación de la división.

3 Marco Metodológico

3.1 Caracterización Geometalúrgica

La primera etapa del trabajo consistirá en la caracterización in situ del comportamiento y variabilidad de la recuperación rougher de molibdeno. Contar con estos datos permitiría la estimación de la variable “Recuperación de Molibdeno” RecMo en el modelo de bloques y así poder mejorar los modelos de planificación de corto y largo plazo que actualmente son función de la ley de molibdeno. La metodología de caracterización se compone de las siguientes etapas:

- Ensayos de laboratorio: Se realizarán pruebas metalúrgicas de laboratorio en condiciones fijas y estandarizadas con muestras de mineral correspondientes a la campaña geometalúrgica 2019.
- Base de datos de muestras geometalúrgicas: Considera el análisis de los resultados asociados a ensayos metalúrgicos con información disponible para el molibdeno, caracterizando además su longitud y distribución espacial en el yacimiento.
- Análisis estadístico de datos: Estadística básica de la variable RecMo de molibdeno” obtenida de los ensayos de flotación.
- Antecedentes mineralógicos y mapeo geológico: El objetivo es estudiar el control geológico de la variable RecMo analizando el comportamiento frente a la alteración mapeada y de la mineralogía QEMSCAN disponible.
- Definición de Unidades Geometalúrgicas de Recuperación de Molibdeno: Se revisarán los antecedentes geológicos del yacimiento para interpretar la distribución de las zonas de acuerdo con la variable RecMo.
- Control y Aseguramiento de Calidad en Muestras Geometalúrgicas: Se realiza un proceso de homologación para los ensayos con el objetivo de asegurar una continuidad operativa y repetibilidad a lo largo del tiempo.

3.2 Diagnóstico Operacional Metalúrgico

La siguiente etapa consiste en poder identificar los factores que inciden en la recuperación de molibdeno en las plantas de flotación. Esto a través de metodologías de muestro y diagnóstico operacional.

- Muestreo Plantas de Flotación: Se planifica realizar muestreo en la planta de flotación selectiva con la finalidad de conocer el comportamiento de éstas a través de balance de finos y de materiales.
- Diagnóstico Operacional: Incorporando la nueva información del muestreo a la información histórica, se realizará un análisis de diagnóstico del mineral alimentado a la etapa de molienda hasta la obtención de los productos: concentrado de cobre y concentrado de molibdeno.

3.3 Desarrollo Modelo de Recuperación de Molibdeno

Se considera el desarrollo de un modelo predictivo de recuperación de molibdeno considerando la información de caracterización y diagnóstico operacional para posteriormente validar los resultados respecto a la información de los minerales alimentados a las plantas de flotación.

- Desarrollo del Modelo: Se establecerá una metodología para la elaboración de un modelo de procesos que permita predecir la recuperación metalúrgica de molibdeno a partir de información geometalúrgica In-situ.
- Validación y Conciliación: Se validará el modelo desarrollado utilizando la información actualizada de los minerales procesados.

3.4 Desarrollo Modelo de Recuperación de Molibdeno

La etapa final considera una evaluación del impacto económico generado por las pérdidas productivas en las ventas de molibdeno, respecto a la diferencia generada en los compromisos de los planes de producción y los resultados reales obtenidos en las plantas de proceso.

4 Antecedentes

4.1 Base de Datos de muestras Geometalúrgicas

Con el fin de evaluar de manera precisa los recursos y reservas del yacimiento en sus planificaciones de corto y largo plazo, División Andina ha realizado diversas campañas para complementar los modelos vigentes y definir nuevos parámetros geometalúrgicos responsables de las respuestas operacionales del mineral.

4.1.1 Antecedentes Campaña 2018 [2]

Desde el año 2001 División Andina comenzó la realización de pruebas estándar de flotación rougher en cinética y tiempo fijo con el objetivo de conocer el comportamiento de la recuperación de cobre (RecCu), variable que ya se encuentra estimada en los modelos de recursos de corto y largo plazo. Esta prueba también entrega información para las recuperaciones de molibdeno (RecMo) y fierro (RecFe).

Las pruebas metalúrgicas de laboratorio se realizan en condiciones fijas y estandarizadas, lo que permite determinar las variaciones en los resultados de cada muestra, producto de los diferentes comportamientos asociados a las características geológicas de cada una.

La prueba de cinética de flotación Rougher a escala de laboratorio, utiliza en condiciones de flotación estándar muestras de 1350 gramos 18% +65# Ty, para obtener 6 concentrados parciales a diferentes tiempos de flotación, en condición estándar (1, 2, 4, 7, 11 y 16 minutos). Las condiciones de esta prueba se detallan en la Tabla 1, mientras que la celda utilizada en los ensayos de flotación (Agitair LA-500) se presenta en la Figura 2.

Tabla 1. Condiciones prueba estándar.

Parámetros Flotación	
Alimentación mineral	1350 gramos
Volumen de pulpa	2700 centímetros cúbicos
Grado de molienda	210 micrones
Cp sólidos	38% en peso
Tipo de agua	Potable
pH de flotación	10
Frecuencia de paleteo	Cada 10 segundos
Tipo de acondicionamiento	3 minutos
Cinética de flotación	1,2,4,7,11 y 16 minutos
Tiempo fijo	11 minutos
Velocidad agitación	1500 revoluciones por minuto
Flujo de aire	Criterio de flotador
Agua adicionada	Criterio de flotador
Molienda-flotación	X-23 14 gramos por tonelada MIBC 9 gramos por tonelada Diesel 6 gramos por tonelada Cal
Acondicionamiento-flotación	X-23 8 g/t MIBC 5 g/t

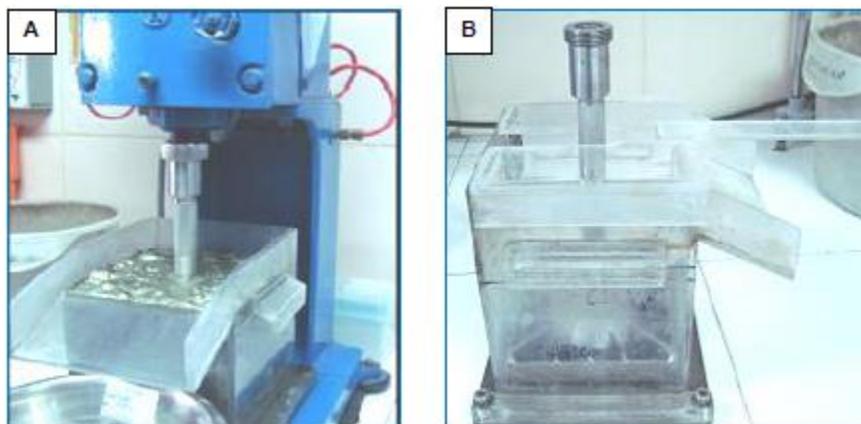


Figura 2. A: Máquina de Flotación Agitair LA-500. B: Celda de Flotación.

Del balance metalúrgico se obtienen las curvas cinéticas de recuperación y leyes acumuladas, para los elementos cobre, molibdeno y hierro, como también recuperación en peso.

De manera adicional, se realiza una prueba de flotación a tiempo fijo (11 minutos) con las mismas condiciones de la prueba cinética, con el objetivo de contar con muestras de concentrado y relave para análisis mineralógico de alta definición (Qemscan) como también para comparar los resultados de cada muestra con su respectiva prueba cinética y realizar una validación cruzada de los datos obtenidos.

En el marco de la constante entrega de información geometalúrgica para incorporar en la planificación de corto y largo plazo, se ha vuelto recomendable la caracterización in situ del comportamiento y variabilidad de la recuperación rougher de molibdeno. Por este motivo surge la necesidad de analizar estadísticamente estos datos, los que permitirían la estimación de la variable RecMo y de esta forma mejorar los modelos de planificación de recuperación de molibdeno, que actualmente se elaboran a partir de la variable ley de molibdeno.

4.1.2 Base de datos

La base de datos utilizada en esta campaña contiene la información de ensayos realizados desde el año 2001 a 2017, efectuados sobre muestras de sondaje diamantino. Dicha base de datos está constituida por 4137 muestras con información de recuperación de cobre, de las cuales 4092 cuentan con información disponible de recuperaciones de molibdeno como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen Campañas de ensayos con datos de RecMo.

Proyecto	Año															Total
	2001	2002	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Proyecto 150ktpd	476															476
Corto Plazo		16	50	47	67		35	3		36	6	3			36	299
PDA Fase I			75													75
PDA Fase II (2022-2028)									20							20
Api Cuerpos Profundos			595													595
API Sur Sur Etapas I y II				107	27											134
API Sur Sur Subt. Ing. Conceptual							120									120
API Río Blanco					160	4										164
API Captura						223										223
Cuerpos de Alta Ley										14		17				31
Sulfuros de Baja Ley										20						20
AGD Don Luis 2009-2014							136	653	147	59						995
AGD Don Luis 2015-2019									90	100	112	206	11	46		565
AGD Don Luis 2020-2024															48	48
Parillas Sur Este												10				10
Tercer Panel Minería Continua												4				4
Tercer Panel Norte												3		25		28
Tercer Panel Infeior												10	56			66
Exploración EMSA												13	25	61	10	109
Proyecto Desarrollo Futuro Andina														64	46	110
Total	476	16	720	154	254	227	291	656	237	249	118	266	92	196	140	4092

Esto debido a que ciertas muestras no disponían de información para esta variable y otras tenían problemas en el balance metalúrgico.

En el caso de las muestras con leyes de molibdeno inferior al límite de detección se utilizó el valor sin signo para efectos de balance metalúrgico y cálculo de la recuperación de molibdeno. La distribución espacial de las muestras se puede observar en la Figura 3.

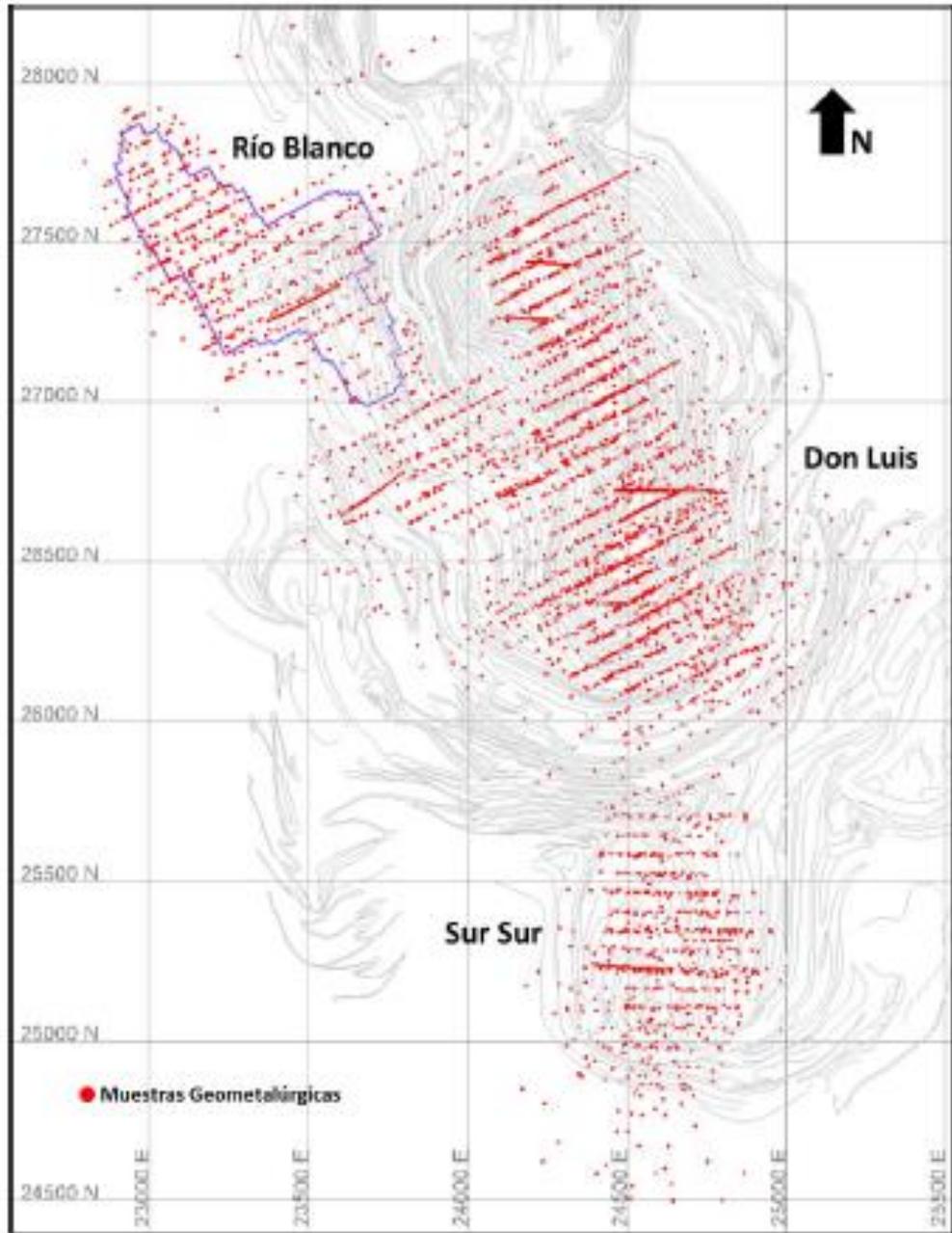


Figura 3. Plano con la Distribución de Muestras ensayadas en variable RecMo.

Al agrupar las muestras por sector, se observa que éstas están concentradas en el sector Don Luis y Rio Blanco. Esta distribución se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución de muestras por sector.

Sector	Año																Total
	2001	2002	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017		
Río Blanco	131	7	248	15	149	98	22	163	27	110	51	125	56	70	88	1360	
Don Luis	146	9	305	14	60	94	149	493	210	139	63	138	36	125	52	2033	
Sur Sur	199		167	125	45	35	120				4	3		1		699	
Total	476	16	720	154	254	227	291	656	237	249	118	266	92	196	140	4092	

La longitud muestreada en sondeos ha sido variable entre 2 hasta 50 metros con un promedio de 15.2 metros.

Como se observa en la Figura 4, la mayoría de las muestras tienen una longitud entre 12 y 16 metros, criterio que corresponde al actual estándar de muestreo.

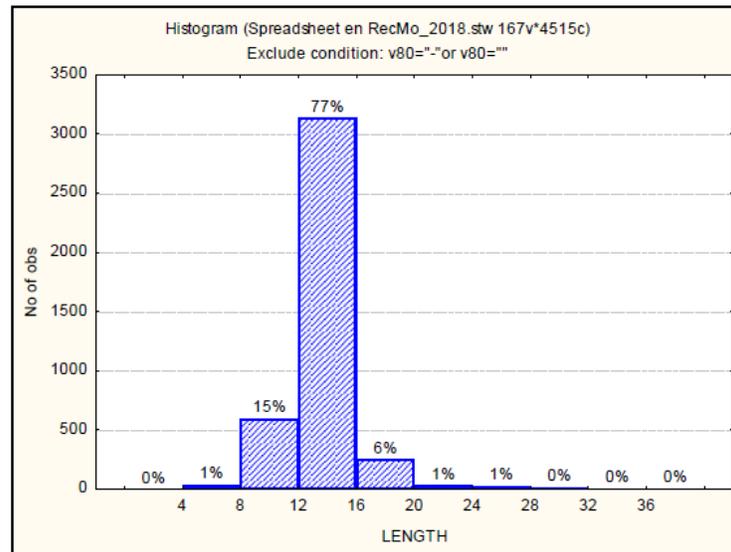


Figura 4. Histograma de longitud de muestras con información de recuperación de molibdeno.

4.1.3 Análisis estadístico [3]

Se realizó un análisis estadístico de la variable recuperación de molibdeno obtenida en los ensayos de flotación cinética, analizando la distribución de los datos, análisis por sector de yacimiento, coordenada geográfica y litología.

La unidad de medida de los datos corresponde a recuperación porcentual de molibdeno. Como se observa en la Figura 5, los 4092 datos presentan una distribución normal asimétrica negativa, con una media de $65.99 \pm 17.88\%$ y valores mínimos y máximos de 4% y 99.5% respectivamente.

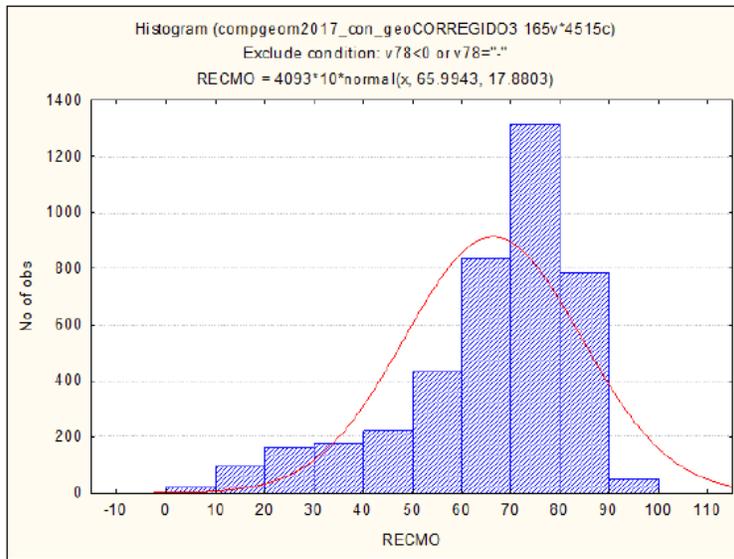


Figura 5. Histograma Recuperación de Molibdeno.

Al agrupar los datos por los 3 sectores del yacimiento se observa la misma distribución asimétrica que con los datos agrupados y una diferencia en la media de 3% de RecMo entre Río Blanco y Don Luis, tal como se aprecia en el histograma de recuperación de molibdeno por sector de la Figura 6 y en la Tabla 4.

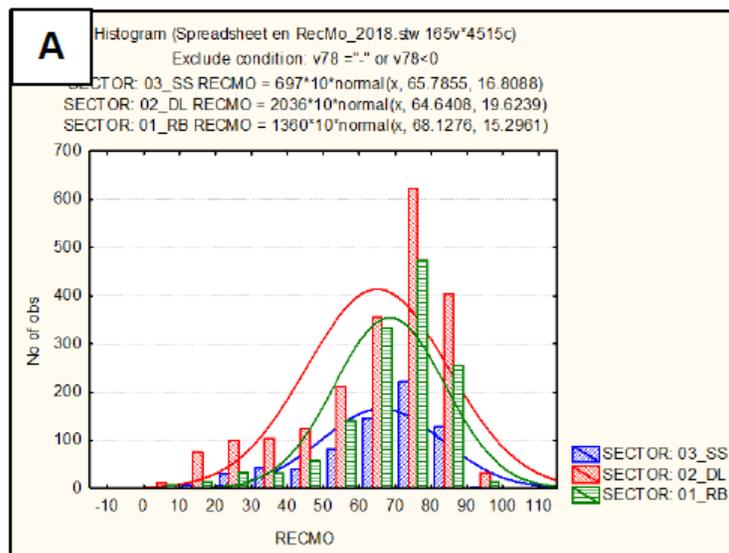


Figura 6. Histograma Recuperación de Molibdeno caracterizado por sector.

Tabla 4. Media, desviación estándar de recuperación de molibdeno por sector.

Sector	#	Media	Desvest	Mediana	Mínimo	Máximo	Coficiente Variación
01_RB	1360	68.13	15.3	71.3	4.0	98.1	22.5
02_DL	2035	64.64	19.6	70.8	5.5	99.5	30.4
03_SS	697	65.79	16.8	70.2	9.7	92.6	25.6
Total	4092	66.00	17.9	70.9	4.0	99.5	27.1

Los datos agrupados por coordenadas; norte, este y cota presentan 2 tendencias claras al analizar las medias:

- Leve disminución de las medias de recuperación de molibdeno de oeste a este (Figura 7-A), reflejando mayor valor medio de RecMo en el sector de Río Blanco.
- Disminución de las medias de recuperación de molibdeno al aumentar la cota (Figura 8-C), con las medias más altas bajo la cota 3000. Esto se puede explicar porque el molibdeno presenta mejores resultados en alteraciones tempranas donde existe un evento con molibdenita más liberada, independiente de la ley de molibdeno.

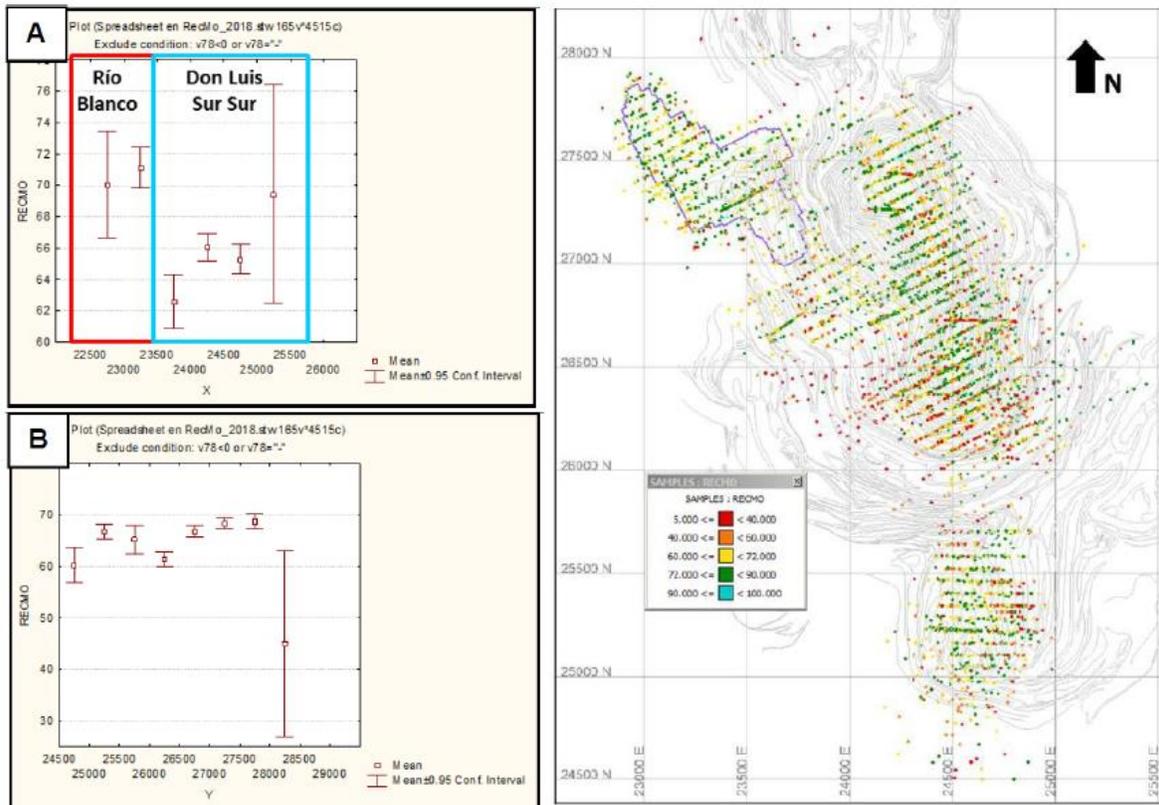


Figura 7. Mean plot variable RecMo ordenados por coordenadas. A: Coordenada Este. B: Coordenada Norte.

No se observa una tendencia clara al analizar los datos respecto a la coordenada norte (Figura 7-B), donde el valor de la coordenada 28500 presenta menores valores de recuperación dado que las muestras en esa coordenada corresponden principalmente a chimenea riolítica (CHRIOL), unidad que concentra los menores valores de recuperación de molibdeno

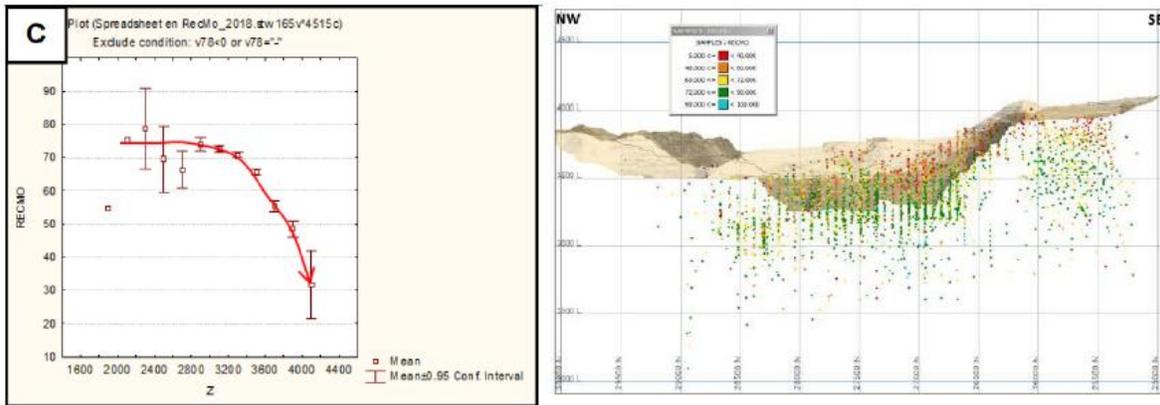


Figura 8-C: Mean plot variable RecMo por cota

Respecto a lo observado en la cota (menor media de recuperación a mayor cota), es importante destacar que este comportamiento, menor ley a mayor cota, no se replica en la ley de molibdeno tal como se observa en la Figura 9-A. Esto permite afirmar que la recuperación no solo depende de la ley de alimentación (Figura 9-B), sino de otros factores tales como grado de liberación, ocurrencia, entre otros.

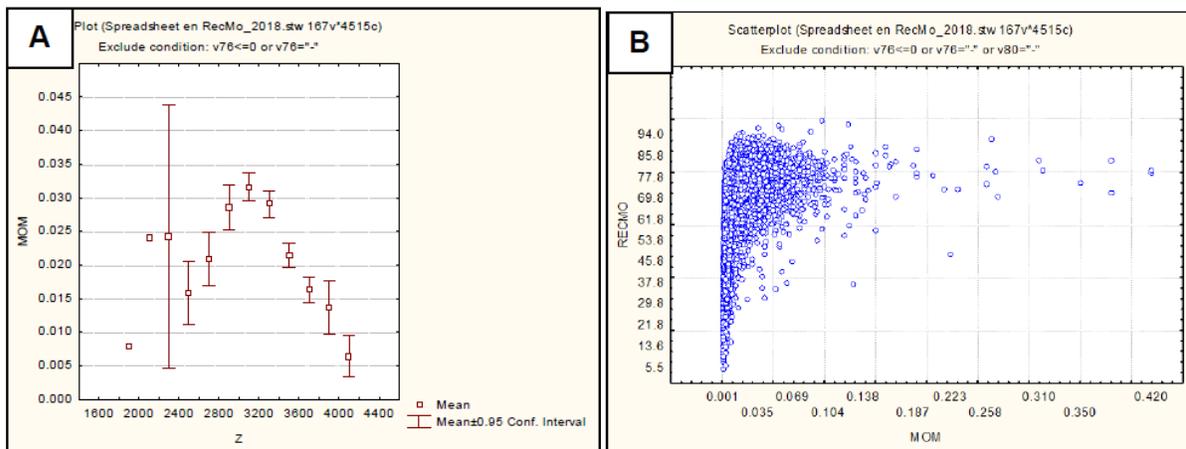


Figura 9. A: Mean plot variable Mo ordenado por cota. B: Gráfico Ley de Mo (MOM) versus Recuperación de Molibdeno

Al agrupar los datos por litología se puede apreciar que los valores más altos se encuentran asociados a las brechas de biotita (BXB) y matriz de feldespato potásico (BXS) con un promedio de 75.73% y 74.56%% respectivamente. Los valores de recuperación agrupados por litología se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Estadística básica de recuperación de molibdeno agrupado por litología.

Roca	#	Media	Desvest	Mediana	Minimo	Máximo	Coefficiente Variación
CHDAC	12	15.95	16.3	8.7	4.0	57.2	102.2
CHRIOL	13	25.11	8.1	23.9	9.3	38.0	32.3
SOB	4	28.75	12.6	34.0	10.1	36.9	43.7
BXCHRIOL	7	43.31	21.8	38.0	14.1	75.8	50.2
BXTTO	73	53.30	17.9	56.9	15.6	81.6	33.5
PDL	319	55.24	24.8	62.7	5.5	91.5	44.8
APL	2	55.55	25.4	55.6	37.6	73.5	45.7
BXTO	31	58.94	15.9	59.6	24.1	84.6	27.1
BXTAN	16	58.96	17.4	61.3	19.6	82.6	29.5
PFELD	25	59.47	21.0	64.3	6.5	89.0	35.3
BTGDCC	183	60.59	16.4	64.6	9.7	86.4	27.1
BTAN	19	61.81	15.0	64.7	16.3	84.6	24.3
AN	81	62.71	17.4	68.7	9.1	89.5	27.8
DIOR	219	64.42	20.5	71.2	15.3	94.7	31.8
BXANH	9	64.43	19.4	69.5	28.4	80.1	30.0
BXMN	74	64.46	15.0	67.8	21.1	87.2	23.3
GDCC	795	65.25	19.0	71.1	7.8	95.3	29.1
PQM	72	65.63	17.9	70.5	10.8	92.7	27.3
BXCHDAC	3	66.50	8.9	68.2	56.9	74.4	13.3
BXTGDRB	32	68.66	15.3	73.2	25.3	90.7	22.3
BXTGDCC	399	68.78	14.1	72.1	17.5	99.5	20.5
GDRB	1141	69.24	14.8	72.4	12.3	98.1	21.4
BXP	60	69.44	13.4	72.1	20.1	89.2	19.3
BXHEM	5	69.80	5.6	73.6	62.8	74.3	8.0
BXPR	313	72.24	10.2	73.7	25.1	97.0	14.2
BTGDRB	19	73.12	9.9	74.9	53.0	86.1	13.6
BXSK	77	74.56	9.8	75.1	44.0	96.5	13.1
BXB	89	75.73	10.4	78.7	39.8	88.7	13.8
Total	4092	66.00	17.9	70.9	4.0	99.5	27.1

Los valores más bajos están presentes en la chimenea dacítica (CHDAC) y riolítica (CHRIOL) con un promedio de 15.95% y 25.11% respectivamente.

En el caso de las brechas de turmalina con clastos intrusivos (BXTGDRB y BXTGDCC) presentan medias semejantes en torno al 69%, a excepción de la brecha de turmalina con clastos andesíticos (BXTAN) que tiene valores de RecMo de 58.96%.

Los pórfidos presentan los valores más altos en el cuarzomonzonítico (PMQ) con 65.65%, seguido del pórfido feldespático (PFELD) con 59.47% mientras que el más bajo se observa en el pórfido Don Luis (PDL) con 55.24%.

Finalmente la granodiorita Río Blanco (GDRB) y Cascada (GDCC) tienen medias distintas con promedio de 69.24% y 65.25% para dichas unidades. La andesita tiene recuperaciones más bajas con un valor promedio de 62.71%.

Al realizar los gráficos box plot y normal-probabilístico por litología (Figura 10 A y B respectivamente), se aprecia y confirma lo planteado anteriormente, ya que las chimeneas presentan las menores recuperaciones (y una distribución diferente de datos). Por otro lado, las brechas con matriz de biotita y feldespato potásico presentan las mayores recuperaciones de molibdeno. El pórfido Don Luis tiene una distribución que se diferencia del comportamiento de la roca de caja.

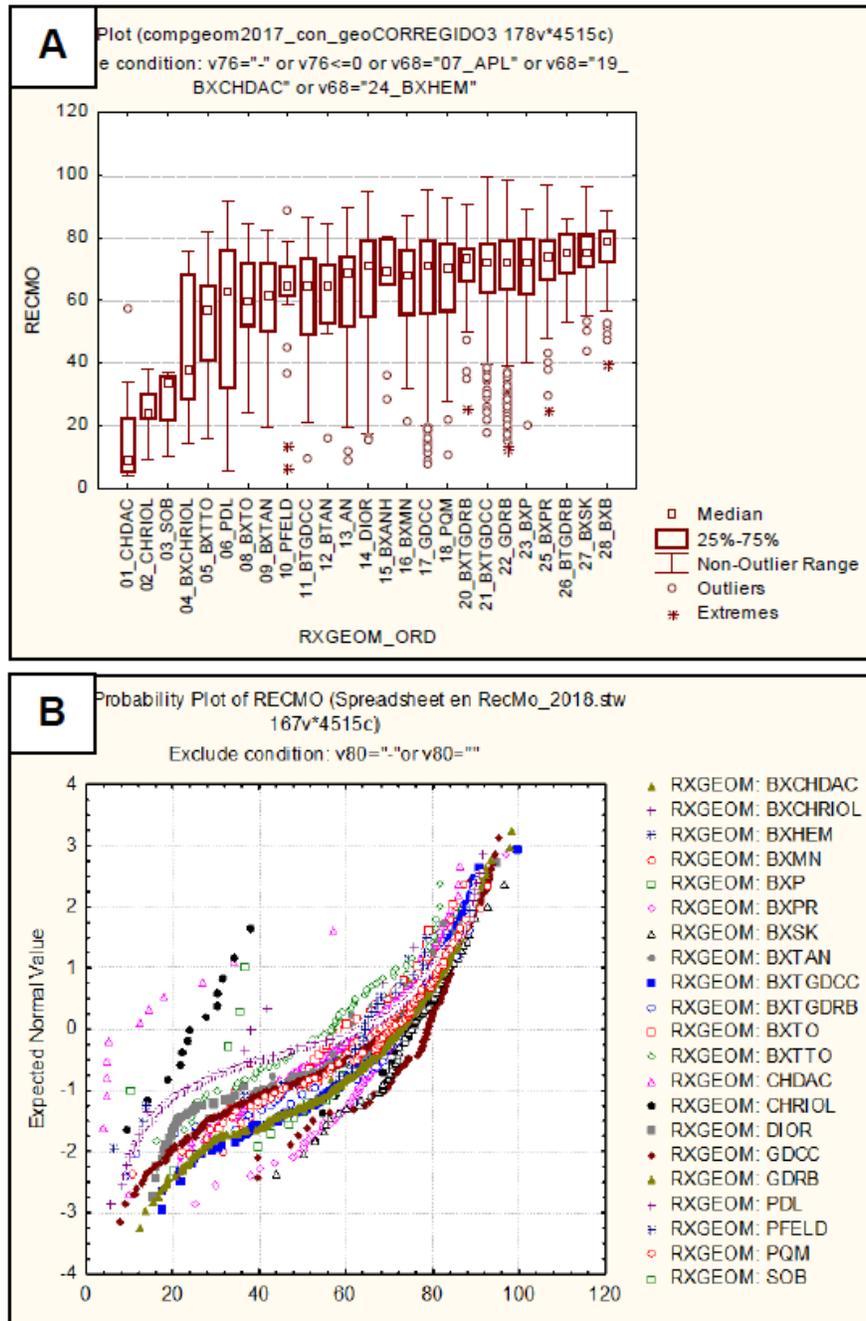


Figura 10. Variable recuperación de molibdeno agrupada por litología. A: Blox Plot. B: Normal Probabilístico.

A modo de resumen se aprecian las siguientes tendencias respecto de la recuperación de molibdeno:

- Los mayores promedios de RecMo se encuentran en las brechas con matriz feldespató potásico-biotita.
- Las unidades subvolcánicas chimeneas riolítica y dacítica (CHRIOL y CHDAC) presentan una distribución de datos distinta al resto de las unidades, junto con tener los valores más bajos de recuperación, por lo que se pueden agrupar como una UG independiente.

4.2 Recuperación de Molibdeno: Flotación Colectiva

Se realizó un estudio para identificar factores que en los últimos años provocaron una merma en la recuperación de molibdeno en la planta de flotación selectiva.

Considerando el análisis de información entre los años 2013 y 2019, se observa en primer lugar una alta variabilidad en la ley de Mo del mineral proveniente del rajo. El porcentaje de molibdeno se encuentra en valores entre 0.010 y 0.035%, con algunos valores sobre 0.040%. [4]

La recuperación in-situ primaria del mineral de molibdeno proveniente del rajo, presenta variabilidad manteniéndose en el rango del 60% a 80%, con algunos valores puntuales menores a 50%. Los registros se variable comienzan desde octubre de 2015, lo que explica la ausencia de datos hasta esa fecha en la Figura 11.

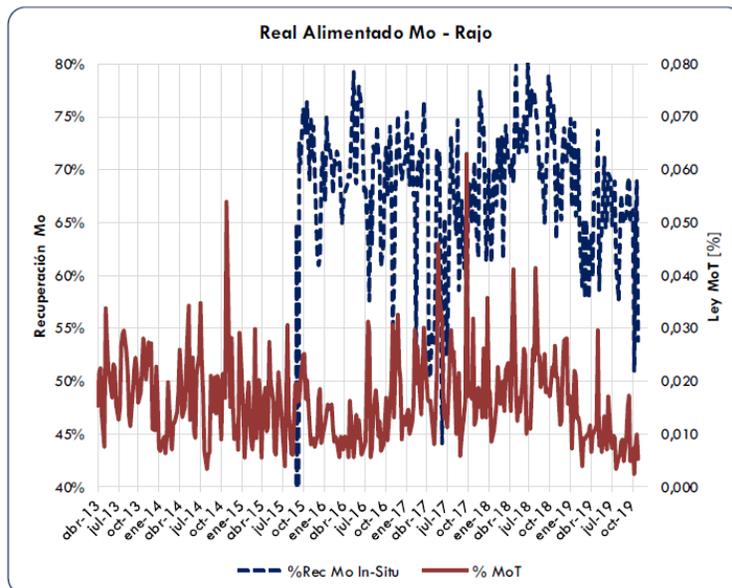


Figura 11. Gráfico ley/recuperación in-situ Mo Real Alimentado mina rajo.

Respecto al mineral proveniente de mina subterránea, se observa una baja constante de la ley de molibdeno, encontrándose en valores de 0.070 en 2014 a 0.020% en 2019. En cuanto a la recuperación in-situ, desde el periodo 2013 a 2018 se observa una baja constante, bajando desde un 70% a un 65%. Al igual que con la ley, la situación se revierte a partir de 2019, con un alza que llega hasta el 75%, siendo incluso mayor a los resultados del año 2013 como se observa en la Figura 12.

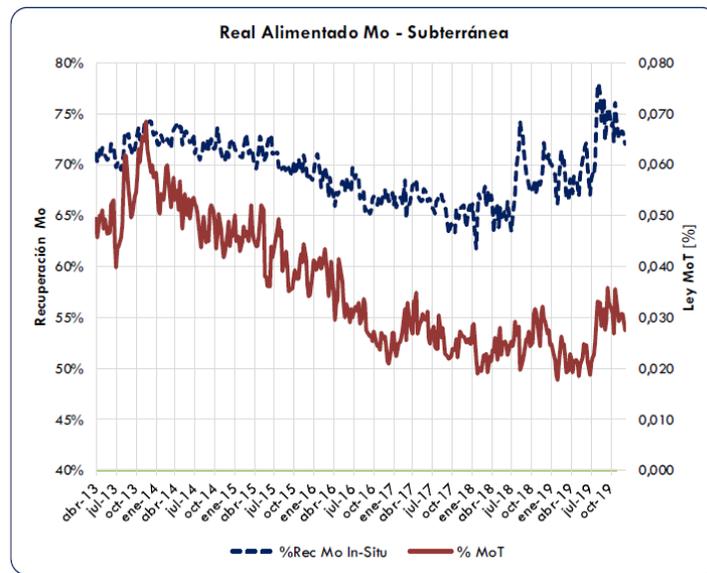


Figura 12. Gráfico ley/recuperación in-situ Mo Real Alimentado mina subterránea.

Las leyes de cobre y molibdeno de alimentación a flotación colectiva se muestran en la Figura 13. Ambas leyes han presentado una progresiva disminución desde el año 2014.

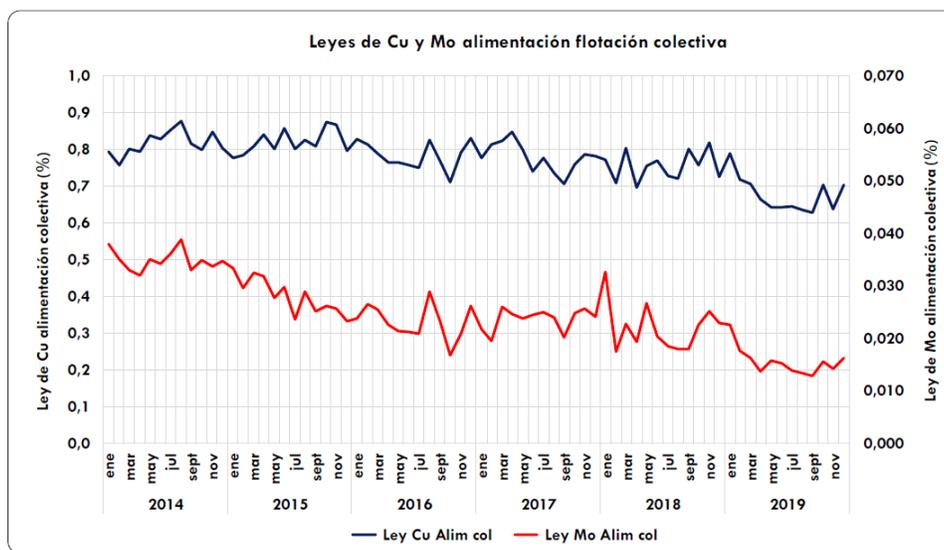


Figura 13. Leyes de alimentación flotación colectiva.

La ley de cobre ha disminuido desde 2014 a 2019 en un 13% desde 0.8% a 0.7%, mientras que la ley de molibdeno ha caído aproximadamente en un 58% desde 0.038% a 0.016%. Esta diferencia entre variaciones de leyes de mineral, repercute fuertemente en el contenido porcentual de molibdeno en el concentrado mixto, dificultando el enriquecimiento de molibdeno en la flotación selectiva.

En cuanto la calidad del concentrado mixto, la ley de cobre en este producto se ha mantenido estable en el tiempo, en torno al 28%. A su vez, la recuperación de cobre ha presentado una leve merma a partir de 2019 que coincide con una baja en la ley de cobre del mineral que alimenta a la planta. La ley de cobre del relave prácticamente no ha sufrido modificación en los últimos años, manteniéndose en un promedio de 0.10% como se observa en la Figura 14.

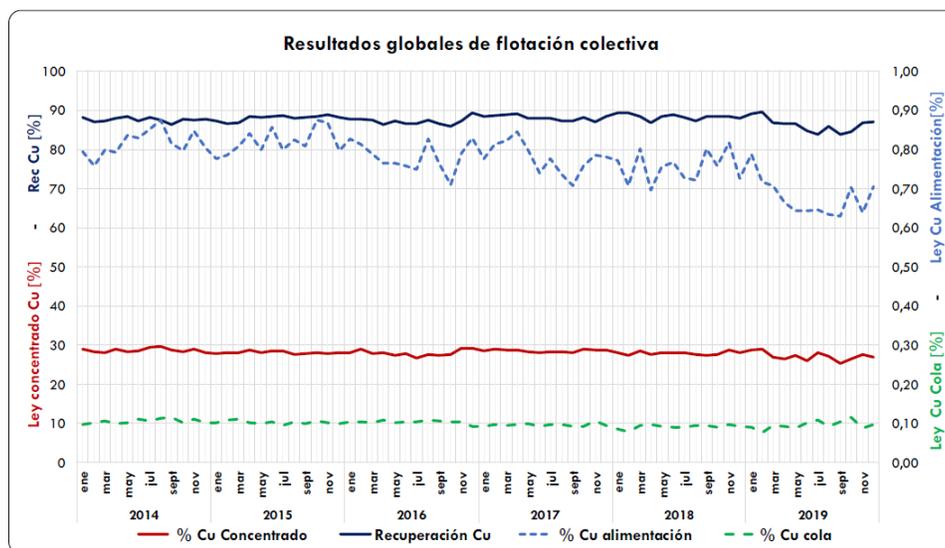


Figura 14. Rendimiento flotación colectiva.

4.3 Recuperación de Molibdeno: Flotación Selectiva

La ley de cobre en concentrado mixto se mantiene entre 27% y 29% hasta fines de 2018, para luego alcanzar mínimos cercanos al 25%. En el caso del molibdeno, la ley en concentrado mixto disminuye fuertemente desde enero de 2014 (1.16%) a diciembre de 2019 (0.46%). Durante el año 2019 se verifican varios meses con leyes incluso menores a 0.40% en la alimentación a flotación selectiva como se observa en la Figura 15.

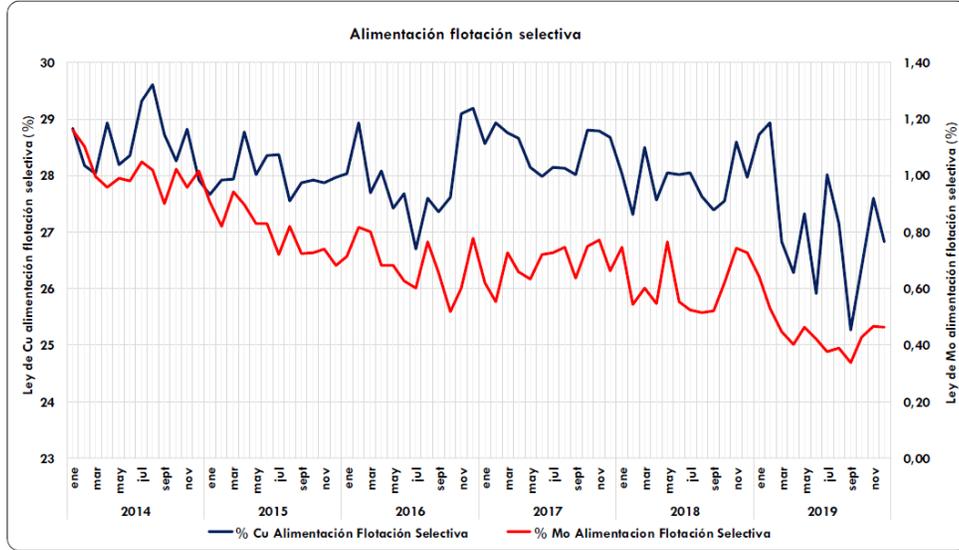


Figura 15. Ley de alimentación flotación selectiva.

En la Figura 16 se presentan los resultados de la planta de flotación selectiva. Se observa la evidente tendencia a la baja en la ley de alimentación de molibdeno (1.10% a 0.45%), en su recuperación (86% a 78%) y en la ley del concentrado final (45.4% a 39.4%).

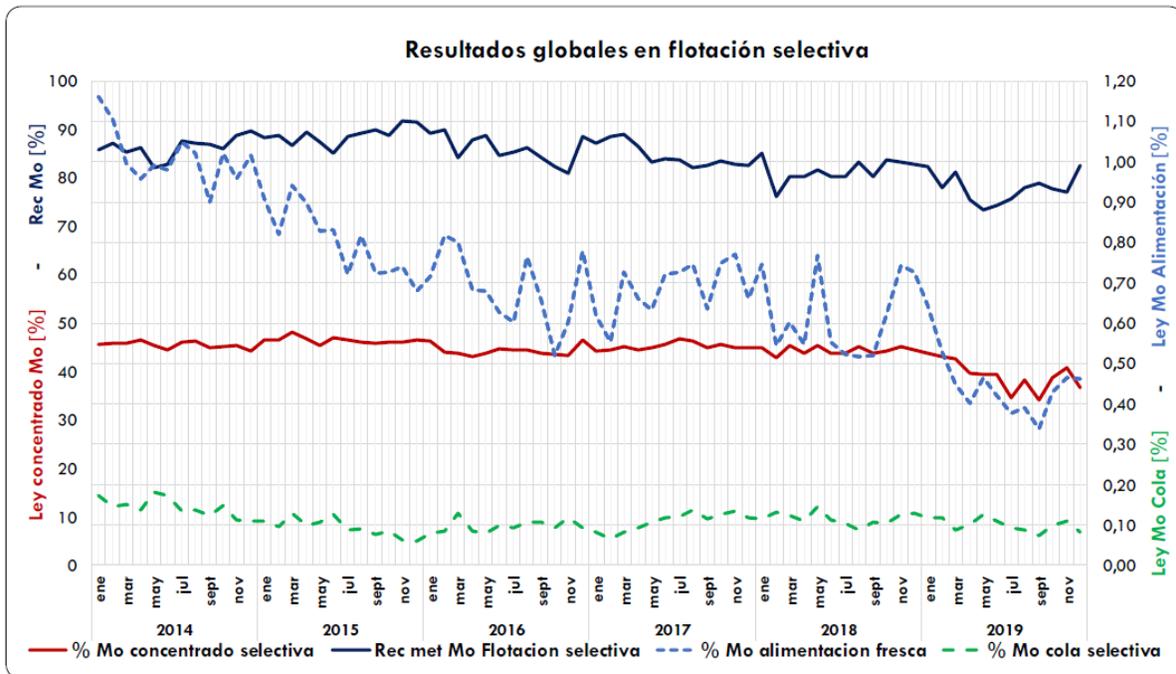


Figura 16. Resultados mensuales flotación selectiva.

Para obtener los mismos resultados de recuperación y ley de concentrado con una ley de Mo en alimentación cada vez menor, es necesario concentrar cada vez más el mineral con la misma infraestructura.

En virtud de este requerimiento, que obliga a tener factores de enriquecimiento de a lo menos el doble que se tenía el 2014, y con prácticamente las mismas etapas de limpieza, se concluye que uno de los factores en la baja de recuperación de Mo, además de los efectos anteriormente expuestos, es la menor ley de Mo en concentrado mixto.

Lo anterior es complementado con el gráfico presentado en la Figura 17, en donde se muestra cómo ha ido subiendo la exigencia de enriquecimiento para lograr un concentrado de Mo de características comerciales en la medida que ha ido disminuyendo la ley de Mo en el concentrado mixto. Los números presentes corresponden a los resultados anuales promedio, en los que se aprecia un aumento en la razón de enriquecimiento que ha ido aumentando desde 45 veces en 2014 hasta casi 90 veces en 2019.

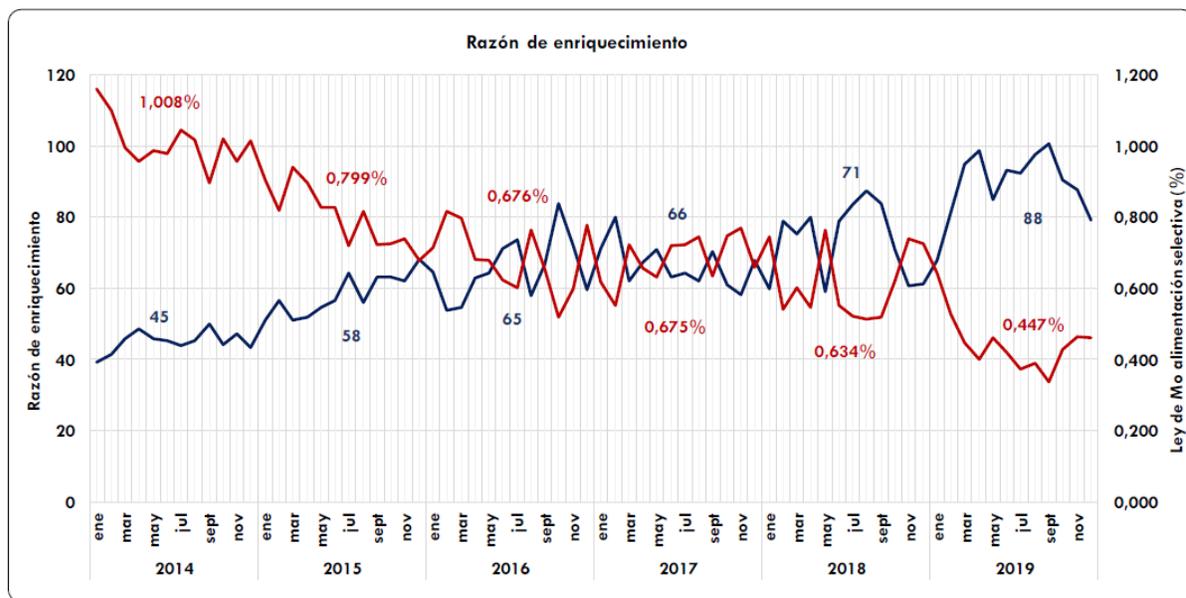


Figura 17. Razón de enriquecimiento de flotación selectiva.

4.4 Diagnóstico Planta Flotación Selectiva

4.4.1 Tratamiento y Porcentaje de sólidos (Cp)

En términos de flujo másico diario, la alimentación de concentrado mixto ha presentado un descenso continuo desde 2014, desde tratamientos en promedio de 2300 [tpd] a valores cercanos e incluso menores a 2000 [tpd].

En términos de Cp de alimentación a la planta de flotación selectiva, sólo se dispone de información hasta 2018, en lo que se puede ver que hasta comienzos de 2016 dicho valor se mantuvo alrededor de 52%.

Desde entonces dicha variable decayó fuertemente hasta alcanzar valores incluso inferiores al 40%, situándose a partir de 2018 en alrededor de 44%.

La Figura 18 muestra cómo ha variado el flujo de concentrado mixto en el tiempo, así como también el Cp en los últimos años.

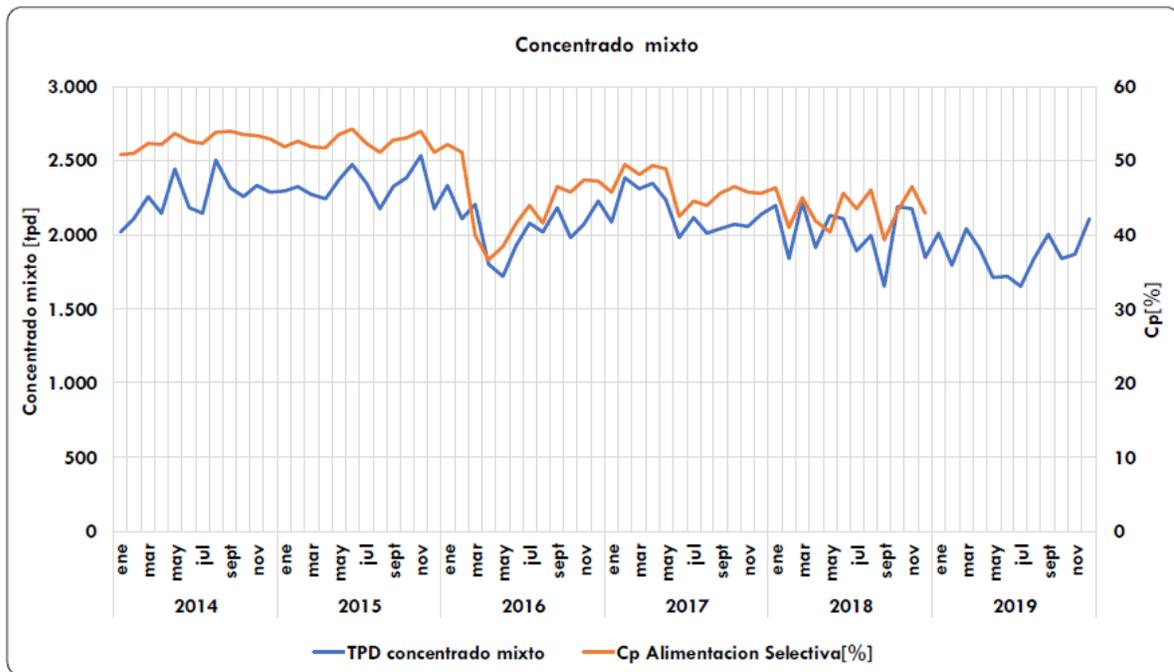


Figura 18. Tonelaje por día y concentración de sólidos en concentrado mixto.

Cabe destacar que, al no existir un espesador de cabeza en la planta de flotación selectiva, la concentración en peso de sólidos no es una variable que se pueda controlar, y por ende, afecta fuertemente el proceso de separación Cu-Mo.

4.4.2 Consumo de reactivos

Una consecuencia directa en la baja en la concentración de sólidos en peso de la alimentación a la flotación selectiva corresponde a al aumento en el consumo de Sulfhidrato de Sodio (NaSH), cuyo efecto aumenta aún más si se considera que a la alimentación a la flotación primaria selectiva se debe incorporar la recirculación de la cola de la 1° limpieza, lo que disminuye aún más el Cp del concentrado [5].

Los resultados que reporta el Respmet durante el periodo 2014-2019 de consumo de NaHS fluctúan entre 7 y 10 [kg/ton concentrado]. La planta, por otro lado, reporta consumos reales de NaHS que fluctúan anualmente entre 2 y 4 [kg/ton concentrado]. Frente a esta diferencia, se consideró la opción de únicamente analizar los diferenciales de consumo de reactivos entregados por el Respmet, tomando como base 100 el del año 2014. La Tabla 6 reporta estos resultados.

Tabla 6. Base comparativa de aumento en el consumo de NaSH periodo 2014-2019.

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Consumo relativo de NaHS a 2014 (kg/ton)	100	107	145	120	119	140

Se evidencia que el consumo de NaHS en el 2019 respecto al 2014 es de un 40% mayor. Al considerar los datos de la planta, esto implicaría un aumento del reactivo que variaría entre 0.8 a 1.6 [kg/ton concentrado].

Si se considera en promedio 2100 toneladas de concentrado mixto que ingresan por día a la flotación selectiva, significaría que al año se estarían utilizando adicionalmente entre 600 a 1200 toneladas de NaSH, con el consecuente costo adicional que esto implica. Esto a su vez se condice con la estimación de que, por cada 10 puntos que baja la concentración de sólidos, el consumo de NaSH aumenta entre 1 a 1.5 [kg/ton concentrado].

4.4.3 Grado de liberación en concentrado mixto

Para identificar el mineral de molibdeno recuperable se analizó la liberación mineralógica de las distintas especies presentes en el concentrado mixto. Utilizando información de los estudios mineralógicos (Qemscan) se asignó un ponderador de recuperación según el grado de liberación, utilizando para ello criterio experto.

Ponderadores de recuperabilidad:

- Liberado (>80%) = 94% de recuperación.
- Medio (20%-80%) = 76% de recuperación.
- Ocluido (<20%) = 36% de recuperación.

La suma de los porcentajes de liberación ponderados por los factores de recuperación, entregan como resultado una recuperación estimada de cada muestra de concentrado mixto.

Al graficar la recuperación estimada, se obtiene una tendencia a la baja en el periodo analizado (desde octubre 2016 a marzo 2019), lo cual provocaría una disminución en la recuperación de Mo de al menos 4 puntos porcentuales en la

planta de flotación selectiva (Figura 19), para un P80 en el concentrado mixto que en la práctica no ha tenido mayores variaciones.

Lo anterior implica que en los últimos años no solo ha caído el contenido de molibdenita en el concentrado mixto, sino que dicha especie ha mostrado una mayor propensión a estar ligada a otros sulfuros metálicos – básicamente calcopirita, pirita, o ambas a la vez – con el consiguiente perjuicio recuperativo al deprimir, por acción del NaSH, dichos sulfuros de Cu y Fe.

De los resultados obtenidos se puede observar que, en el transcurso del tiempo la granulometría del concentrado mixto se ha mantenido relativamente constante, pero la liberación mineralógica de molibdenita ha disminuido, perjudicando el proceso de flotación selectiva Cu-Mo [6].

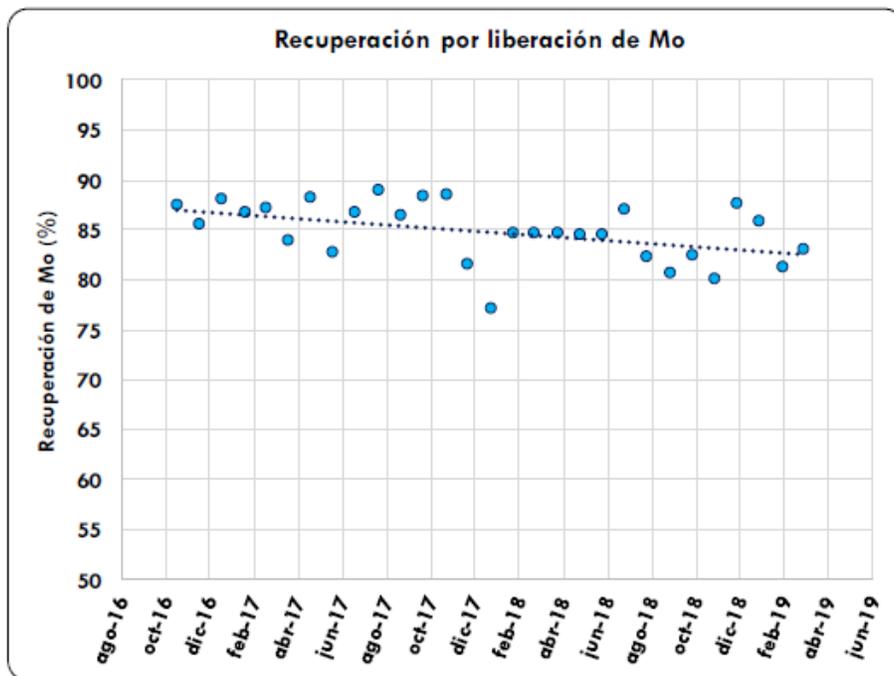


Figura 19. Liberación de Mo en concentrado mixto.

Otros estudios han analizado la granulometría de trabajo, concluyendo que la disminución del p80 no es conveniente ya que afecta directamente en el caso de negocio debido al menor tonelaje procesado.

4.4.4 Factores sobre la recuperación de molibdeno

Con base al análisis de la información expuesta, se pueden identificar principalmente tres (3) factores que influyen sobre la recuperación de Mo de la planta de flotación selectiva (Figura 20).

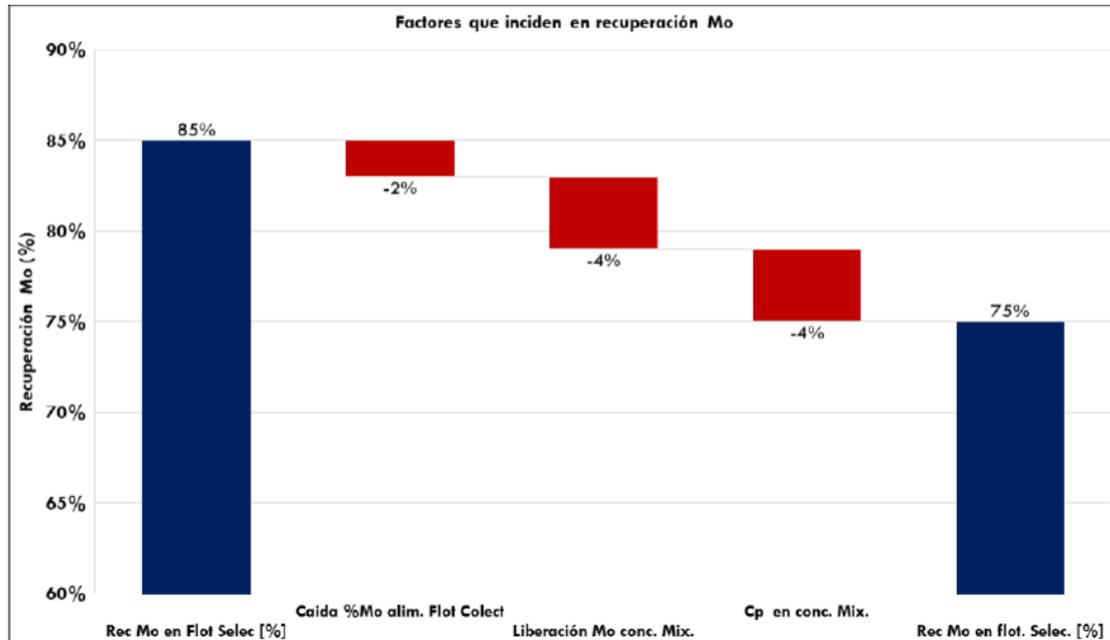


Figura 20. Factores que inciden en la recuperación de molibdeno.

- Cp en concentrado mixto: Tal como se mencionó anteriormente, se estima que una disminución de 10% en la concentración de sólidos en peso implica una disminución en la recuperación de Mo de 4 puntos porcentuales.
- Menor Liberación de Mo: De acuerdo con lo presentado en la Figura 19, se identifica una baja en la liberación del mineral de interés, provocando una disminución en la recuperación de 4 puntos porcentuales.
- Caída en ley de Mo en alimentación: La baja en la ley, implica un mayor esfuerzo de la planta para producir concentrado de la misma calidad, lo cual se traduce en una caída estimada de 2 puntos porcentuales en la recuperación de Mo.

4.5 Modelo de Recuperación de Molibdeno

El desarrollo del modelo de recuperación de molibdeno de la flotación selectiva se estructura bajo una metodología por etapas, para lo cual se requiere contar con antecedentes como información geológica-geometalúrgica, base de datos, estándares operacionales, mineralogía mensual alimentación procesos, data Courier, informes de proceso, informe planificación P0, entre otros.

4.5.1 Revisión de modelo de procesos de recuperación primaria de cobre

En una primera etapa, se considera revisar la información obtenida de las campañas geometalúrgicas llevadas a cabo por DAND durante su operación, de manera de evaluar, si es posible, la incorporación de parámetros adicionales en la estimación, como por ejemplo la recuperación másica en el caso que sea un factor determinante en el comportamiento de algunos minerales.

El desarrollo de los modelos de procesos de recuperación primaria se basa en el desarrollo de una metodología de estimación de la recuperación primaria y global industrial, que considera las siguientes variables:

- Geología del mineral alimentado a planta por períodos, en términos de UGM de flotación.
- Granulometría de alimentación del mineral a flotación (P80 de molienda).
- Ley de cabeza de Cu.
- Recuperación máxima o a tiempo infinito (R_{inf} , %) y constante cinética K (1/min), obtenidos desde las pruebas cinéticas de flotación primaria de laboratorio o desde muestreos planta (se recomienda muestreos planta).
- En el caso que la geometalurgia no considere pruebas de cinéticas de flotación primaria, se procederá a establecer el factor de escala de la recuperación primaria de laboratorio-planta.
- Destino del mineral respecto a las plantas de flotación primaria.
- Tiempo de residencia del mineral en la etapa de flotación primaria.
- Estimación del factor de escala (cinéticas primarias planta industrial / muestreo cinético industrial).
- Recuperación en función del P80.

La metodología de desarrollo del modelo de procesos que estima la recuperación primaria de Cu, se muestra en la Figura 21:

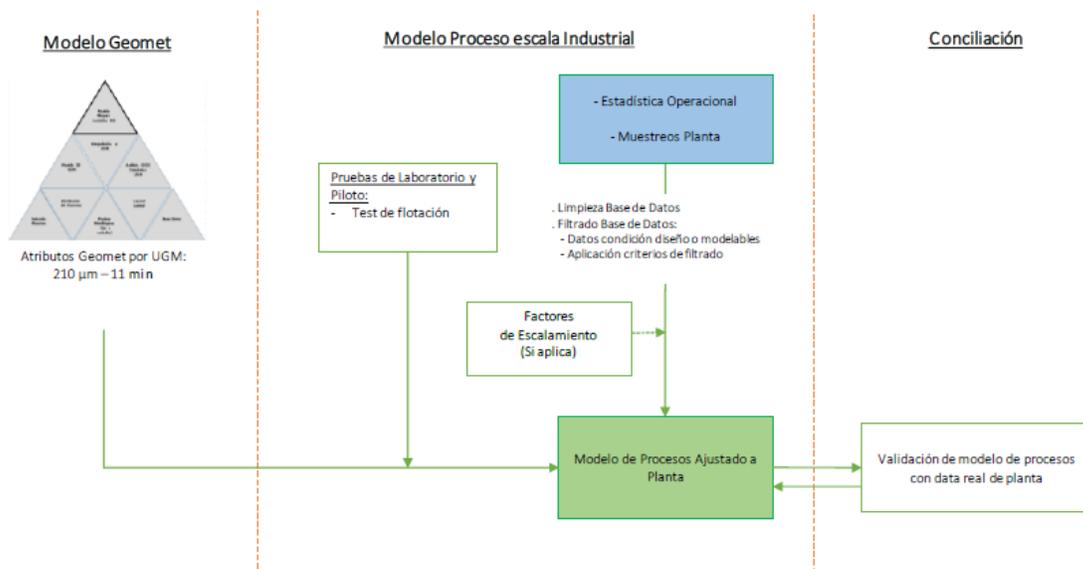


Figura 21. Metodología de predicción recuperación primaria colectiva.

4.5.2 Desarrollo modelo de procesos de recuperación colectiva de molibdeno

El desarrollo del modelo de procesos de recuperación colectiva de Mo considera construir una metodología de estimación por etapa (flotación primaria y limpieza-barrido), analizando la ley de alimentación, el grado de molienda, la ley de concentrado primario, la recuperación en peso, las estimaciones de los modelos de procesos de Cu, entre otros, correlacionando todo lo anterior con la estadística operacional y encontrando factores de ajustes en función de parámetros operacionales incidentes.

4.5.2.1 Modelo de procesos de Recuperación primaria de Mo

Antes de comenzar con el desarrollo del modelo de procesos de recuperación colectiva y selectiva de Mo, se realizará una revisión del modelo de recuperación de Cu tanto en la etapa colectiva como selectiva de manera de verificar los balances de finos y así identificar las masas, leyes y recuperaciones de cada etapa, para luego confirmar la posible metodología para estimar la recuperación de Mo en ambas plantas, tal como se ha descrito en el capítulo anterior.

Luego de realizado el análisis anterior, se considera revisar la información obtenida de las campañas geometalúrgicas llevadas a cabo por la División durante su operación, de manera de evaluar si el estándar actual de flotación primaria y etapas de limpieza de laboratorio (TCA y/o TCC) representa la variabilidad del mineral y también evaluar si es el input adecuado para el modelo de procesos a escala industrial cuyo objetivo principal es predecir de mejor forma la estimación de la recuperación de los elementos de interés de los planes de producción en distintas condiciones de operación.

El desarrollo de los modelos de procesos de recuperación primaria se basa en el desarrollo de una metodología de estimación de la recuperación primaria y global industrial.

- Geología del mineral alimentado a planta por períodos, en términos de UGM de flotación.
- Granulometría de alimentación del mineral a flotación (P80 de molienda).
- Ley de cabeza de Mo.
- Recuperación máxima o infinita (R_{inf} , %) y constante cinética K (1/min), obtenidos desde las pruebas cinéticas de flotación primaria de laboratorio o desde muestreos planta (se recomienda muestreos planta).
- En el caso que la geometalurgia no considere pruebas de cinéticas de flotación primaria, se procederá a establecer el factor de escala de la recuperación primaria de laboratorio-planta.
- Destino del mineral respecto a las plantas de flotación primaria.
- Tiempo de residencia del mineral en la etapa de flotación primaria.
- Estimación del factor de escala (cinéticas primarias planta industrial / muestreo cinético industrial).
- Recuperación en función del P80.
- Pruebas metalúrgicas TCA y TCC.
- Estadística operacional de a lo menos dos años de operación.

4.5.2.2 Modelo de procesos de Recuperación limpieza-barrido de Mo

Por otra parte, se considera la revisión del modelo de recuperación de la etapa de limpieza-barrido para el Mo, analizando principalmente la información estadística de planta en donde, se revisarán las distintas posibilidades de correlación entre la recuperación obtenida en el circuito de limpieza, con distintos rangos de ley de Cu y/o Mo en la alimentación como también analizando el efecto de la recuperación en peso obtenida en el circuito de flotación primaria para distintos tipos de mineral [7].

Además, se revisará el comportamiento operacional de la etapa de limpieza-barrido de manera de detectar posibles efectos provenientes directamente de la operación lo cual también podría impactar en el rendimiento de esta etapa, como por ejemplo distintos niveles de recuperación en peso producto de una condición extrema de la operación, tal como sucede en otras faenas.

4.5.2.3 Desarrollo modelo de procesos de recuperación de molibdeno flotación selectiva

La metodología considera un análisis exhaustivo de la estadística operacional de esta etapa, de manera de identificar parámetros operacionales que den cuenta del comportamiento de la recuperación selectiva de Mo.

5 Desarrollo

5.1 Caracterización Geometalúrgica

5.1.1 Ensayos de laboratorio muestras campaña 2019

Con el propósito de incorporar variables de comportamiento geometalúrgico en el modelo de bloques del yacimiento, como el Work Index (kWh/tc) para molienda de bolas (BWi), minutos de Starkey para molienda de bolas y recuperación metalúrgica rougher de cobre (RecCu) y molibdeno (RecMo) se realizó un programa de pruebas con muestras de mineral de la campaña 2019.

Estas pruebas se han realizado a partir de muestras discretas (no continuas) en sondajes diamantino, espaciadas alrededor de 30 metros a lo largo de estos para completar una malla del orden de 60 metros.

A partir del año 2008, el muestreo geometalúrgico se ha efectuado en forma sistemática a un soporte regularizado de longitud de 16 metros para obtener una masa de 30 a 40 kilos. Se exceptúan aproximadamente 300 muestras ensayadas a un soporte de 6 metros para Bond y Starkey.

El criterio de selección de muestras se ha orientado a tramos de sondajes con características monolitológicas, de similar tipo e intensidad de mineralización y alteración relativamente homogéneas en el intervalo de muestreo.

Las pruebas metalúrgicas del laboratorio se realizan en condiciones fijas y estandarizadas, por lo que las variaciones en los resultados son producto del comportamiento diferente frente a características geológicas propias de las muestras.

En las pruebas de flotación rougher, los parámetros fijados fueron los siguientes:

- Granulometría de molienda
- Tipo y dosificación de reactivos de flotación
- Porcentaje de sólidos de las etapas de flotación
- Tiempo de residencia del material en las celdas
- pH y temperatura de la pulpa
- Aireación y acondicionamiento de la pulpa
- Calidad del agua utilizada en el proceso

5.1.2 Base de datos de muestras geometalúrgicas

5.1.2.1 Base de datos Recuperación Rougher de Molibdeno

Al igual que en la recuperación de cobre, la base de datos de Recuperación Rougher de Molibdeno está constituida por 4438 datos, incorporando los 200 ensayos realizados el año 2019 como se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Resumen Campañas de Ensayos de Rec Mo

Proyecto	Año																		Total
	2001	2002	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019		
Proyecto 150 ktpd	476																	476	
Corto Plazo		16	50	47	67		35	3		36	6	3			36			299	
PDA Fase I			75															75	
PDA Fase II (2022-2028)										20								20	
API Cuerpos Profundos			595															595	
API Sur Sur Etapas I y II				107	27													134	
API Sur Sur Subt. Ing. Conceptual							120											120	
API Río Blanco					160	4												164	
API Captura						223												223	
Cuerpos Alta Ley										14		17						31	
Sulfuros de Baja Ley										20								20	
AGD Don Luis 2009-2014							136	653	147	59								995	
AGD Don Luis 2015-2019									90	100	112	206	11	46				565	
AGD Don Luis 2020-2024															48	63	200	311	
Parillas Sur-Este													10					10	
Tercer Panel Minería Continua													4					4	
Tercer Panel Norte													3		25			28	
Tercer Panel Inferior													10	56				66	
Exploración EMSA													13	25	61	10	5	114	
Proyecto Desarrollo Futuro Andina															64	46	23	133	
Profundo y Marginal																	38	38	
Don Luis Subterráneo																	17	17	
Total	476	16	720	154	254	227	291	656	237	249	118	266	92	196	140	146	200	4438	

La distribución del total de las muestras históricas y de las nuevas muestras 2019 se indica en la Figura 22 mientras que la cantidad de muestra de RecMo por sector se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Distribución de Muestras de RecMo por sector.

Sector	Año Prueba Metalúrgica Recuperación Rougher Mo																		Total	Proporción
	2001	2002	2004	2005	2006	2007	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019			
Río Blanco	131	7	248	15	149	98	22	163	27	110	51	125	56	70	88	45	22	1427	32%	
Don Luis	148	9	305	14	60	94	149	493	210	139	63	138	46	115	52	96	158	2289	52%	
Sur Sur	197		167	125	45	35	120				4	3		1		5	20	722	16%	
Total	476	16	720	154	254	227	291	656	237	249	118	266	102	186	140	146	200	4438	100%	

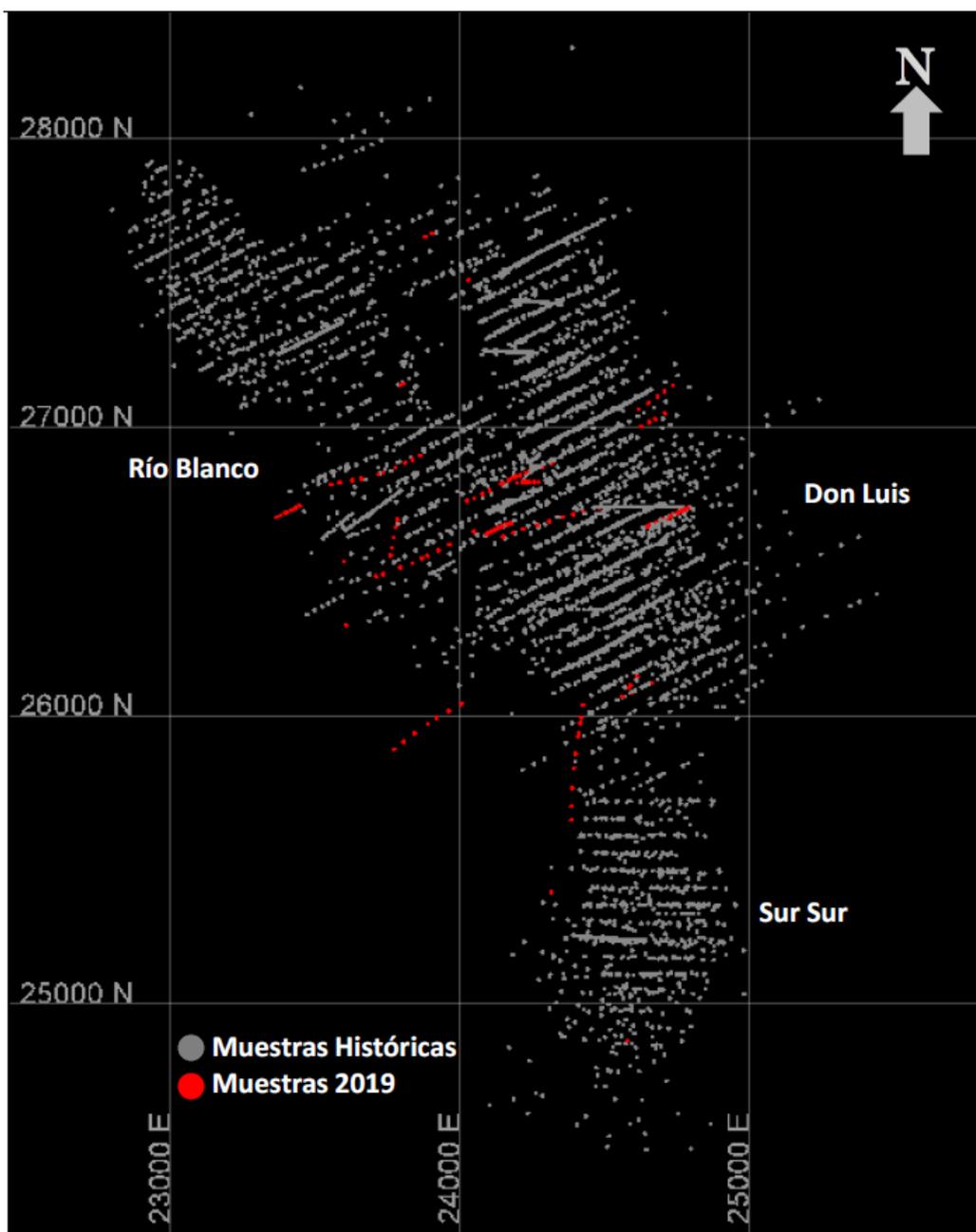


Figura 22. Plano con la Distribución de muestras ensayadas por %RecMo.

La longitud muestreada en sondajes ha sido variable entre 4 hasta 50 metros con un promedio de 15.3 metros. La mayoría de las muestras tiene una longitud de 16 metros, tal como se puede apreciar en el histograma de distribución de la variable longitud en la Figura 23:

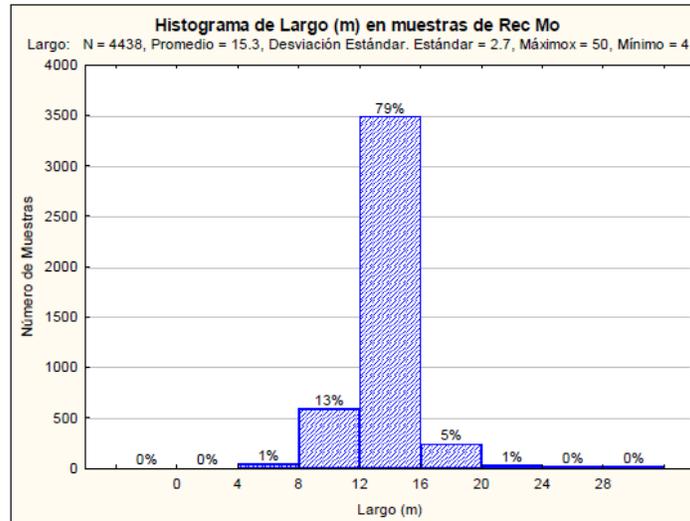


Figura 23. Histograma de Longitud de Muestras RecMo

5.1.3 Antecedentes mineralógicos y mapeo geológico

5.1.3.1 Análisis mineralogía QEMSCAN [8]

Con el objetivo de estudiar el control geológico de la variable recuperación de molibdeno, se analizó el comportamiento frente a la alteración mapeada, además de la mineralogía QEMSCAN disponible en 2193 muestras (54% del total).

Los antecedentes mineralógicos QEMSCAN de la Figura 24 y Figura 25 entregan algunas tendencias claras:

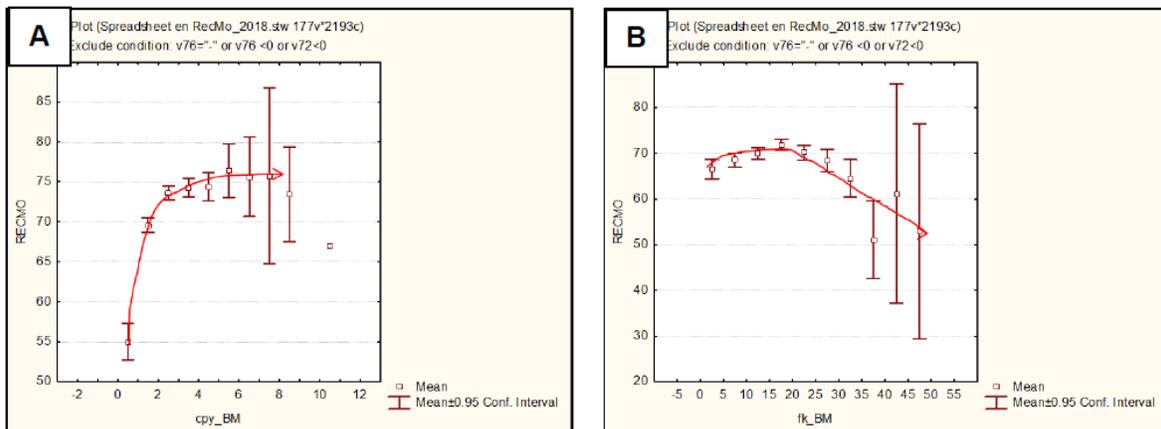


Figura 24. Gráficos mean plot variable recuperación de molibdeno quebrado por contenido mineralógico. A: Calcopirita. B: Feldespato potásico.

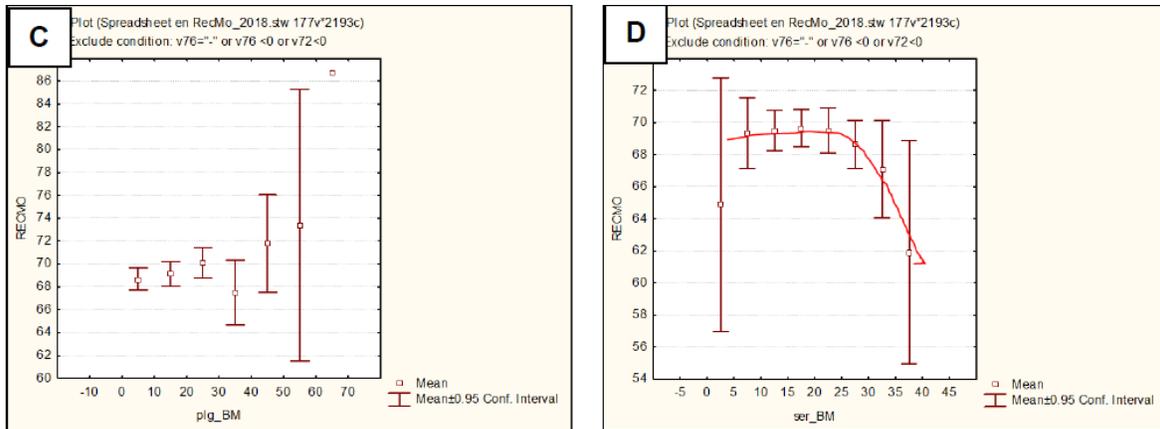


Figura 25. Gráficos mean plot variable recuperación de molibdeno quebrado por contenido mineralógico. C: Plagioclasa. D: Sericita.

1.- Disminución de las recuperaciones de molibdeno al aumentar los contenidos de feldespato potásico y sericita (valores absolutos). Se debe considerar que los minerales son medidos al total de la roca sin diferenciar mineral de alteración respecto al mineral primario o formador de roca, por lo que el aumento de sericita y su disminución de recuperación se puede atribuir a la presencia de alteración más rica en dicho mineral (cuarzo sericita/sericita gris), mientras que la disminución de recuperación por aumento de feldespato potásico se puede atribuir más a la roca que a la alteración (pórfidos tienen menos recuperación de molibdeno que rocas asociadas a la alteración potásica BXB,BXSK)

2.- Aumento de la recuperación de molibdeno al aumento de la calcopirita y plagioclasa (valores absolutos).

El otro parámetro obtenido de los datos mineralógicos a analizar, corresponde al grado de liberación de las partículas que contienen molibdeno (a un P80 210 μm) como se observa en las Figura 26 y Figura 27.

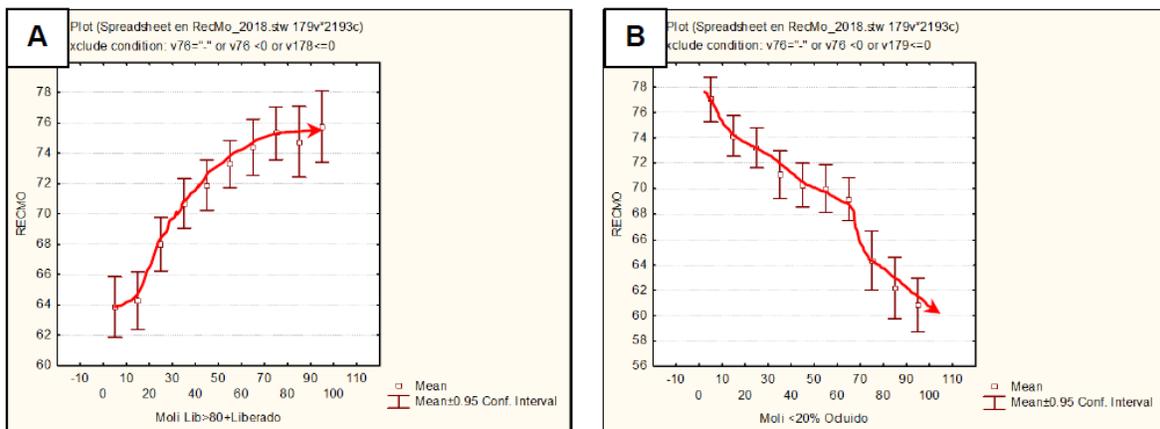


Figura 26. Recuperación de molibdeno versus grado de liberación molibdenita. A: >80% molibdenita liberada. B: <20% molibdenita liberada.

Se observa de manera clara y continua un aumento de la recuperación de molibdeno a medida que aumenta la liberación de molibdenita, mientras que la recuperación disminuye al aumentar la molibdenita ocluida.

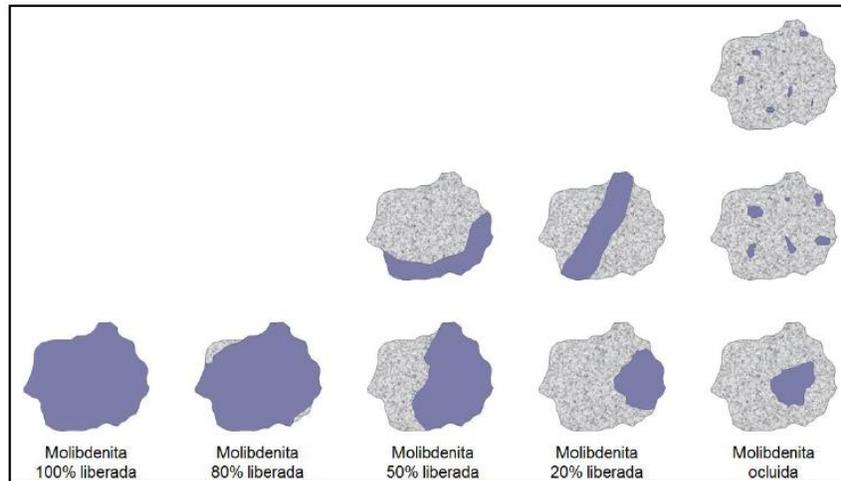


Figura 27. Ejemplo del Grado de liberación a un mismo P80. Para un mismo tamaño de partícula los sulfuros gruesos (en cúmulos o vetas) son liberados y una mineralización fina (diseminado) se aprecia ocluida (modificado de Martínez C., 2017).

5.1.3.2 Análisis por alteración mapeada

Luego de observar estas tendencias, se realizó el *box plot* de recuperación de molibdeno agrupados por la alteración mapeada (Figura 28 y Tabla 9), en aquellas muestras con información disponible (2661 datos), donde se aprecian mayores recuperaciones en las alteraciones tempranas potásica y sericita gris verde (Bt>FK, SGV>FK-Bt, SGVf, FK>Bt, SGVm).

Las alteraciones tardías y fondos concentran los valores más bajas (SG, QS, FBt-CI y FAIb (Tu-Esp)).

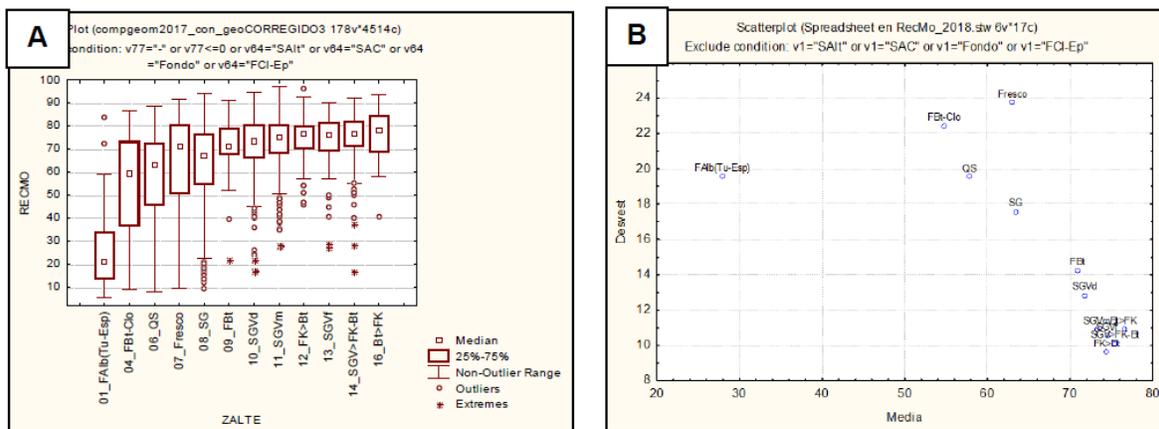


Figura 28. Recuperación de molibdeno quebrado por alteración mapeada. A: Gráfico box plot. B: Gráfico media versus desviación estándar, descartando alteraciones con menos de 15 datos.

Tabla 9. Estadística básica recuperación molibdeno agrupado por alteración mapeada.

Alteración	#	Media	Desvest	Mediana	Mínimo	Máximo	Coefficiente Variación
FAIb(Tu-Esp)	29	27.99	19.6	20.9	5.5	83.7	70.0
SAIt	15	29.25	10.6	28.3	14.6	57.2	36.2
FCI-Ep	10	54.53	19.7	58.3	9.0	79.1	36.1
FBt-Clo	62	54.81	22.4	59.7	8.7	86.7	40.9
SAC	4	56.63	20.4	62.6	27.8	73.6	36.1
QS	393	57.81	19.5	62.9	8.0	88.9	33.8
Fresco	63	63.02	23.7	71.3	9.3	91.5	37.7
SG	688	63.44	17.6	67.5	9.1	94.3	27.7
FBt	30	70.93	14.2	71.3	22.0	91.1	20.1
SGVd	361	71.72	12.8	73.7	16.5	94.7	17.9
SGVm	438	73.19	10.9	74.8	27.6	97.0	14.9
FK>Bt	82	74.44	9.6	76.4	45.8	96.5	12.9
SGVf	152	74.45	10.6	76.1	26.9	90.4	14.2
SGV>FK-Bt	272	75.42	10.1	76.8	16.6	92.2	13.4
Fondo	4	75.90	5.7	77.1	68.0	81.5	7.5
Bt>FK	58	76.47	10.9	78.0	40.7	93.5	14.3
Total	2661	67.08	17.4	71.8	5.5	97.0	25.9

Al analizar la mineralización mapeada (Figura 29, Figura 30 y Tabla 10) se puede apreciar que las mayores recuperaciones se aprecian en las zonas con calcopirita dominante, a excepción de la zona Cpy>Py-(Bo-SSCu), mientras que los valores medios de recuperación más bajos en las zonas piríticas; esto se correlaciona con las zonas de alteración, dado que las zonas con calcopirita dominante son controladas por las asociaciones de alteración tempranas.

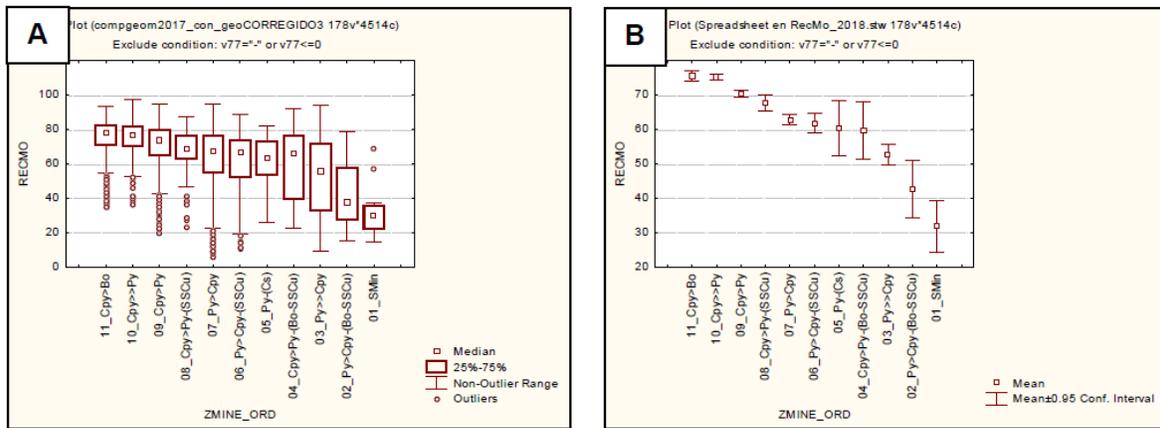


Figura 29. Recuperación molibdeno por zona mineral mapeada. A: Box Plot. B: Mean Plot. C: Media vs desviación estándar. D: gráfico normal probabilístico.

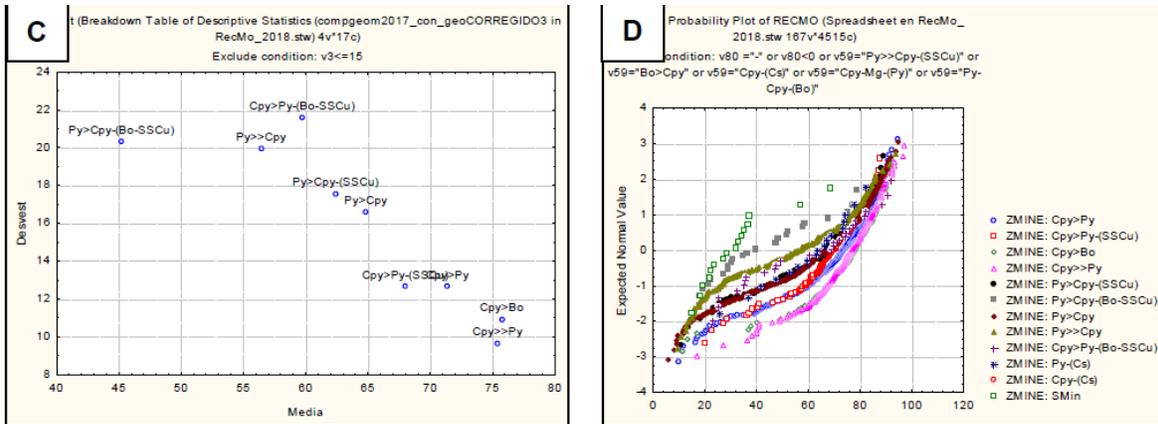


Figura 30. Recuperación molibdeno por zona mineral mapeada. C: Media vs desviación estándar. D: gráfico normal probabilístico.

Tabla 10. Estadística básica recuperación molibdeno agrupado por mineralización mapeada.

Mineralización	#	Media	Desvest	Mediana	Minimo	Máximo	Coefficiente Variación
SMin	16	31.70	14.2	30.1	14.6	68.4	44.6
Py>Cpy-(Bo-SSCu)	26	42.57	20.7	37.8	14.9	78.7	48.6
Py>>Cpy	215	52.70	21.9	55.6	9.1	93.7	41.5
Cpy>Py-(Bo-SSCu)	28	59.70	21.6	66.2	22.5	91.7	36.1
Py-(Cs)	17	60.35	15.4	63.3	25.5	81.8	25.6
Py>Cpy-(SSCu)	163	61.80	18.0	66.5	10.8	88.9	29.1
Py>Cpy	624	62.70	18.6	67.3	5.5	94.3	29.6
Cpy>Py-(SSCu)	135	67.67	13.1	69.0	20.1	87.4	19.4
Cpy>Py	720	70.37	14.2	73.3	9.7	94.7	20.1
Cpy>>Py	437	75.16	10.3	76.3	16.6	97.0	13.7
Cpy>Bo	264	75.52	11.6	77.6	11.0	93.5	15.3
All Grps	2645	67.08	17.4	71.8	5.5	97.0	26.0

Otro parámetro obtenido del mapeo, corresponde a la cantidad de vetillas A y B normalizado cada 2 metros, donde se observa un leve aumento de las media y mediana de las recuperaciones de molibdeno al aumentar la densidad de estas vetillas (Figura 31-A y B respectivamente).

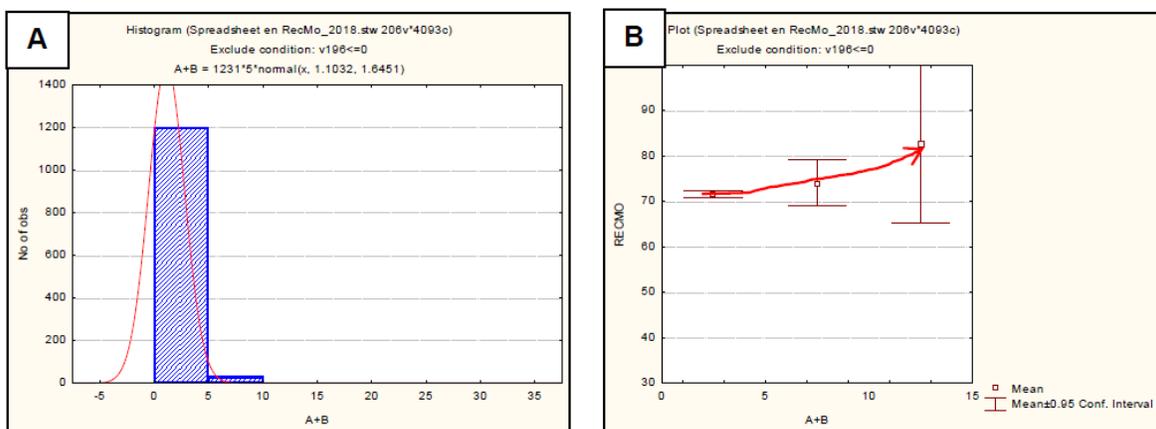


Figura 31. Análisis RecMo respecto a la cantidad de vetillas A y B por metros. A: Histograma. B: Mean plot.

5.1.4 Definición de unidades geometalúrgicas RecMo [9]

5.1.4.1 Consideraciones y análisis

A modo de resumen se aprecian las siguientes tendencias respecto de la recuperación de molibdeno:

- Disminución de la RecMo a mayores elevaciones (cota).
- Los mayores promedios de RecMo se encuentran en las brechas con matriz feldespato potásico-biotita (brechas tempranas).
- Las unidades subvolcánicas chimeneas riolítica y dacítica (CHRIOL y CHDAC) presentan una distribución de datos distinta al resto de las unidades, junto con tener los valores más bajos de recuperación, por lo que se pueden agrupar como una UG independiente.
- Aumento de RecMo con aumento de calcopirita (Qemscan, base mineral), coincidente con zonas de mineralización donde domine calcopirita relativo a piritita (información mapeo).
- Mayores valores de RecMo en alteraciones tempranas (potásica y sericita gris verde) respecto a alteraciones tardías (sericita gris y cuarzo sericita).
- Relación directa entre el grado de liberación de la molibdenita >80% y RecMo.

Una buena opción para la definición de unidades geometalúrgicas es la utilización de las UGMRecCu (Figura 33) teniendo en cuenta que:

- Los actuales modelos de corto plazo y largo plazo no consideran zonas de alteración y mineralización, sólo considera unidades litológicas, superficies de limonitas y techo de sulfato.
- Las UGMRec son unidades horizontales definidas principalmente por su ubicación respecto del techo de sulfatos (Figura 32) y el piso de limonitas, donde se podrían separar las recuperaciones más bajas en las cotas superiores del yacimiento versus las mejores recuperaciones en los niveles inferiores.
- Las unidades subvolcánicas chimenea riolítica y dacítica (CHRIOL y CHDAC) presentan las más bajas recuperaciones, con una distribución de datos completamente distintos a las otras UGMREC.
- Las alteraciones más tempranas (potásica y de mezcla) coinciden espacialmente también con la roca primaria, mientras que las alteraciones cuarzo sericítica y sericita gris se desarrollan en roca secundaria, por lo que el control por alteración queda cubierta por ese lado (Figura 34 y Figura 35).
- La variabilidad dentro de cada UGM se explica por el grado de liberación de la molibdenita (Figura 36).

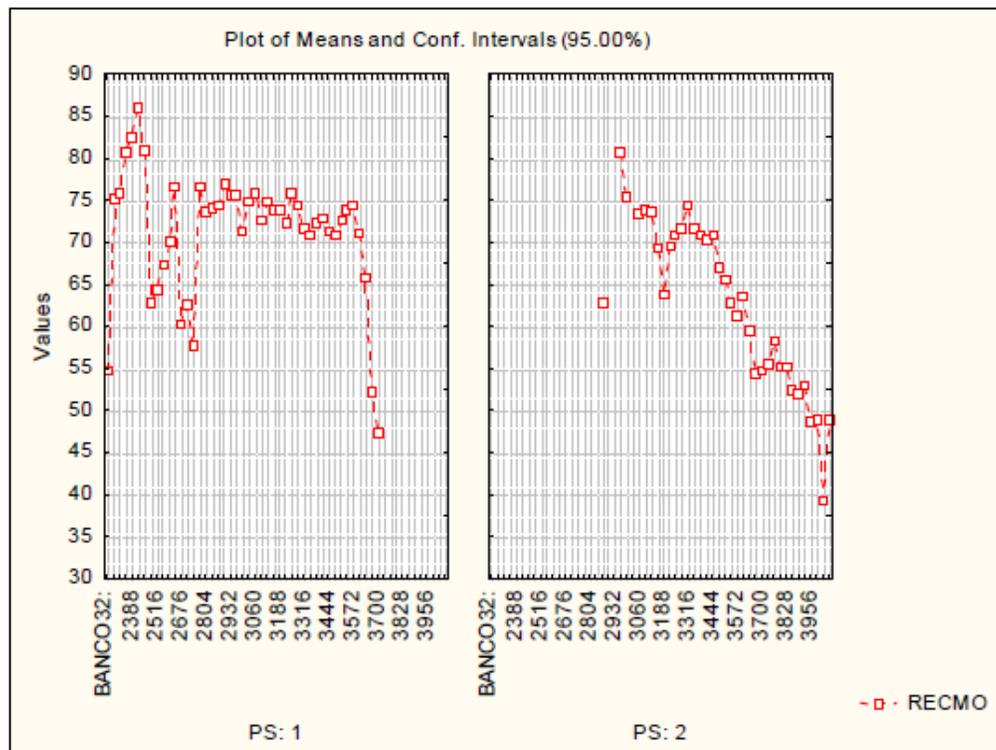


Figura 32. Recuperación Molibdeno por elevación (normalizado cada 32 metros) quebrado por primario-secundario.

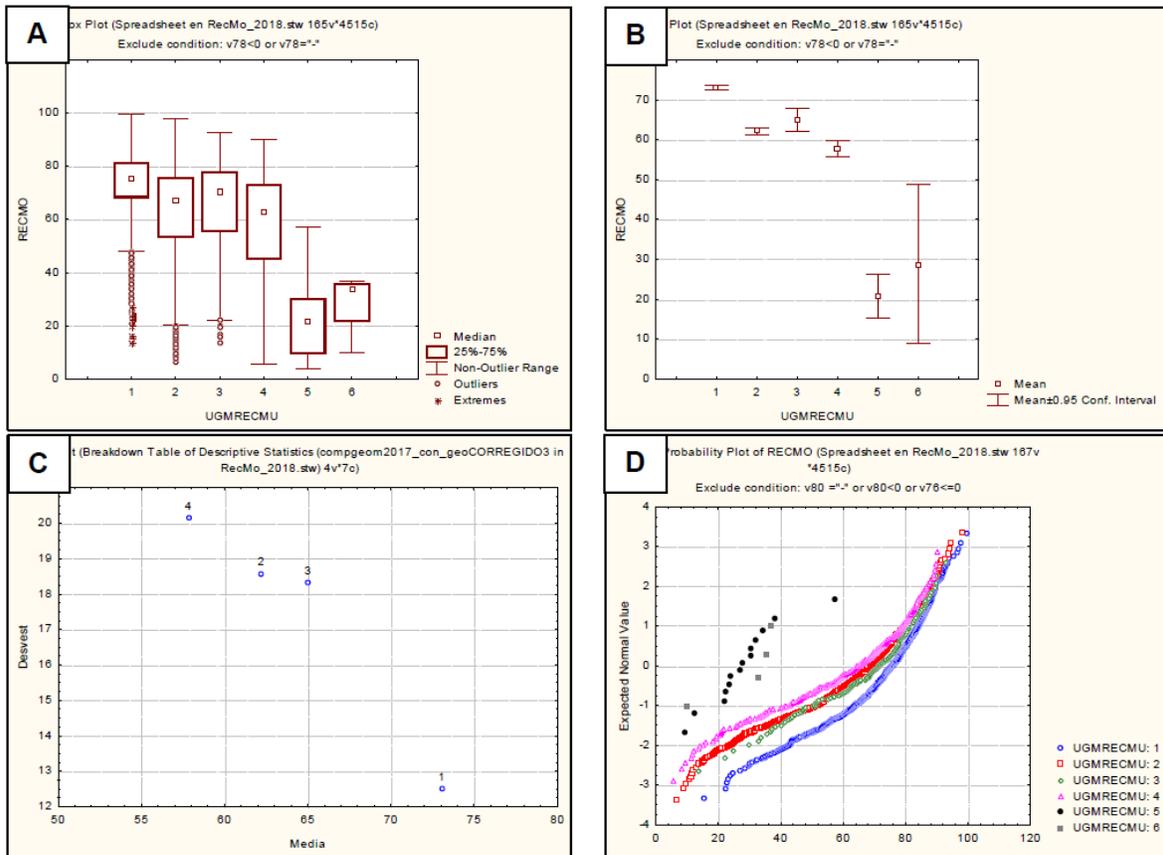


Figura 33. Recuperación molibdeno por UGMREC. A: Box Plot. B: Mean Plot. C: Media vs desviación estándar. D: gráfico normal probabilístico.

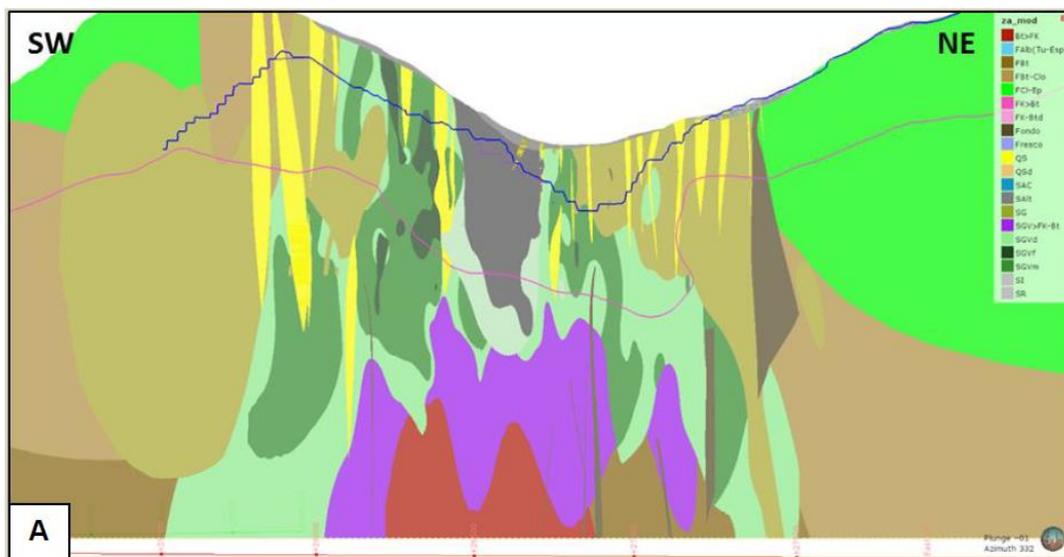


Figura 34. Secciones modelo alteración. Línea color magenta corresponde a Techo Sulfatos. A: Río Blanco.

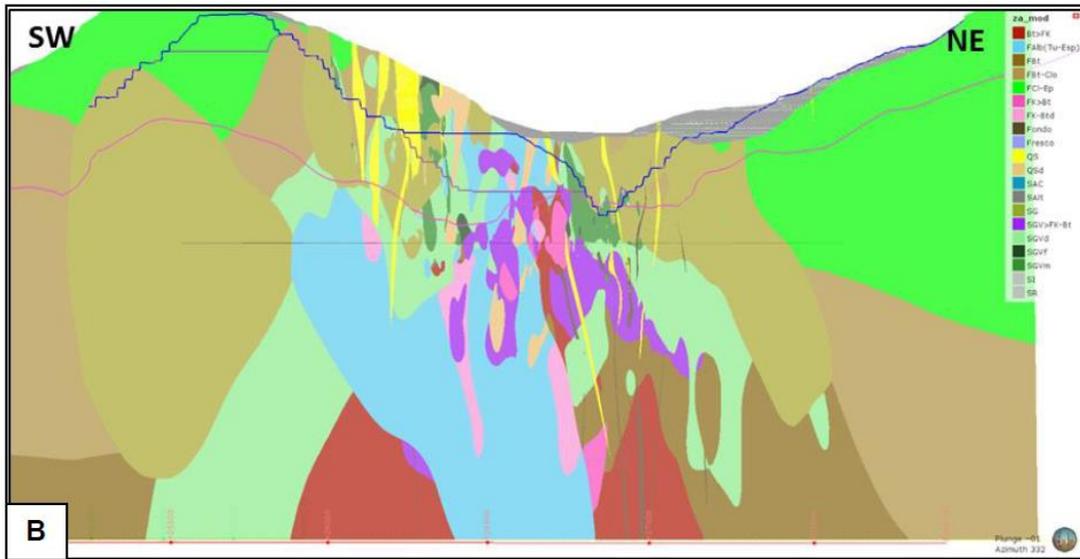


Figura 35. Secciones modelo alteración. Línea color magenta corresponde a Techo Sulfatos. B: Don Luis.

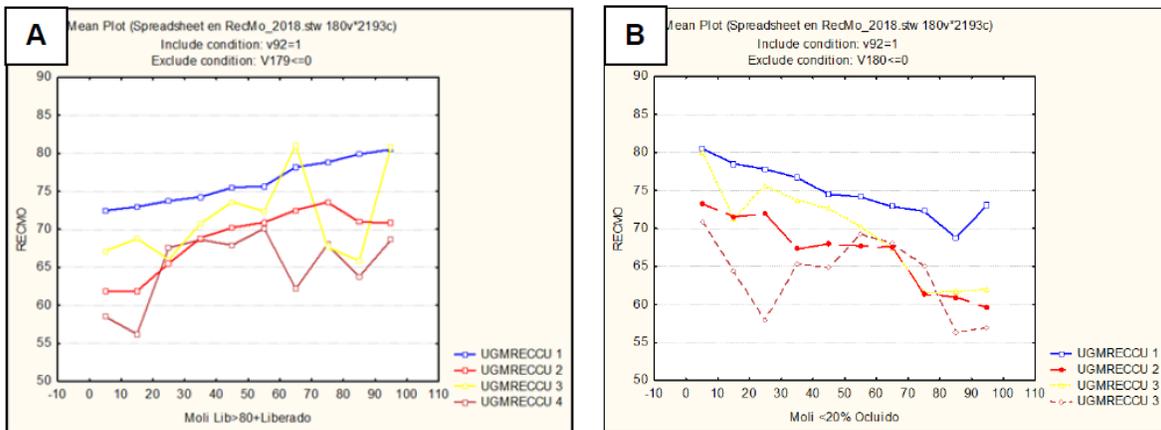


Figura 36. Gráficos Mean Plot recuperación molibdeno versus grado de liberación, por UGMREC. A: Molibdenita >80% Liberada. B: Molibdenita <20% liberada.

5.1.4.2 Definición de las UGM para la recuperación de Mo

- UGM-1: Roca Primaria, contiene a todas las unidades litológicas bajo el techo de sulfatos (superficie geotécnica Primario-Secundario), exceptuando a todos los pórfidos. Esta unidad no presenta efecto de alteración supérgena.
- UGM-2: Roca Secundaria con bajo efecto de alteración supérgena con contenidos de limonitas < 0,5% del total de la roca. Presenta fracturas abiertas y abarca a todas las unidades litológicas sobre el techo de sulfatos y bajo la superficie de Piso de Limonitas y Arcillas supérgenas, exceptuando el sector de rocas estériles (CHRIOL y CHDAC).

- UGM-3: Pórfidos en Roca Primaria, donde la ocurrencia principal es de sulfuros diseminados muy finos. Esta unidad, asociada a zonas de bajas leyes de cobre, está debajo del techo de sulfatos.
- UGM-4: Roca Secundaria con mayor efecto de alteración supérgena. Su alteración principal es cuarzo-sericítica con sectores restringidos con alteración argílica – sericítica. Abarca a todas las unidades litológicas sobre el Piso de limonitas, exceptuando el sector de rocas estériles (CHRIOL y CHDAC).
- UGM-5: Incluye las unidades de roca Chimeneas Riolítica y Chimenea Dacítica (CHRIOL y CHDAC), unidades estériles o de muy baja ley.
- UGM-6: Incluye el material no consolidado denominado sobrecarga y que cubre la roca in situ, corresponde a una unidad estéril o de muy baja ley y cuenta con un número muy bajo de ensayos.

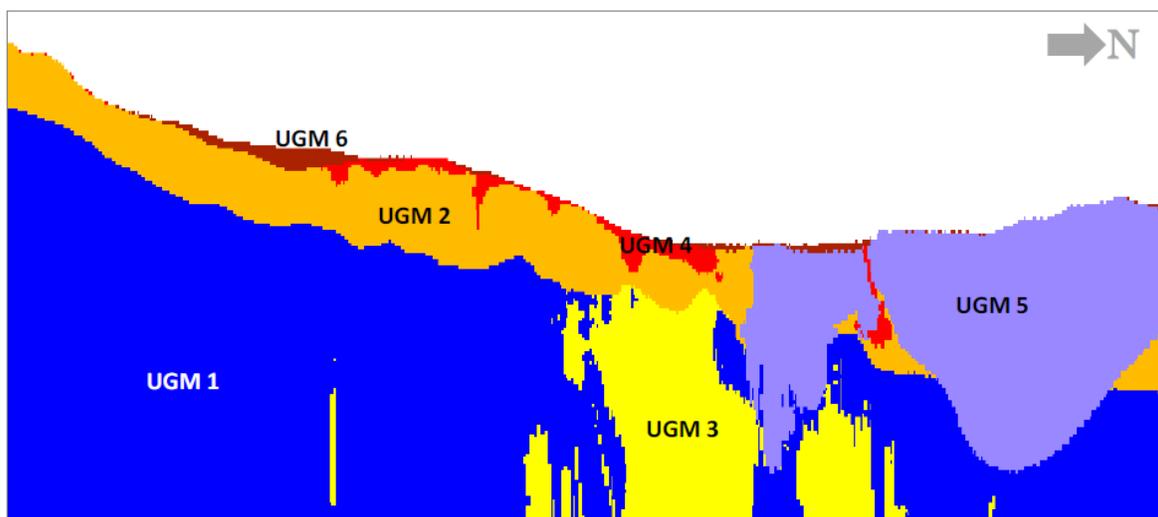


Figura 37. Sección longitudinal NE-SW esquemática definición de Unidades para RecMo.

5.1.5 Análisis estadístico de datos

5.1.5.1 Estadística de los datos de Rec Mo

La variable %Recuperación de molibdeno (%RecMo) tiene un promedio de 74.2%, un mínimo de 1.2 %, un máximo de 99.5 % y una desviación estándar de 18.6%, lo que resulta en un coeficiente de variación de 0.25.

La distribución es asimétrica negativa con una moda en torno a los 70-80%. A diferencia de la recuperación de cobre, esta posee una mayor dispersión o variabilidad. Los valores mínimos son más bajos y los valores altos son de menor magnitud.

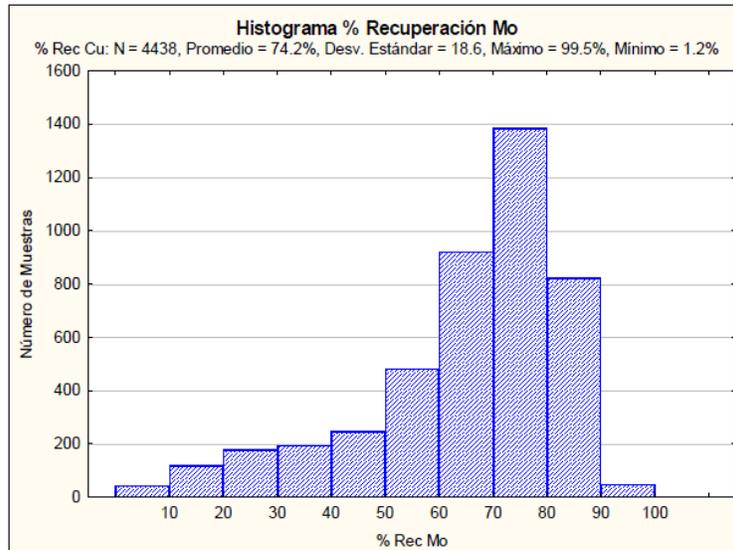


Figura 38. Histograma de Recuperación de molibdeno.

La UGM Rec 1 exhibe los valores más altos de %RecMo y con una de las menores desviaciones estándar, con valores de 76.5% y 12.5% respectivamente.

La UGM con los valores más bajos es la UGM Rec 5 (Chimeneas) con un promedio de 21.2 %RecMo.

La UGM 4 exhibe la mayor dispersión con una desviación estándar de 21.4%, dada la heterogeneidad del material. En términos generales en profundidad aumenta la recuperación de molibdeno y en cotas más someras tienden a disminuir y es más heterogénea.

El resumen estadístico de esta variable, por UGM, se muestra en la siguiente tabla y figuras a continuación:

Tabla 11. Estadísticos Recuperación de Mo por UGM

UGM REC	#	%	Promedio	Mínimo	Máximo	Varianza	Desv. Est.	CV
1	1729	39%	76.5%	13.7	99.5	155.1	12.5	0.16
2	2010	45%	71.3%	1.2	98.1	366.8	19.2	0.27
3	180	4%	72.9%	13.6	92.7	312.1	17.7	0.24
4	476	11%	67.6%	2.7	90.1	458	21.4	0.32
5	35	1%	21.2%	1.7	57.2	179.7	13.4	0.63
6	8	0%	30.0%	10.1	41	96.1	9.8	0.33
Total	4438	100%	74.2%	1.2	99.5	346.5	18.6	0.25

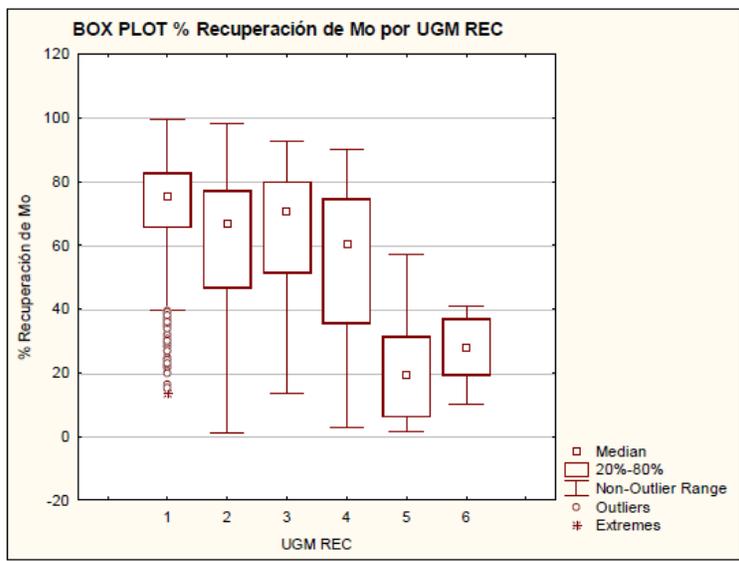


Figura 39. Gráfico de Comportamiento de Rec Mo por UGM REC.

La distribución de ley de molibdeno en las muestras ensayadas es la siguiente:

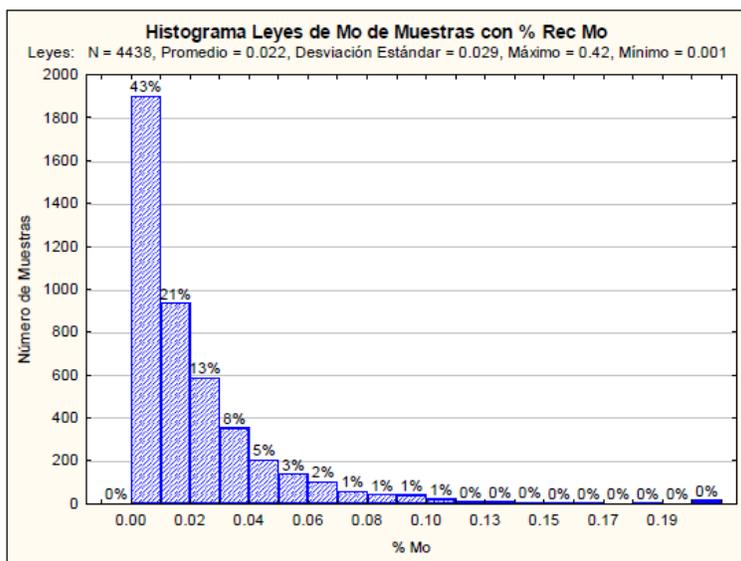


Figura 40. Histograma de ley de Mo en muestras ensayadas

El análisis estadístico de los datos de recuperación de molibdeno, arroja que las actuales unidades geometalúrgicas de recuperación utilizadas en la estimación del cobre recuperable, son también un buen control para la separación de comportamientos distintos de la recuperación de molibdeno.

5.1.6 Aseguramiento de calidad

5.1.6.1 Control de calidad pruebas flotación rougher

Durante las pruebas de flotación se realizan diferentes controles, que incluyen el análisis químico de las muestras (duplicados y materiales de referencia), balance metalúrgico y duplicados del mismo ensayo. El detalle de estos controles se indica a continuación:

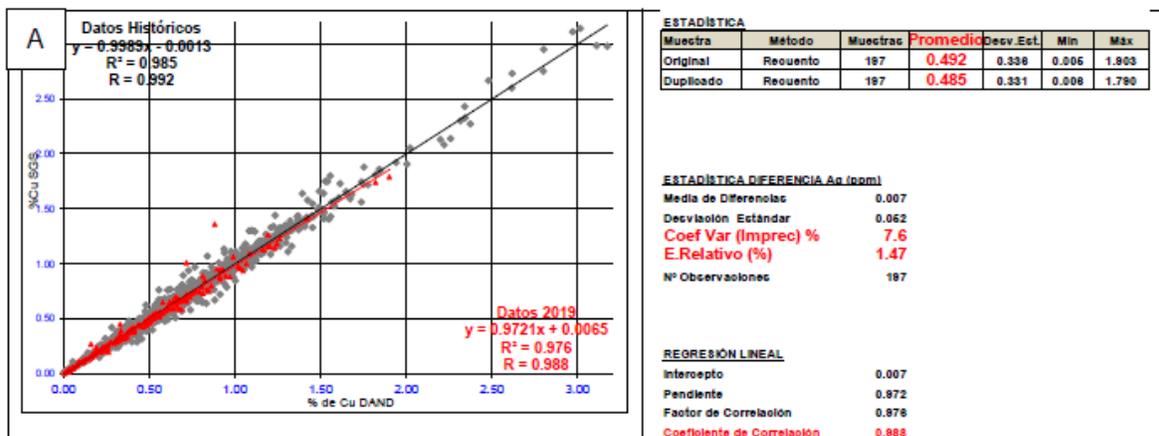
i. Comparación Cu compositado sondaje versus Cu muestra geometalúrgica

Este primer control se realiza al 100% de las muestras y consiste en comparar el contenido de cobre de las muestras geometalúrgicas (de 16 metros de largo), con la ley promedio ponderado por largo, de las submuestras del sondaje (en general, con un soporte de 2 metros).

La Figura 41A presenta los estadísticos y gráficos generados al comparar ambos datos; en gris, las muestras históricas y en rojo, las 197 muestras ensayadas durante este año. Se excluyeron las muestras de sobrecarga (3) que no poseen análisis químico de cobre.

Los estadísticos básicos son similares, valor promedio de 0.492 % Cu vs 0.485 % Cu, una desviación estándar de 0.336 vs 0.331 y un coeficiente de correlación de 0.988.

Desde el punto de vista del error relativo los nuevos datos presentan un error similar (línea azul) respecto al comportamiento histórico (línea gris Figura 41B). Durante este año, 67 muestras presentan leyes de Cu inferiores a 0.3% lo que hace que pequeñas diferencias de ley arrojen un gran error.



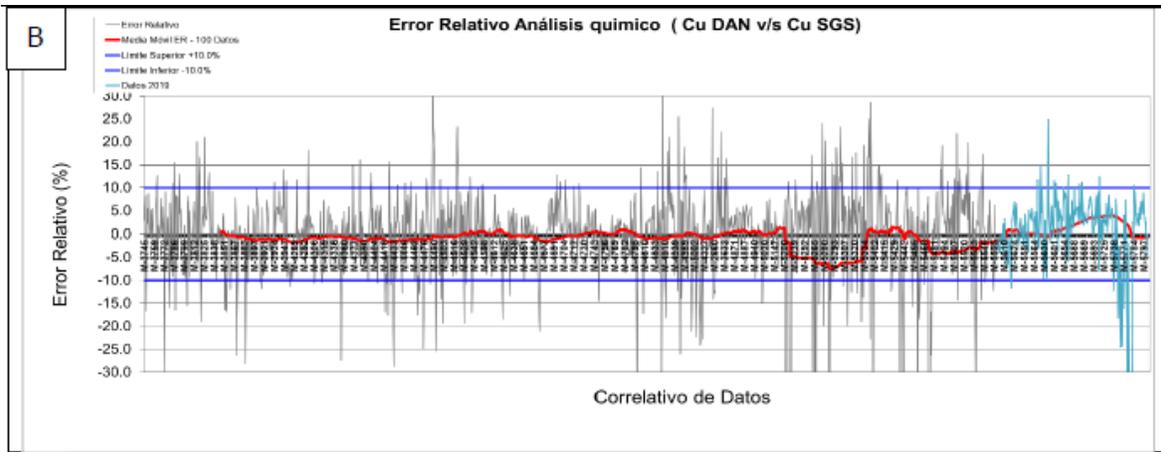


Figura 41. Gráficos comparativos Cu DAND vs Cu SGS

ii. Materiales de Referencia

Se utilizaron materiales de referencia para las cabezas y dos productos (concentrados y relaves) para ser insertos junto a cada batch de muestras que entran al laboratorio químico y así controlar la exactitud de los análisis. No se cuenta material de referencia para el Fe, sólo para el Cu y Mo.

La Figura 42 presenta los valores del STD DAND 03 (Cabeza SAG) para controlar los análisis de cabezas de las muestras geometalúrgicas por los elementos Cu y Mo. Los valores obtenidos se encuentran dentro de la banda de aceptación, apreciándose una tendencia a estabilizarse en los valores bajo la referencia para el Cu. Para el Mo los valores se encuentran dentro de la banda, con una tendencia a estar sobre el valor promedio de la referencia.

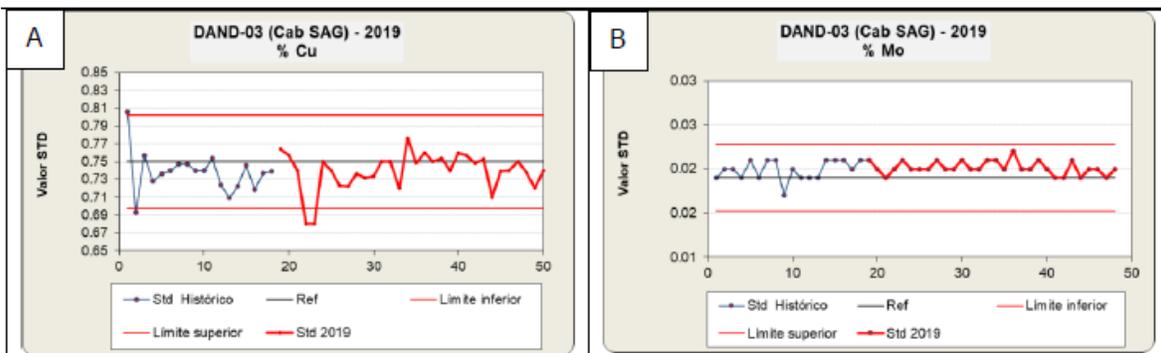


Figura 42. Leyes STD DAND-03 de Cu (A) y Mo (B) en muestras de cabeza

En el caso de los concentrados, se utilizó el estándar CCU-AND-01 (Figura 43), el cual fue renovado con una nueva preparación casi a fines del 2018. Los valores para ambos analitos se encuentran dentro de la banda de aceptación, con una tendencia bajo el valor de referencia en el caso del Mo y un mejor comportamiento para el Cu para el nuevo estándar.

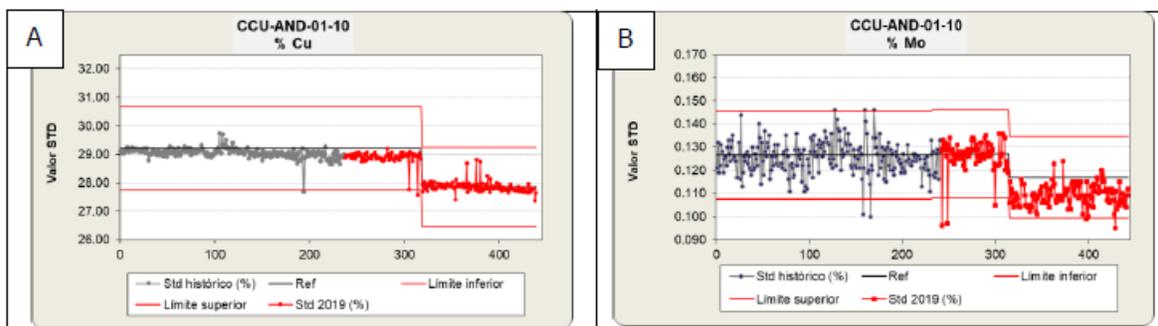


Figura 43. Leyes STD CCU-AND-01-10 de Cu (A) y Mo (B) para los concentrados de las pruebas geometalúrgicas estándar.

Para los relaves, se utilizó el estándar DAND-04 (Figura 44), también renovado con una nueva preparación, con valores dentro de la banda para Cu. El Mo presenta unos valores sobre el límite superior y una leve tendencia a un sesgo de los datos, esto generó algunas repeticiones en los análisis de Mo de los relaves de las pruebas de flotación.

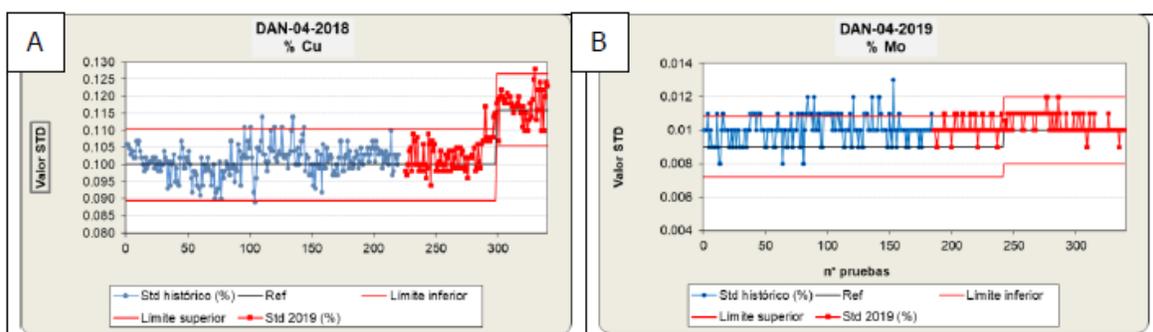


Figura 44. Leyes STD DAND-04 de Cu (A) y Mo (B) para los relaves de las pruebas geometalúrgicas estándar.

5.1.6.2 Flotaciones tiempo Fijo versus Cinética

A todas las muestras geometalúrgicas se les realiza dos pruebas de flotación: una cinética de flotación y una flotación a tiempo fijo (11 minutos). Inicialmente se realizaba el balance metalúrgico de las flotaciones a tiempo fijo al 10% de las muestras (Control A5), sin embargo, con el transcurso del tiempo, se tomó la decisión de realizar este balance a la totalidad las muestras con el objetivo de que estas fuesen validadas al comparar los resultados de ambas pruebas, y de forma complementaria, asegurar una muestra confiable para análisis mineralógicos [10].

La variabilidad de los diferentes datos obtenidos en ambas pruebas se presenta a continuación. Se incluyen los valores de las pruebas históricas (puntos de color gris en gráficos de dispersión y línea de color gris en gráfico de error relativo ordenado por correlativo), mientras que los valores agregados a la base de datos 2019 se

presentan con puntos rojos en gráficos de dispersión y línea azul en gráfico de error relativo ordenado por correlativo.

i. Recuperación en peso

El comportamiento de las recuperaciones en peso de las dos pruebas se observa en la Figura 45. La media de las recuperaciones en las muestras 2019, es de 6.2% para las flotaciones a tiempo fijo y de 6.1% para las cinéticas. Se aprecia una buena correlación entre las recuperaciones, con un coeficiente de correlación 0.991 (Figura 45A). En la Figura 45B se puede observar valores con error relativo sobre 10%, sin embargo, corresponde a valores de recuperaciones bajos coincidentes con leyes de Cu inferiores a 0.3%. Estas flotaciones no se han repetido ya que los balances metalúrgicos cierran de manera correcta.

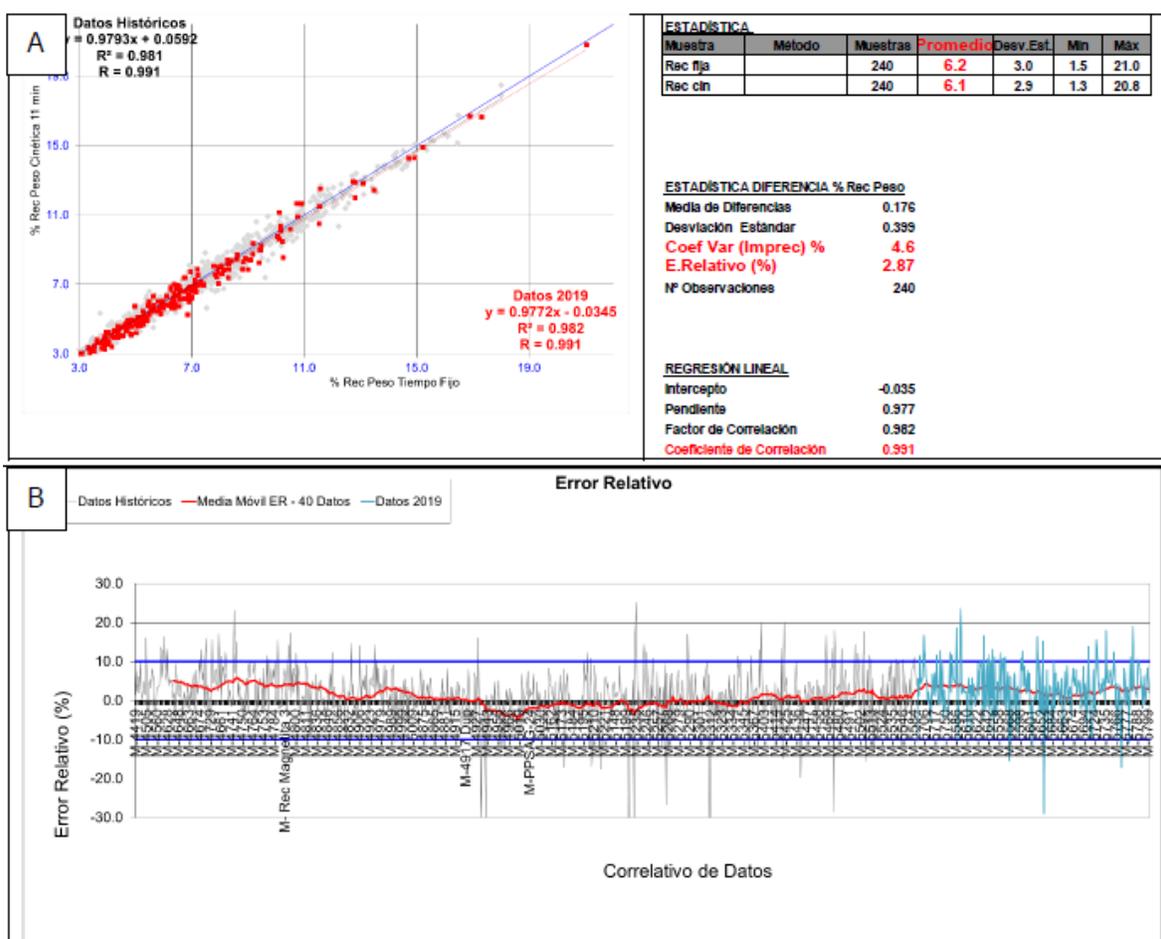


Figura 45. Gráficos comparativos Rec Peso Tiempo fijo vs Rec Peso Cinética 11 min.

El resultado de este control, valida el uso de los productos de la prueba a tiempo fijo para análisis mineralógicos de alta definición.

ii. Comparación del Cu calculado de balances metalúrgicos

Cada una de las flotaciones tanto cinética como fija, se cierra con un balance metalúrgico, mediante el cual se calcula el Cu de cabeza utilizando las leyes del concentrado y relave y sus respectivas masas. El Cu calculado se compara con el Cu del análisis químico de la cabeza, si el error de la diferencia es inferior del 7%, la prueba se valida para leyes sobre 0.3% Cu. Las muestras con leyes inferiores 0.3% se aceptan diferencias de hasta 10%.

Otro control que se realiza es la comparación del Cu calculado de ambas pruebas de flotación (Figura 46), donde se observa un coeficiente de correlación de 0.998. Al comparar las medias de las pruebas cinéticas con las tiempo fijo estas difieren en 0.011% con una desviación estándar de 0.327% para el Cu calculado del tiempo fijo y 0.320% para el Cu calculado de las cinéticas. Al observar el error relativo de ambas pruebas se observa un sesgo positivo, donde las flotaciones a tiempo fijo presentan valores de Cu calculado mayor respecto a la cinética, esto se explica por las mayores recuperaciones en masa de las flotaciones tiempo fijo respecto a las cinéticas.

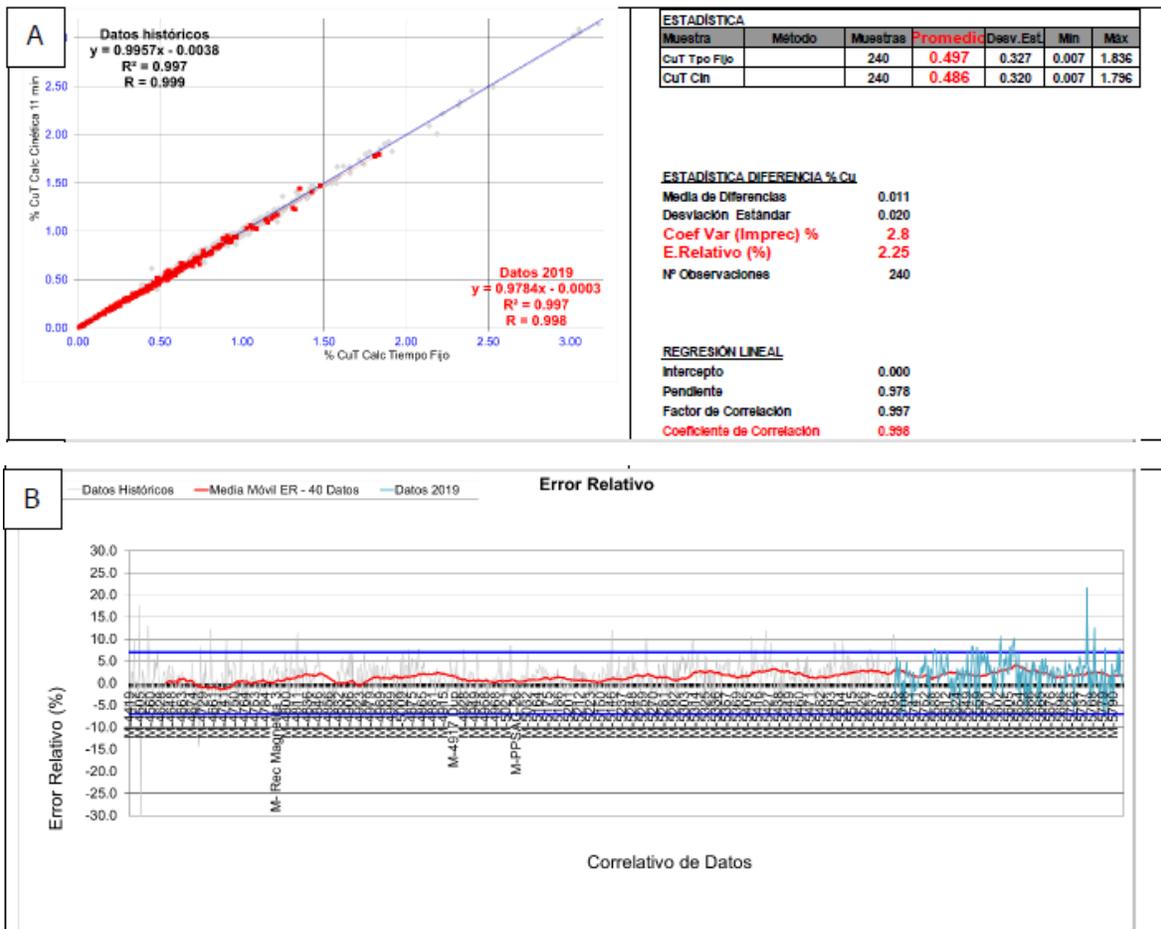


Figura 46. Gráficos comparativos Cu calculado Tiempo Fijo vs Cu calculado Cinética 11 min.

iii. Comparación del Mo calculado de balances metalúrgicos

Para el caso del Mo también se realiza un balance metalúrgico. La comparación del Mo calculado en las cabezas de las flotaciones a tiempo fijas y cinéticas entrega un coeficiente de correlación de 0.998 (Figura 47).

Los gráficos de error relativo, tienen una banda de aceptación de $\pm 15\%$ de diferencia (Figura 47B), donde no se presenta un sesgo significativo de los datos. Existe un grupo de muestras con ley de Mo muy cercano o bajo el límite de detección que al momento de realizar el balance se asigna ley 0.001%, disminuyendo el error relativo de manera artificial. Para leyes entre 0.002% y 0.003% el error puede ser alto pero aceptable y sobre 0.003% el error cae dentro de la banda de aceptación.

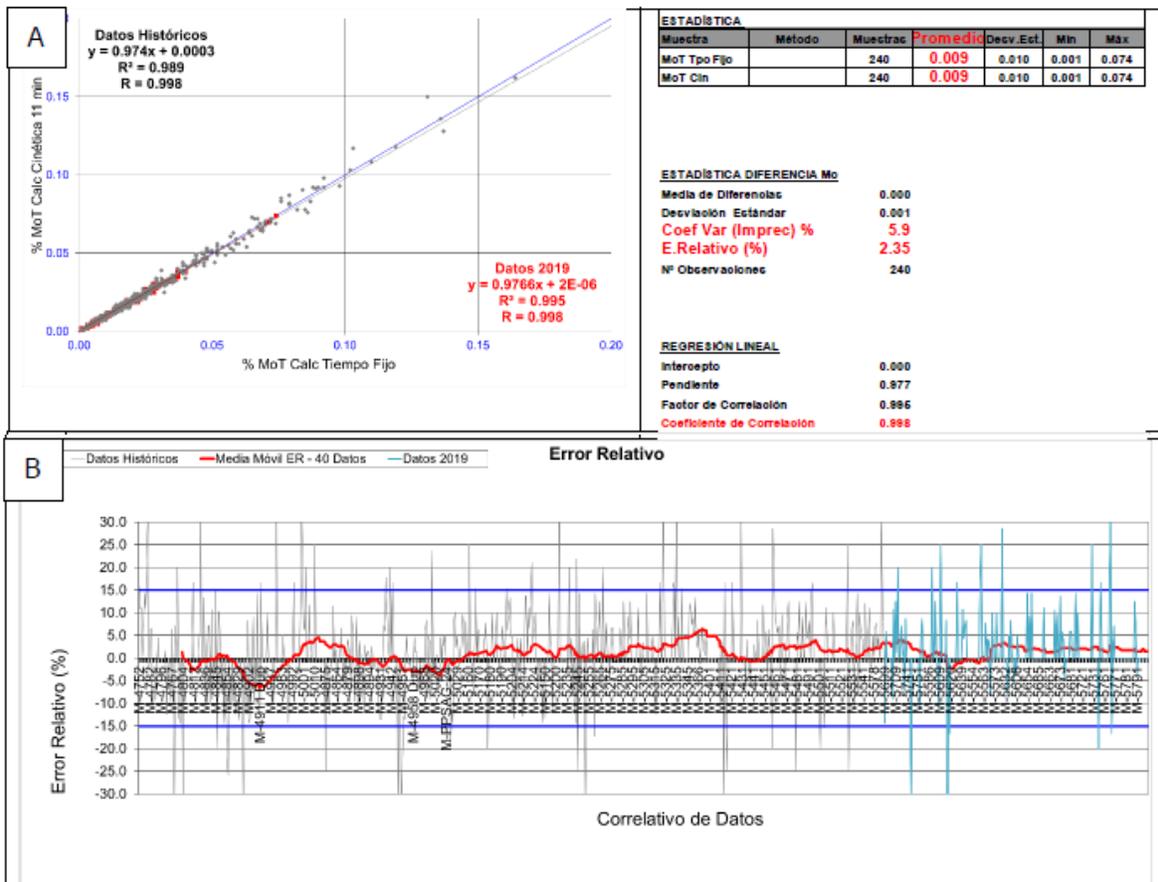


Figura 47. Gráficos comparativos Mo calculado Tiempo Fijo vs Mo calculado Cinética 11 min.

iv. Recuperación de Cu

La Figura 48 presenta los gráficos comparativos entre los resultados de Recuperación de Cu de ambas flotaciones, con un coeficiente correlación 0.993. Las mayores diferencias se presentan en las leyes de Cu bajo 0.3%.

En los gráficos de error relativo (Figura 48B) se observa el sesgo inherente al comparar pruebas a tiempo fijo con pruebas cinéticas, ya observado en las recuperaciones en peso y balance metalúrgico del Cu, con recuperaciones levemente superiores para las flotaciones a tiempo fijo, en torno al +0.4% de recuperación de Cu.

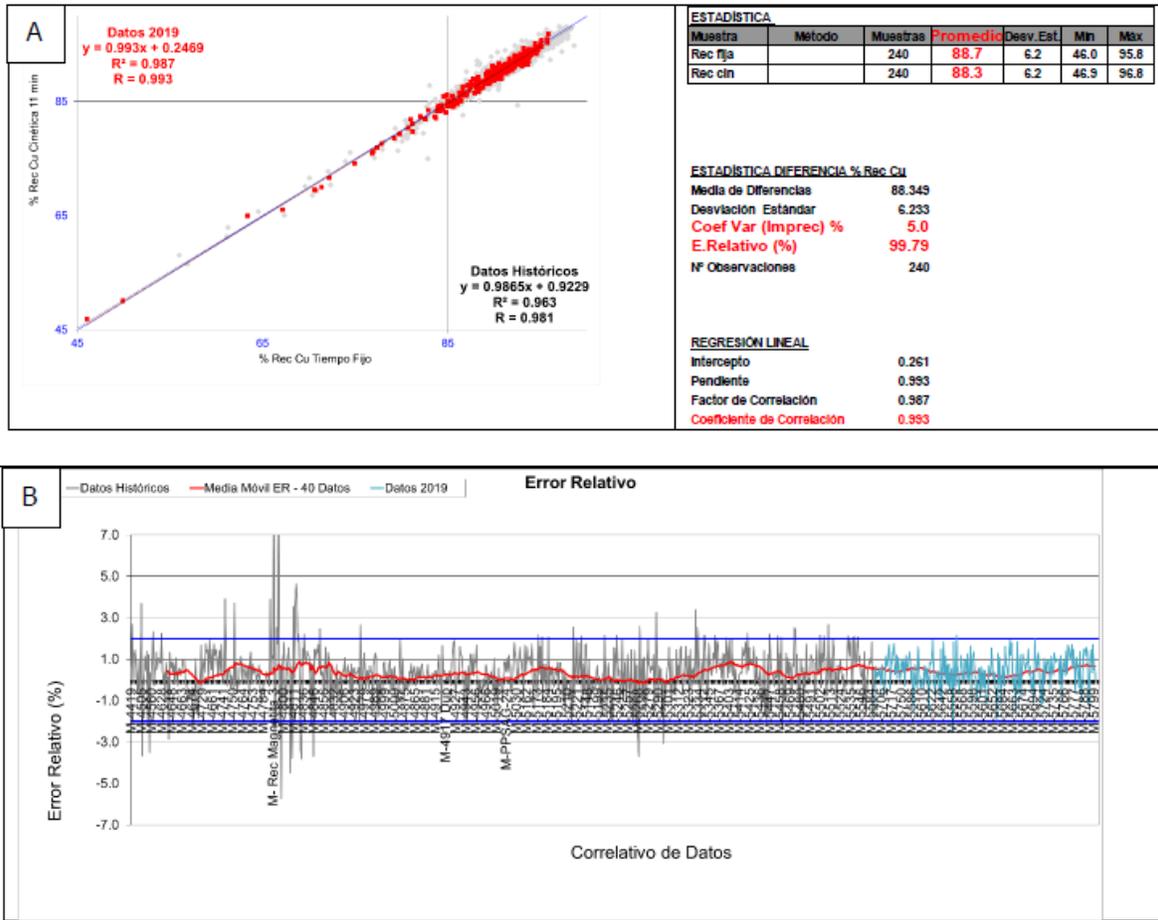


Figura 48. Gráficos comparativos Rec Cu Tiempo Fijo vs Rec Cu Cinética 11 min.

v. Recuperación de Mo

Los resultados del análisis de las diferencias de Recuperación de Mo se presentan en la

Figura 49, donde se observa una buena correlación de los datos con un coeficiente de correlación de 0.996. Las mayores diferencias entre las pruebas se encuentran en las recuperaciones bajo 30%, que en general coinciden con las leyes más bajas de Mo.

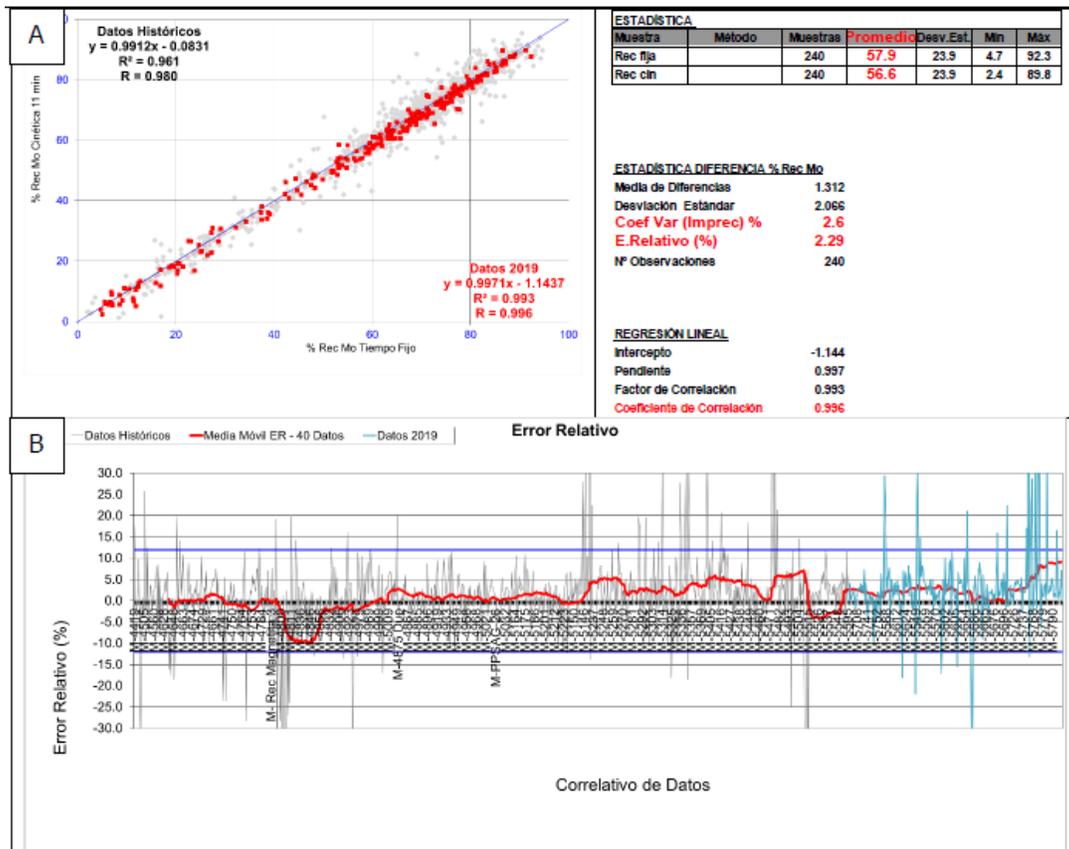


Figura 49. Gráficos comparativos Rec Mo Tiempo Fijo vs Rec Mo Cinética 11 min.

5.2 Diagnóstico Operacional Metalúrgico

5.2.1 Descripción de instalaciones Planta Concentradora

División Andina procesa minerales de dos minas, una a rajo abierto y una subterránea, los cuales son procesados por distintas plantas de molienda. Sin embargo, la flotación colectiva y selectiva es única para todos los minerales.

A continuación, se presenta una descripción general de la planta concentradora, desde la operación de chancado hasta la flotación selectiva de molibdeno.

5.2.1.1 Chancado y Molienda

El mineral proveniente de la mina subterránea es procesado en una etapa de chancado primario de mandíbulas y tres etapas de chancado posteriores (2°, 3° y 4°), las que utilizan chancadores de cono y harneros vibratorios como medio de reducción de tamaño y clasificación granulométrica. El producto del chancado es alimentado a las líneas de molienda: una molienda unitaria (MU1) y una molienda

convencional compuesta por tres líneas (Conv A, Conv B y Conv C), cada una con un (1) molino de barras y tres (3) molinos de bolas. El diagrama de ambas etapas se describe en la Figura 50.

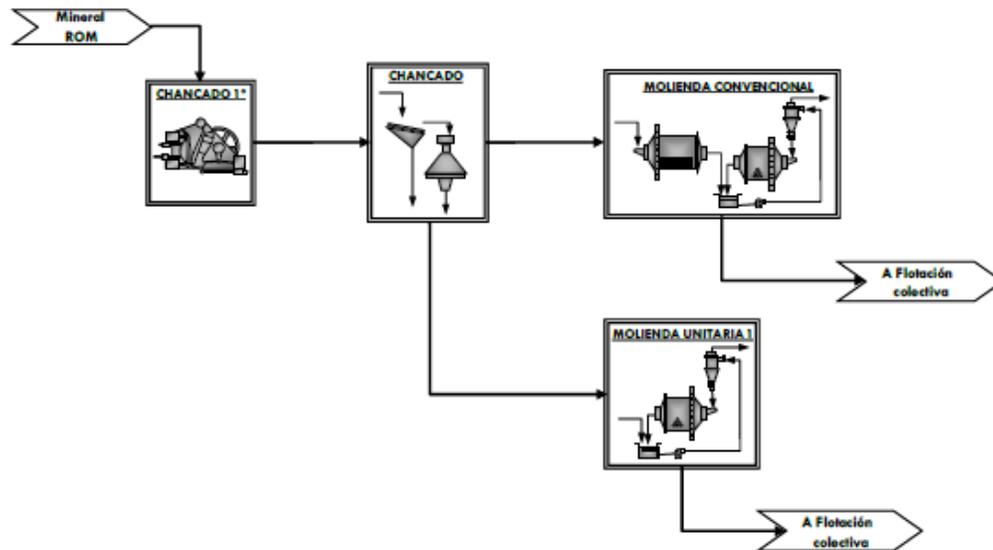


Figura 50. Diagrama chancado y molienda mina subterránea.

El mineral proveniente de la mina a rajo abierto es fragmentado por un chancador giratorio primario para luego ser transportado a dos líneas molienda: una de molienda SAG con prechancado y una de molienda unitaria (MU2) con chancado secundario-terciario.

El diagrama de bloques de ambas etapas se muestra en la Figura 51.

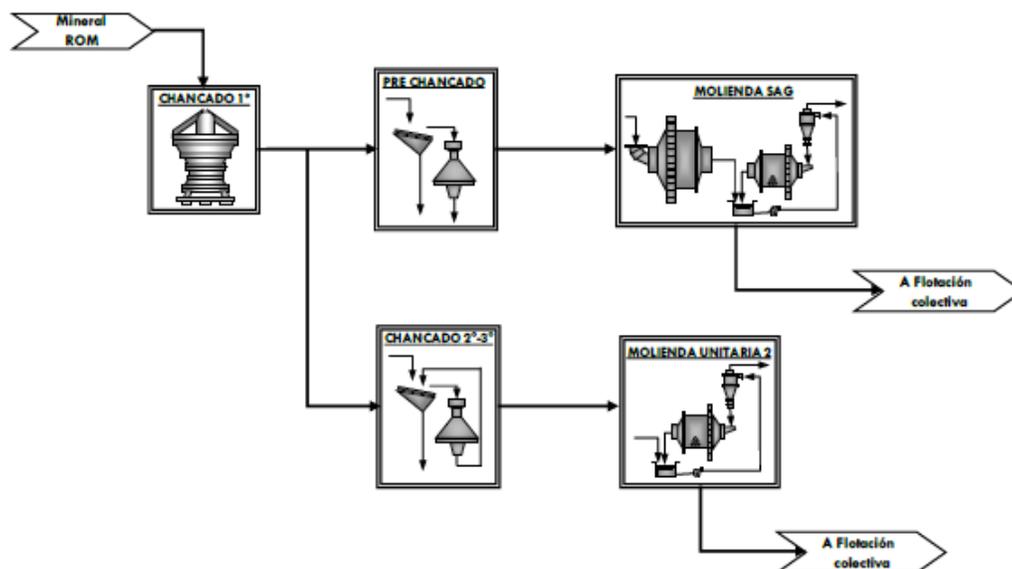


Figura 51. Diagrama chancado y molienda mina rajo abierto.

5.2.1.2 Flotación Colectiva

El producto de la etapa de molienda es alimentado a la planta de flotación colectiva, compuesta de una etapa primaria, remolienda de concentrado (primario y barrido), una de limpieza columnar y un barrido, tal como se presenta en la Figura 52.

La flotación primaria está compuesta por dos secciones:

- Sección A-B: alimentada con los productos de molienda SAG, MU1, MU2 y Conv A
- Sección E: Alimentada con los productos de molienda convencional Conv B y Conv C

Los concentrados de ambas secciones junto con el concentrado barrido son remolidos por dos molinos verticales (con sus respectivas baterías de hidrociclones), para luego ser alimentados a una flotación de limpieza columnar.

La limpieza columnar está conformada por 6 columnas. El concentrado es el producto de flotación colectiva (concentrado mixto de Cu-Mo).

La etapa de barrido es alimentada por la cola de la flotación columnar. El concentrado es alimentado a la remolienda mientras que su cola conforma parte del relave final.

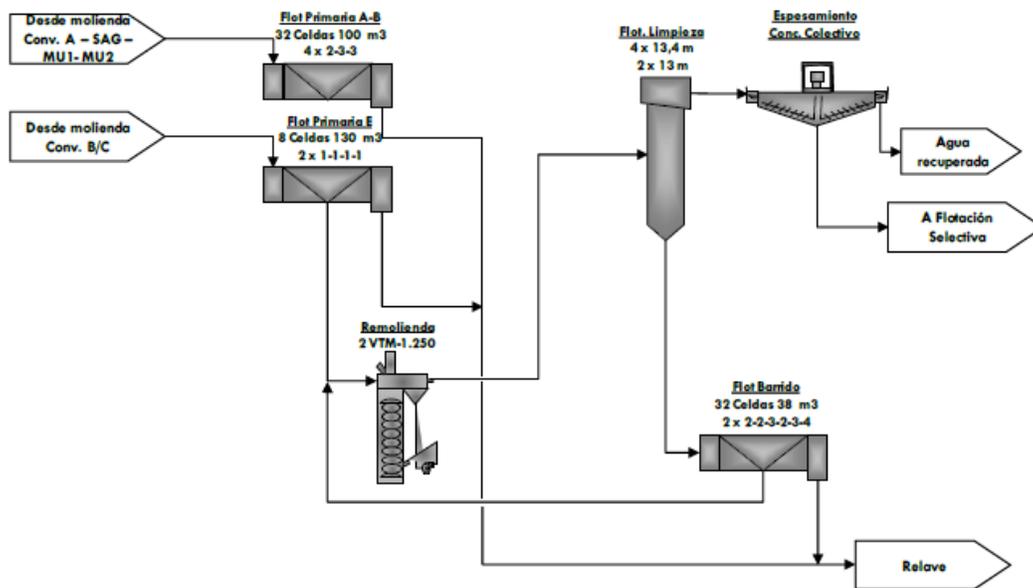


Figura 52. Diagrama flotación colectiva.

5.2.1.3 Flotación Selectiva

El objetivo de la planta de flotación selectiva consiste en deprimir los sulfuros de cobre presentes en el concentrado mixto, permitiendo obtener concentrado de cobre con bajo porcentaje de molibdeno, que es destinado a la planta de filtros, para posteriormente ser enviado a fundición. A su vez, el concentrado de Mo es descubrizado en una planta de lixiviación utilizando cloruro férrico hasta alcanzar la calidad requerida para una posterior comercialización. La solución de cobre generada en este proceso se envía a cementación, utilizando chatarra de Fe para recuperar el fino en la forma de cemento de Cu.

La Planta de Flotación Selectiva genera 2 productos: un concentrado de Cu (25-28% Cu) y un concentrado de Mo (43-45% Mo).

Esta planta está conformada por dos líneas de flotación rougher (300 y 500), una línea de flotación de barrido, una limpieza convencional (1era), 2 etapas de limpieza con flotación columnar (2da, 3ra), y una última etapa de limpieza con celda tipo G-Cell (4ta).

La Planta cuenta además con una columna intermedia en su circuito de limpiezas, denominada columna corta como se puede observar en la Figura 53.

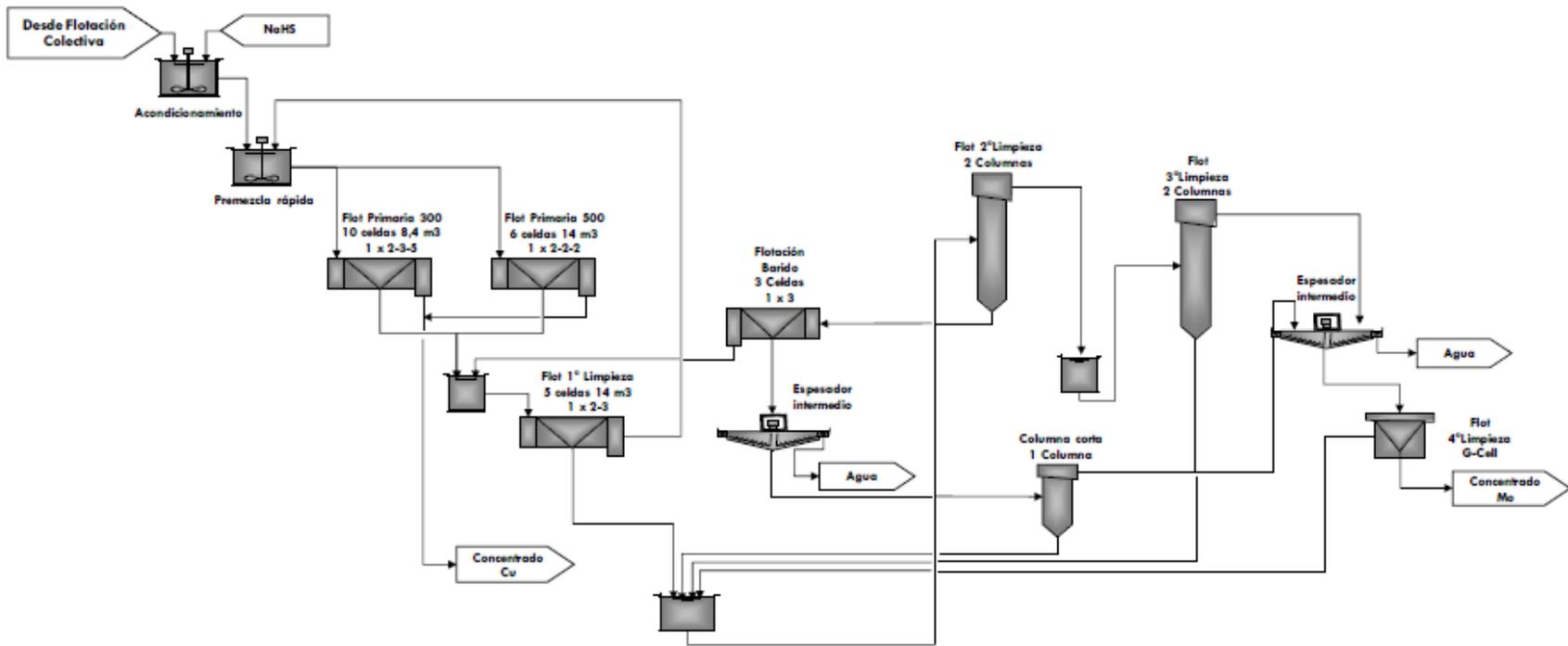


Figura 53. Diagrama flotación selectiva.

5.2.2 Análisis de Diagnóstico

El objetivo del análisis del diagnóstico consiste en identificar los factores que han provocado una merma en la recuperación de Mo en la planta de flotación selectiva. Para esto, se realizó un análisis integral desde el mineral alimentado a la molienda hasta los dos productos principales de dicha planta: concentrado de Cu y concentrado de Mo.

Se presenta a continuación los resultados más importantes del análisis de diagnóstico incluyendo datos operacionales hasta diciembre de 2019 y los resultados de un muestreo en planta realizado en septiembre de 2019.

5.2.2.1 Mineral alimentado a Planta Concentradora

Las UGMs definidas para Cu son cuantificadas en masa para los minerales provenientes del rajo y de la mina subterránea. Esta información se encuentra disponible desde enero de 2014 hasta diciembre de 2019, cuya estadística básica se encuentra en la Tabla 12.[11]

Tabla 12. Estadística participación UGMs.

UGM	Rajo					Subterránea				
	UGM 1	UGM 2	UGM 3	UGM 4	UGM 5	UGM 1	UGM 2	UGM 3	UGM 4	UGM 5
Promedio	19%	77%	4%	14%	1%	20%	64%	0%	6%	10%
Mínimo	0%	0%	0%	0%	0%	2%	20%	0%	0%	0%
Máximo	100%	100%	41%	84%	8%	80%	81%	0%	15%	20%
Desviación estándar	19%	24%	5%	15%	1%	14%	12%	0%	4%	3%
Coficiente de variación	0.99	0.31	1.05	1.06	0.62	0.69	0.19	-	0.62	0.35

En la Tabla 12, se observa que la UGM2 se encuentra mayoritariamente presente tanto en el rajo como en la mina subterránea, la UGM3 es exclusiva del rajo, y que la participación de la UGM 5 es prácticamente exclusiva de la mina subterránea.

i. Cobre

En el mineral de cobre proveniente del rajo, aun cuando existe notoria variabilidad en las leyes del mineral alimentado a planta, los que fluctúan entre 0.6% y 1.0% de Cu, no se observa un cambio de tendencia en el período considerado entre 2013 y 2018, pero sí una disminución a partir de 2019, con leyes que oscilan entre 0.5% y 0.7%. En la Figura 54 se observa que en los últimos 6 años la UGM2 se constituyó en el principal componente del mineral, con algunas irrupciones de las UGMs 1 y 3 en los últimos años.

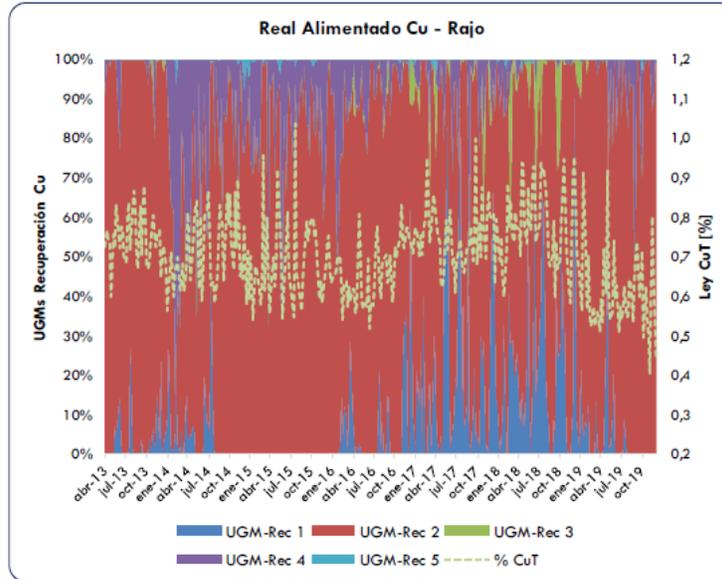


Figura 54. Gráfico Real Alimentado Cu mina rajo.

Respecto al mineral proveniente de la mina subterránea, como se ve en la Figura 55, si bien mantiene a la UGM2 como principal aportante, se observa que la ley de cobre depende fuertemente de la contribución de la UGM1: a menor aporte de la UGM1, menor ley de Cu en el mineral. Lo anterior se tradujo en una merma de ley de Cu, desde 1.0% a 0.6%, entre el 2013 y el 2018, pues el aporte de la UGM1 fue bajando progresivamente. Esta situación, sin embargo, se revirtió en forma parcial en 2019, con un leve aumento de la ley de 0.6% a 0.8%.

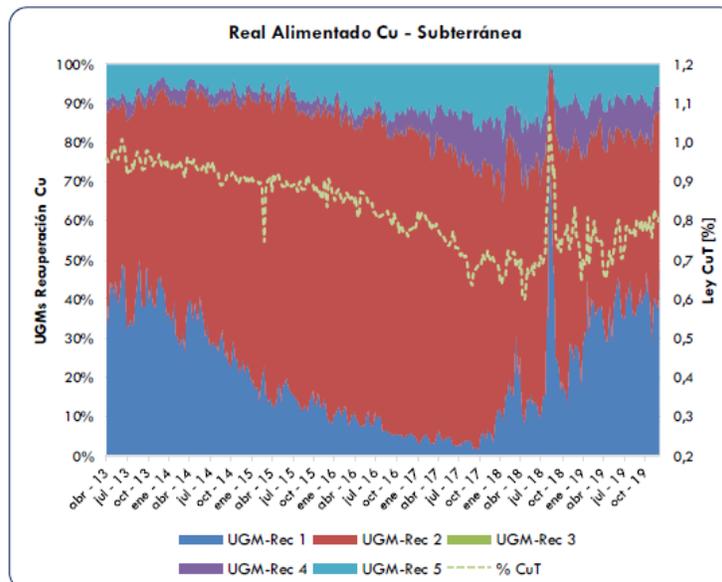


Figura 55. Gráfico Real Alimentado Cu mina subterránea.

La recuperación in-situ primaria se mantiene en torno al 93% durante todo el período con información disponible para los minerales del rajo (Figura 56), mientras que para los provenientes de la mina subterránea tuvo una disminución continua desde 2013 hasta fines de 2017, lo que es coincidente con la menor participación de la UGM1.

A partir de 2018, en cambio, se observa un repunte en el aporte de la UGM1, lo que trajo consigo un alza en el contenido de cobre del mineral y una mayor recuperación de Cu. La mayor evidencia de lo anterior la constituye el mes de agosto de 2018, donde se produjo un notorio aumento de la ley de Cu en el mineral y en la recuperación del elemento, lo que se atribuye a un aporte puntual extraordinario de la UGM1 (Figura 57).

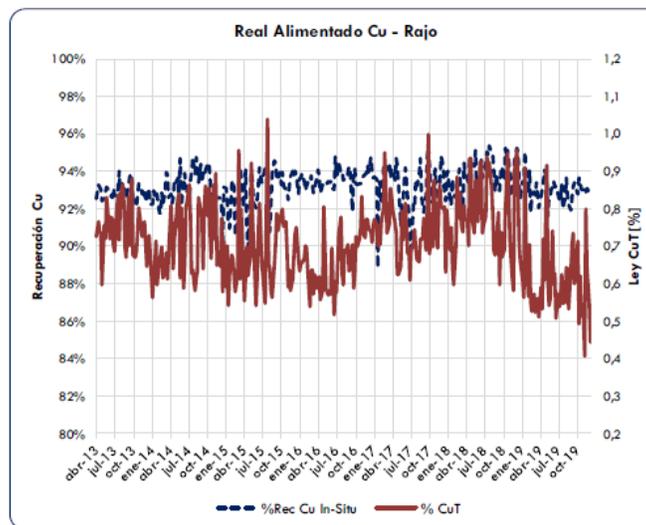


Figura 56. Gráfico ley/recuperación in-situ Cu Real Alimentado de mina rajo.

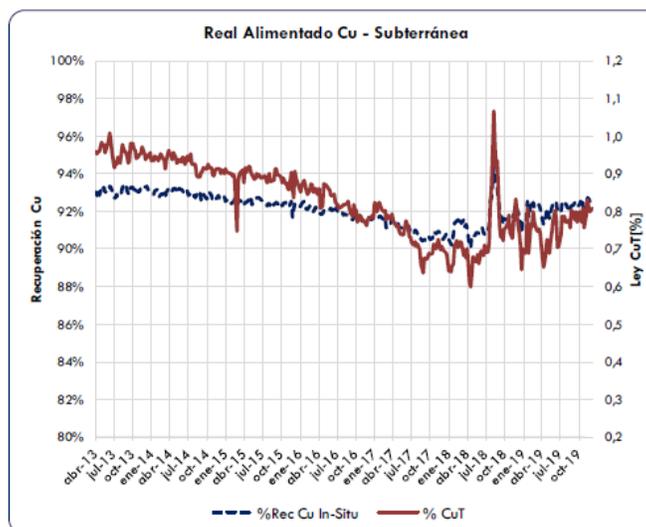


Figura 57. Gráfico ley/recuperación In-situ Cu Real Alimentado de mina subterránea.

ii. Molibdeno

Al igual que en el cobre, se observa una alta variabilidad en la ley de molibdeno del mineral proveniente del rajo. La ley de alimentación de Mo se encuentra dentro del rango de 0.010% a 0.035%, con alzas puntuales por sobre 0.040%, apreciables en la Figura 58. Respecto al mineral de Mo proveniente de la mina subterránea, se observa una baja constante, cuyo rango se encuentra desde 0.070% en 2014 a 0.020% en 2019. En los últimos meses de 2019, se ha presentado una leve alza, manteniéndose en torno al 0.030%.

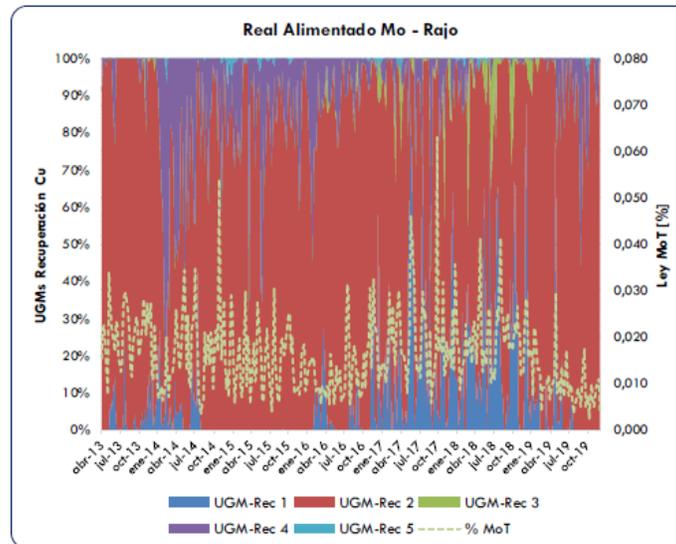


Figura 58. Gráfico Alimentado Mo Real de mina rajo.

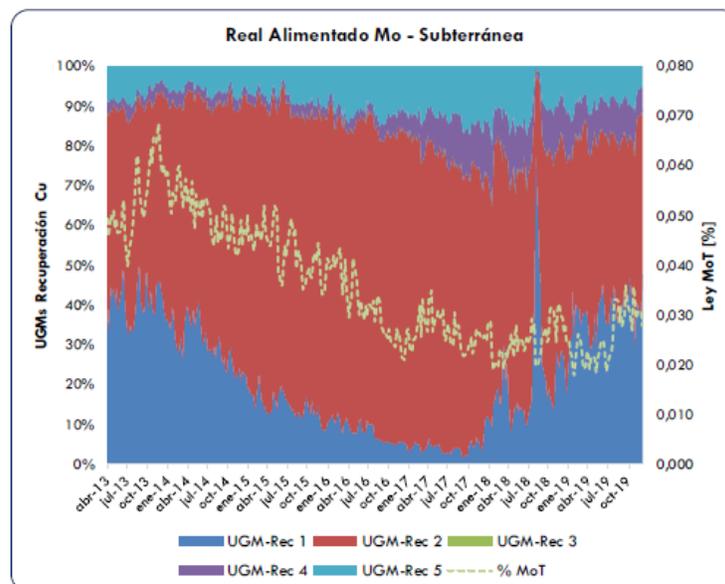


Figura 59. Gráfico Alimentado Mo Real de mina subterránea.

Las UGMs presentadas en los gráficos del real alimentado de molibdeno corresponden a las UGMs definidas exclusivamente para cobre, por lo que la participación es idéntica a los gráficos del real alimentado de cobre.

La recuperación in-situ primaria del mineral de molibdeno proveniente del rajo, tal como la ley, presenta alta variabilidad y se mantiene en el rango del 60% al 80%, con algunas disminuciones puntuales bajo el 50%. Los registros de la recuperación in-situ de Mo comienzan desde octubre de 2015, lo que explica la ausencia de datos hasta esa fecha en la Figura 60.

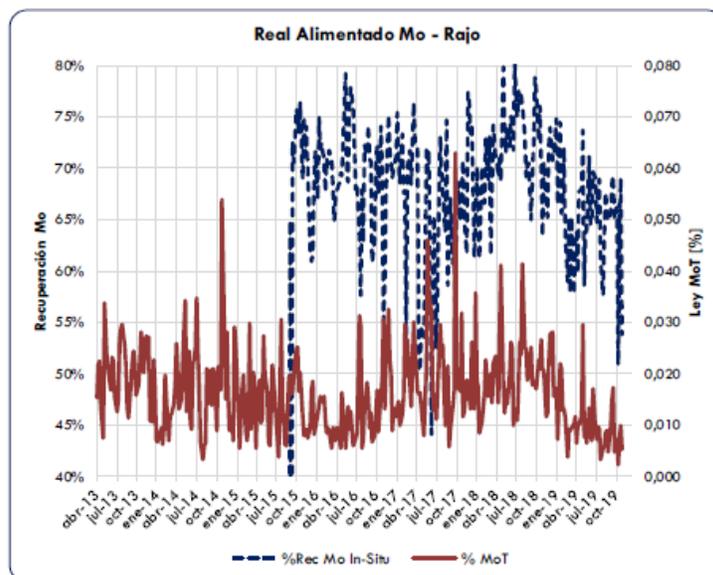


Figura 60. Gráfico ley/recuperación in-situ Mo Real Alimentado de mina rajo.

Respecto al mineral proveniente de la mina subterránea, se observa una baja constante de la recuperación en Mo in-situ desde el período 2013 a 2018, bajando desde un 70% a un 65%. Al igual que con la ley, la situación se revierte a partir de 2019, con un alza que llega hasta el 75%, siendo incluso mayor a los resultados de 2013 (Figura 61).

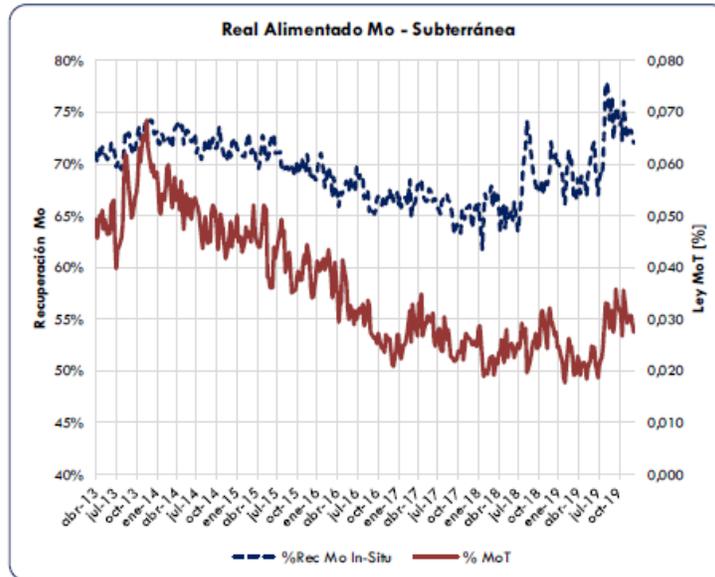


Figura 61. Gráfico ley/recuperación in-situ Mo Real Alimentado de mina subterránea.

5.2.2.2 Origen del Mineral

Respecto al origen de mineral, la razón de alimentación de mineral entre rajo y mina subterránea se ha mantenido estable y cercana al 60%-40%, respectivamente, con una leve alza en el último año, dejando la razón en torno al 64%-36% (Figura 62).

La Tabla 13 resume estadísticamente el origen de mineral desde 2014 a 2019.

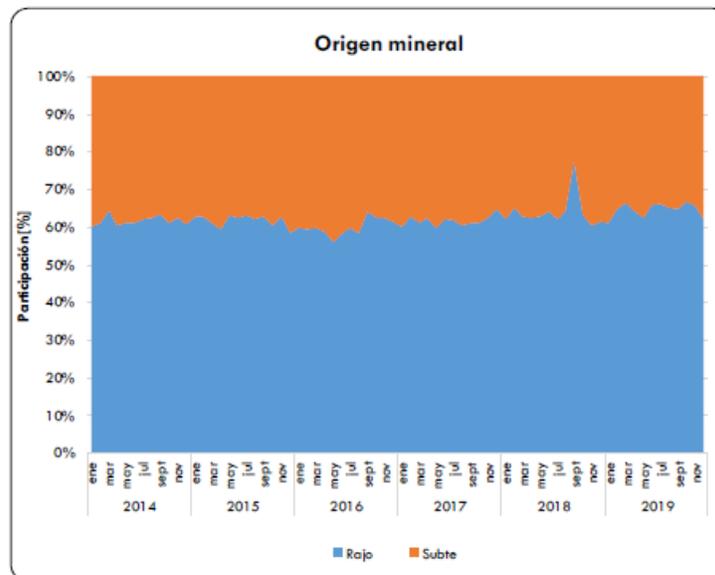


Figura 62. Gráfico de origen mineral rajo y mina subterránea.

Tabla 13. Estadística origen de mineral 2014-2019.

Participación		
	Subterránea	Rajo
Promedio	61%	39%
Mínimo	3%	10%
Máximo	90%	97%
Desviación estándar	8%	8%
Coefficiente de variación	13%	21%

5.2.2.3 Tratamiento

En la Figura 63, se muestra el desglose de las toneladas por hora tratadas por cada planta de molienda. La proporción de tratamiento de todas las plantas de molienda se ha mantenido estable en el periodo 2013-2019. A su vez, el promedio del tratamiento total se mantiene cercano a 4.100 toneladas por hora durante todo el período como se observa en la Tabla 14.

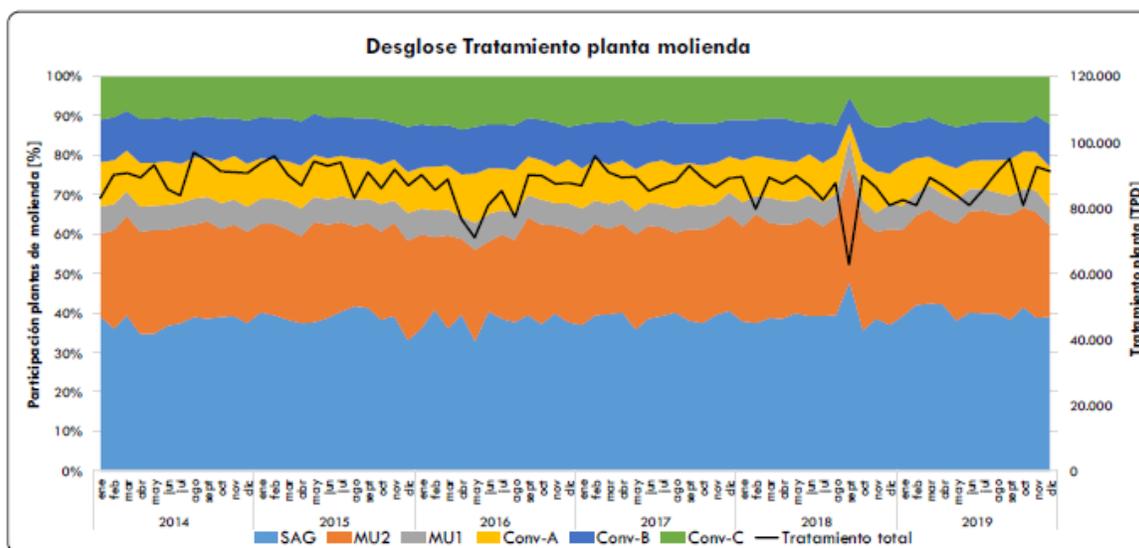


Figura 63. Tratamiento horario de molienda por planta.

Tabla 14. Estadística del tratamiento horario de molienda.

Tratamiento (tph)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2014-2019
Promedio	4102	4214	4045	4095	4015	4092	4095
Mínimo	3444	3743	3098	3414	3098	3322	3098
Máximo	4740	5567	4459	4491	4442	4566	5567
Desviación estándar	222	232	271	182	232	238	238
Coefficiente de variación	5%	6%	7%	4%	6%	6%	6%

5.2.2.4 Grado de molienda

En la Tabla 15 se expone el P80 logrado en las distintas líneas de molienda durante el período de análisis, observándose claramente que la sección SAG + MU2 produce un producto más fino que las otras dos secciones, con una diferencia aproximada de 40 μm .

Tabla 15. Grado de molienda flotación colectiva periodo 2014-2019.

P80 (μm)	SAG + MU2	Conv A + MU1	Conv B-C
Promedio	211	250	246
Mínimo	150	180	184
Máximo	327	316	354

En la Figura 64, se presenta el P80 ponderado de alimentación a flotación colectiva, cuyo valor se encuentra en torno a 225 μm , pero con una clara disminución desde 2014 a 2019, desde 235 μm a bajo los 220 μm (Tabla 16).

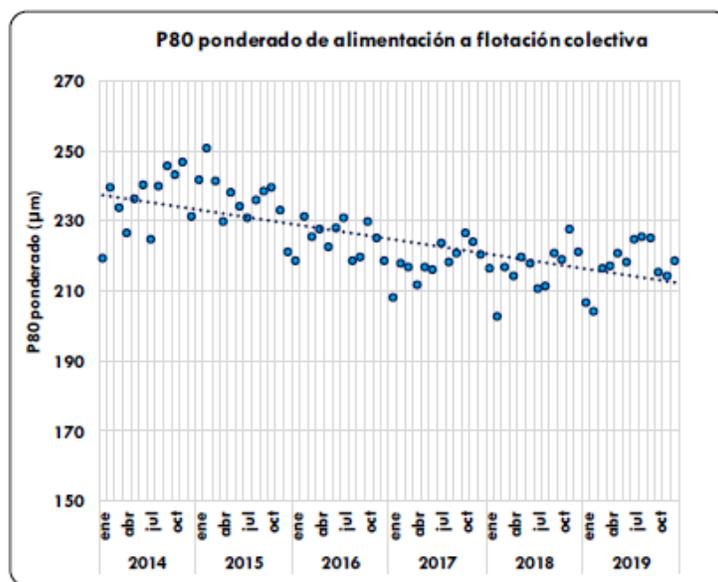


Figura 64. Granulometría de alimentación a flotación colectiva.

Tabla 16. Estadística granulometría de alimentación flotación colectiva.

P80 alimentación flot colectiva (tph)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2014-2019
Promedio	236	236	225	218	215	218	225
Mínimo	222	221	218	208	203	202	202
Máximo	247	250	231	227	227	230	250
Desviación estándar	8	7	5	5	6	7	11
Coefficiente de variación	3%	3%	2%	2%	3%	3%	5%

5.2.3 Muestreo en Planta

Adicionalmente a los resultados del análisis de diagnóstico, se realizó un muestreo en la planta de flotación selectiva de molibdeno en septiembre de 2019. Con estos resultados, se buscaba conocer el comportamiento de la planta a través de un balance de finos y de materiales. Los resultados entregados por el laboratorio se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Leyes y concentración de sólidos en peso obtenidas por muestreo en planta División Andina, septiembre de 2019.

Identificación de muestra	Experimental				
	CuAA, %	MoAA, %	FeAA, %	INSOL. %	Cp, %
Conc G-cell	12.2	31.3	10.0	4.7	12.6
Conc Barrido	27.9	4.0	25.	4.1	4.9
Conc Columna Corta	16.6	21.8	15.4	4.8	8.1
Conc Columna 1, 2 limpieza	20.8	16.4	18.8	4.7	11.0
Conc Columna 2, 2 limpieza	22.2	15.0	19.9	4.9	11.5
Conc Columna 2, 3 limpieza	10.6	33.0	9.4	4.3	22.6
Conc Columna 1, 3 limpieza	11.4	35.0	10.0	4.4	17.9
Concentrado 300	28.9	1.3	28.8	4.3	15.8
Concentrado 500	28,7	4.3	26.2	3.5	20.9
Alimentación G-cell	15.9	26.4	13.3	4.1	5.4
Alimentación planta	27.7	0.36	30.6	4.9	32.2
Alimentación 300	28.0	0.32	30.2	3.8	30.4
Alimentación 500	28.3	0.60	29.9	4.4	28.0
Alimentación Columna Corta	25.7	7.0	23.1	3.3	3.0
Alimentación 2 limpieza	29.3	5.7	25.4	4.0	7.0
Cola G-cell	19.4	20.5	17.4	4.4	3.2
Cola Columna Corta	31.0	3.1	26.5	3.3	3.6
Cola 1 limpieza	30.0	0.35	28.5	4.0	10.5
Cola Columna 1, 2 limpieza	30.5	2.2	27.1	3.8	6.7
Cola Columna 2, 2 limpieza	29.8	1.8	27.0	3.5	7.4
Cola 300	27.2	0.074	31.1	4.4	24.9
Cola 500	27.1	0.082	30.6	4.2	26.4
Cola general	27.5	0.092	30.5	4.3	32.2

A partir de las leyes proporcionadas, consideraciones y supuestos, se efectuó un balance de finos, y posteriormente un balance de materiales, lo cual resultó infructuoso por cuanto los valores que surgían del mismo no tenían sentido físico, o bien se alejaban totalmente de la información histórica que posee la Planta de Flotación Selectiva.

Respecto al muestreo en planta, se puede considerar lo siguiente:

- A modo de ejemplo, el balance tentativo de finos y de masa otorgaba a la cola de la 1° limpieza una concentración de sólidos en peso menor al 5%, lo que si bien es un indicador de la gran dilución que tenía ese flujo, escapa significativamente de la realidad en cualquier planta de molibdeno.
- Asimismo, de acuerdo con los resultados reportados por el Respmet entre agosto y octubre de 2019, el día del muestreo reportó una ley de molibdeno en el concentrado final de la flotación selectiva de un 26.5%, valor que se encuentra fuera del 95% de los datos registrados en tres meses, como se ve en la Figura 65. Esto permite concluir que los resultados obtenidos en ese día no son representativos de la condición normal de la planta.

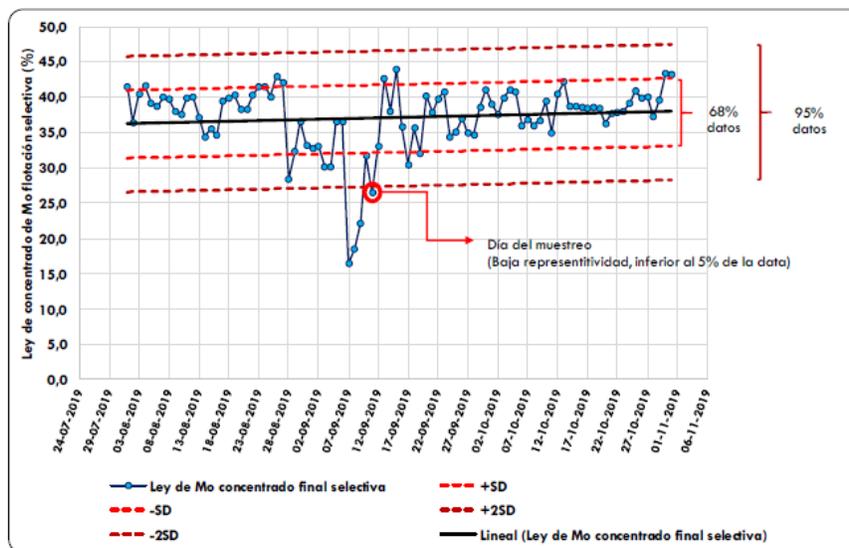


Figura 65. Resultados de ley de Mo en concentrado final de flotación selectiva, agosto-octubre de 2019.

- Con base en estos hallazgos, se vuelve de gran importancia requerir de más de un muestreo para poder realizar balances y posteriores análisis, requiriendo además de la obtención de leyes y concentraciones de sólidos en todas las entradas y salidas de las etapas de flotación. Además, se debe cerciorar que en los días de muestreo se encuentren las condiciones operativas adecuadas para poder realizar una toma de muestras representativa.

5.2.4 Alternativas de Mejora

Luego del análisis de diagnóstico realizado, se han podido rescatar tres importantes factores que inciden en la recuperación de molibdeno en la planta de flotación selectiva, que corresponden a:

- La ley de Mo en el concentrado mixto (o ley de cabeza).
- El porcentaje de liberación de Mo en el concentrado mixto.
- La concentración de sólidos en peso del concentrado mixto y de la alimentación a las etapas de flotación.

Si bien es cierto, la ley de cabeza es inherente al mineral del yacimiento y, por ende, no puede modificarse, esto no ocurre con los otros dos factores, sobre los cuales sí se puede actuar a nivel operacional.

En vista de ello, se proponen los siguientes planes de acción que pueden ser adoptadas por la planta a corto, y a mediano/largo plazo, para revertir la caída en la recuperación de molibdeno.

5.2.4.1 Gestión de Agua

La baja en la concentración de sólidos en peso del concentrado mixto se debe principalmente a la ausencia de un espesador en la etapa de flotación colectiva. Sin embargo, si se consideran los resultados obtenidos del muestreo en planta, el Cp de la cola de la primera limpieza que también ingresa a la flotación primaria es igual de crítico a la hora de implementar una solución para la recuperación de Mo. Un bajo Cp no solo disminuye los tiempos de residencia del mineral en la flotación selectiva, sino que también provoca una mayor sedimentación de piritita en todos los mineroductos, al encontrarse las partículas gruesas más incomunicadas unas de otras. La solución directa observada para evitar la obstrucción en los flujos de la planta es, contradictoriamente, agregar más agua, lo que profundiza aún más el problema.

Para revertir esta situación a corto plazo se sugiere alcanzar un Cp de alimentación a la flotación primaria selectiva del 40%, 8 puntos porcentuales por sobre el obtenido en el muestreo. Para ello se debe aumentar el Cp de la cola de flotación primaria, vale decir, disminuir el alto consumo de aguas de dilución y de lavado en cada una de las etapas de flotación.

Alternativamente, se debe recalcular la capacidad de los espesadores intermedios, una vez que se logre controlar la excesiva adición de agua en los circuitos de limpieza. Estos equipos operan actualmente como cajones de traspaso y no como concentradores de masa, perdiéndose el real sentido de estos.

5.2.4.2 Espesadores

A partir del análisis anterior, se recomienda como medida de mediano a largo plazo la estudiar la factibilidad de implementar una etapa de espesamiento de concentrado mixto. Dentro los beneficios que tiene la implementación del espesamiento de cabeza se encuentran:

- Control de porcentaje de sólidos del concentrado mixto y de la cola de la 1° limpieza, lo que se traduce en la optimización de los tiempos de residencia de la etapa primaria de la flotación selectiva con el consiguiente aumento en la recuperación de Mo.
- Efecto ecualizador ante fluctuaciones de ley, mineralogía, granulometría y/o pH del concentrado primario.
- Menor consumo de reactivos depresores y/o gases, al manejar flujos con menor proporción de agua, así como también ahorros energéticos en el porteo de pulpas.

5.3 Modelo de Procesos – Recuperación Primaria Colectiva Cu y Mo

5.3.1 Metodología

Considerando la información geometalúrgica con la que cuenta División Andina, se desarrolló una metodología de estimación de la recuperación metalúrgica considerando las siguientes variables:

- Origen del mineral alimentado a la concentradora, en términos de si éste proviene de la mina subterránea o rajo.
- Información geometalúrgica del mineral alimentado a planta por períodos, en términos de dominio geometalúrgico de Cu y Mo.
- Granulometría de alimentación del mineral a flotación (P80 producto de molienda/clasificación).
- Ley de cabeza de cobre y molibdeno por mineral.
- Recuperación máxima (R_{inf} , %) y constante cinética k (1/min), obtenidos desde las pruebas cinéticas de flotación primaria de laboratorio.
- Constante cinética Kp (1/min), obtenida desde muestreos cinéticos de la planta concentradora.
- Tiempo de residencia del mineral en la etapa de flotación primaria, ajustado por UGM de Cu de mineral.

Considerando estas variables, el procedimiento contó con dos objetivos principales:

- Establecer una metodología de construcción de un modelo de procesos predictivo de la recuperación metalúrgica, másica y ley primaria, 100% fenomenológico a partir de la información geometalúrgica In-situ.
- Obtener la validación de la metodología, que se realiza utilizando la información actual de los minerales de la mina subterránea y rajo que han sido tratados durante los años 2017 a 2019.

En la Figura 66 se presenta un diagrama de la flotación colectiva de planta la concentradora donde se identifica el área modelada.

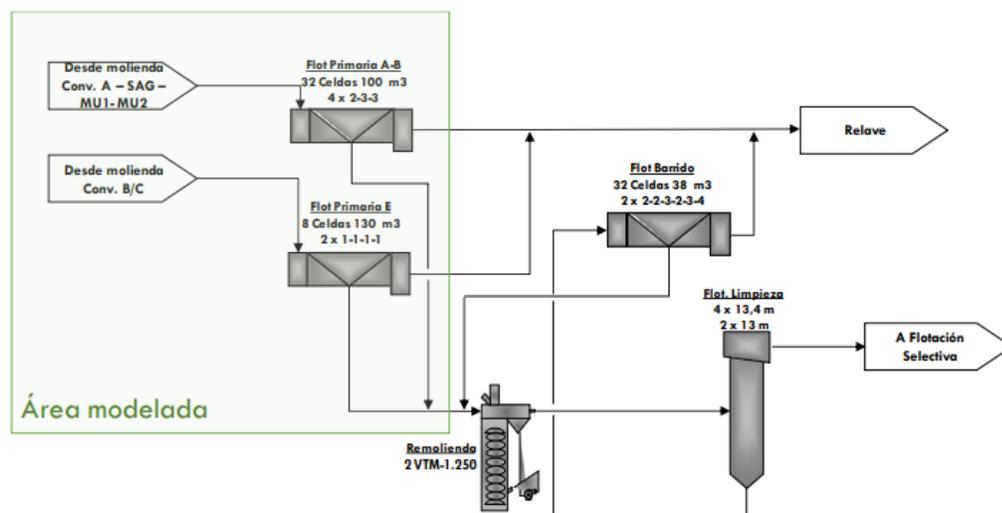


Figura 66. Área modelada flotación primaria.

5.3.2 Desarrollo de modelo predictivo de recuperación primaria

En primera instancia, se presentan los antecedentes de pruebas de flotación primaria geometalúrgicas, utilizadas en el desarrollo del modelo predictivo de recuperación. Esto es válido para el desarrollo de los modelos de cobre y molibdeno.

5.3.2.1 Determinación de constantes cinéticas por UGM

Se buscó determinar a partir del comportamiento de las curvas cinéticas de flotación de laboratorio, la constante cinética k y R_{inf} (%), representativas del comportamiento del mineral en planta para cada UGM de Cu tanto para los minerales de la mina subterránea como para el rajo.

El modelo cinético utilizado para el análisis fue el modelo de García y Zúñiga, que se describe a continuación [12]:

$$R_{primaria}(\%) = R_{inf} \cdot (1 - e^{-k \cdot t})$$

Donde:

$R_{primaria}$ (%): Recuperación del elemento en prueba de flotación primaria de laboratorio.
 R_{inf} (%): Recuperación máxima del elemento.
 k (1/min): Constante cinética del modelo de flotación primaria.
 t (min): Tiempo de flotación.

Definida la constante cinética k , se determina un nuevo R_{inf} (%) para cada UGM de Cu. Para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$R_{inf} = \frac{R_{lab}}{1 - e^{-k \cdot t}}$$

Donde:

R_{inf} (%): Recuperación máxima del elemento.
 R_{lab} (%): Recuperación del elemento en prueba de flotación primaria de laboratorio.
 k (1/min): Constante cinética promedio por UGM de las pruebas de laboratorio.
 t (min): Tiempo de flotación de laboratorio.

5.3.2.2 Análisis del comportamiento de la recuperación máxima R_{inf} en función del tamaño característico P80

El análisis del comportamiento del parámetro R_{inf} (%), en función del tamaño característico P80 (μm) de las muestras, se realizó considerando las pruebas cinéticas de flotación primaria que cuentan con distintas granulometrías de alimentación (entre 150 y 350 μm), y que son realizadas bajo el estándar geometalúrgico.

Utilizando el modelo cinético de García y Zúñiga, se realizaron las siguientes etapas:

- Se determinó el parámetro de recuperación máxima R_{inf} (%) para cada prueba, considerando un tiempo de flotación de 11 minutos, mediante la ecuación:

$$R_{inf} = \frac{R_{lab}}{1 - e^{-k \cdot t}}$$

Donde:

R_{inf} (%): Recuperación máxima del elemento.

R_{lab} (%): Recuperación del elemento en prueba de flotación primaria de laboratorio.
 k (1/min): Constante cinética promedio de las pruebas de laboratorio.
 t (min): Tiempo de flotación de laboratorio (11 min).

- Una vez determinado el R_{inf} por muestra, se determinó una correlación lineal que representa el comportamiento de la recuperación en función del tamaño característico P80 por tramo (150-180 μm , 180-210 μm , 210-240 μm , 240-270 μm y 270-350 μm).
- Finalmente, se obtuvo el valor de la pendiente de recuperación en función del P80, para el total de las pruebas (" m " global).

5.3.2.3 Determinación de vector Factor de Escala y K_p

La determinación del vector factor de escala y la obtención de la constante cinética de planta K_p se obtuvo desde muestreos cinéticos realizados a las plantas de flotación primaria.

En el caso de este estudio, no fue posible disponer de esta información, por lo que se utilizó una metodología de prueba y error con K_p obtenidos desde otras plantas concentradoras. De acuerdo con las referencias, se pudo verificar que los valores de K_p no difieren mucho entre distintas plantas concentradoras de sulfuros, obteniendo valores de Cu cercanos a 0.15 min^{-1} y de Mo de 0.10 min^{-1} .

En el caso del vector Factor de Escala, este se obtuvo al comparar las cinéticas de planta con la de laboratorio, esta última realizada con pulpa tomada desde la alimentación a flotación primaria en planta.

La Figura 67 presenta un ejemplo de vector factor de escala obtenido de una planta concentradora con un tratamiento promedio de 50 kTPD.

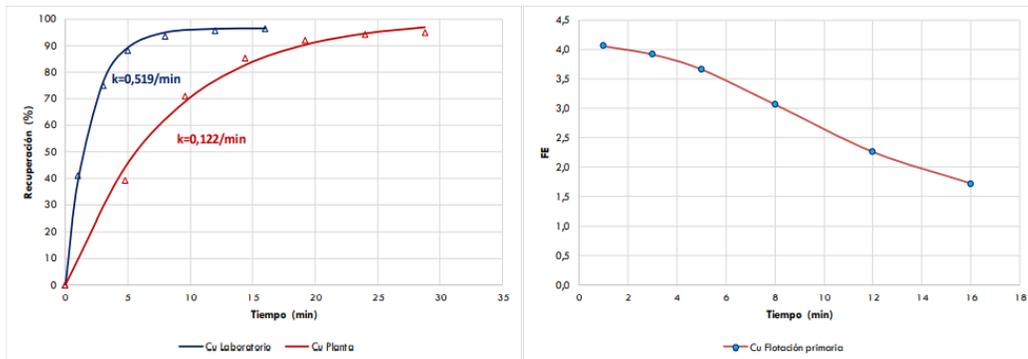


Figura 67. Ejemplo de K_p y vector Factor de Escala.

De la Figura 67 se observa cómo la cinética en planta es más lenta que la de laboratorio para la misma pulpa de mineral. A su vez el vector Factor de Escala no es constante y es función del tiempo de flotación de laboratorio.

En el presente estudio, se evaluaron distintos K_p por elemento y planta de flotación, comparando los resultados del modelo con los resultados reales de la planta concentradora, y escogiendo el K_p con el cual se obtuvieron las menores tendencias de error mensual como anual.

5.3.2.4 Modelo de Recuperación primaria de Cu y Mo

Finalmente, el modelo predictivo de la recuperación primaria, para los elementos Cu y Mo, se determinó incluyendo la influencia de los siguientes parámetros:

- Recuperación in-situ del modelo geometalúrgico, inferida desde la recuperación de las pruebas de flotación primaria.
- Tiempo de flotación primaria en planta, en función del tratamiento, concentración de sólido de la pulpa alimentada a flotación y gravedad específica del mineral.
- Granulometría de alimentación, definida por el tamaño característico P80.
- Geología del mineral alimentado a planta, definida para las UGM.

Las expresiones que rigen el comportamiento de la recuperación primaria en planta son:

$$R_{primaria}(\%) = R_{inf} \cdot (1 - e^{-K_p \cdot t_{planta}})$$

Donde:

K_p (1/min):	Constante cinética de la planta
t_{planta} (min):	Tiempo de residencia del mineral en la etapa de flotación primaria, calculada desde los parámetros de planta tales como volumen de celdas, flujo total de pulpa, afectado por el porcentaje de volumen útil.
R_{inf} (%):	Recuperación máxima corregida del mineral en planta.

La R_{inf} corregida del mineral por granulometría se calculó como:

$$R_{inf}(\%) = R_{inf}(\%)_{(P80=210\mu m)} + m \cdot (P80_{planta} - 210)$$

Donde:

$P80_{planta}$ (μm):	Tamaño característico, producto de la planta de molienda respectiva.
-----------------------------	--

m : Pendiente de recuperación máxima, según P80.
 $R_{inf}(\%)$ (P80 = 210 μm): Recuperación sin corregir el P80 de diseño.

Para esto, la $R_{inf}(210 \mu\text{m})$ se calculó como:

$$R_{inf}(\%)_{(P80=210\mu\text{m})} = \frac{R_{in\ situ}Cu(\%)}{(1 - e^{-K_p \cdot t_{planta}})}$$

Donde:

$R_{in\ situ}Cu(\%)$: Recuperación in-situ de Cu, obtenida desde el modelo de bloques.

5.3.2.5 Base de cálculo para los modelos de Cu y Mo

A continuación, se presentan las bases de cálculo del modelo:

- Parámetros globales
 - Gravedad específica del mineral : 2.7
- Flotación primaria AB
 - N° de líneas : 4
 - N° de celdas por línea : 8 celdas
 - Volumen nominal por celda : 100 m^3
- Flotación primaria E
 - N° de líneas : 2
 - N° de celdas por línea : 4 celdas
 - Volumen nominal por celda : 130 m^3

5.3.2.6 Factores de tiempo de residencia para flotación primaria colectiva

Por efectos operativos, básicamente capacidad de bombas y volumen del cajón de concentrado primario, la operación modifica el tiempo de residencia en las celdas de acuerdo con la recuperación másica, que se traduce en una restricción operacional efectiva que, para efectos de este estudio, se representa disminuyendo el tiempo de flotación de acuerdo con el comportamiento particular de cada UGM.

En virtud de esto se expone a continuación un factor que se considera por cada UGM de los minerales alimentados a la concentradora.

- Factor de tiempo de residencia para minerales por UGM de Cu en flotación primaria:
 - UGM 1: 0.8
 - UGM 2: 0.85
 - UGM 3: 0.6
 - UGM 4: 0.9
 - UGM 5: 0.6

Las bases de cálculo para los factores de tiempo de residencia de minerales fueron definidas tomando en cuenta las prácticas industriales utilizadas en la flotación primaria, con el fin de asegurar la calidad del concentrado primario y una masa acotada alimentada al circuito de limpieza.

5.3.2.7 Análisis de estadística operacional

Para validar los modelos de recuperación metalúrgica, recuperación másica y ley de concentrado primario de Cu y Mo, se utilizó información obtenida desde la estadística operacional de planta (sistemas en línea e informes diarios) y la caracterización del mineral alimentado a la concentradora durante enero de 2017 a diciembre de 2019 (36 meses).

La información extraída de los datos operacionales y utilizados en la validación, tanto de la etapa de molienda como de la planta concentradora, se detalla a continuación:

- Planta de Molienda
 - Tonelaje de mineral tratado (tph).
 - Granulometría producto de molienda/clasificación (P80).
 - Participación de UGM de Cu y Mo.
 - Finos de Cu y Mo alimentados a la concentradora.
- Planta de Flotación
 - Ley de Cu (%) en alimentación, concentrado y cola de la flotación primaria.
 - Recuperación In-Situ por UGM de Cu, de reportes de mineral real alimentado a planta.
- Se consideraron los siguientes criterios de filtrado de la información:

- Se utilizaron los días con un tratamiento instantáneo en molienda mayor a:
 - Planta SAG : 1,177 (tph)
 - Planta MU2 : 746 (tph)
 - Planta MU1 : 192 (tph)
 - Planta Conv A : 264 (tph)
 - Planta Conv B : 296 (tph)
 - Planta Conv C : 339 (tph)

- Se descartaron los días sin información de:
 - Ley de alimentación, concentrado y/o cola.
 - Recuperación in-situ de los elementos de interés.
 - Granulometría de alimentación a flotación (P80).
 - Información de concentración de sólidos en alimentación a flotación primaria.

5.3.3 Resultados del modelo predictivo de recuperación primaria de cobre

5.3.3.1 Análisis de estadística operacional

En las Figura 68Figura 69, se observa el aporte de minerales por origen (rajo-subterránea) con sus respectivas UGM y ley de Cu.

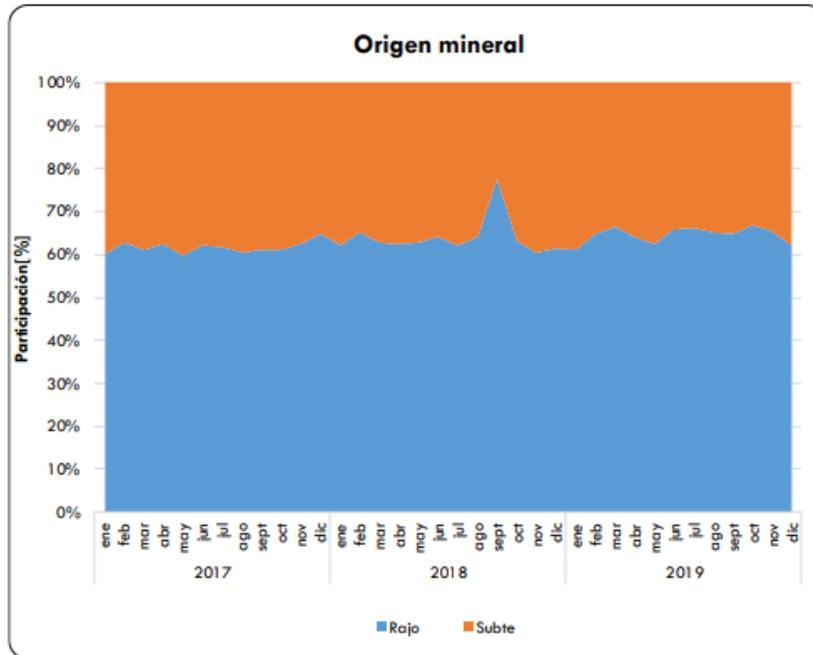


Figura 68. Origen del mineral.

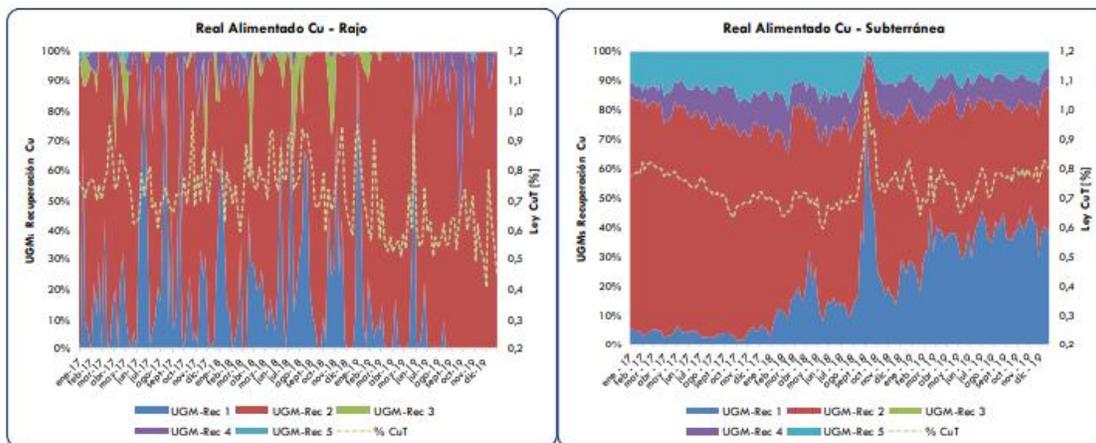


Figura 69. UGM de Cu Alimentadas a concentradora.

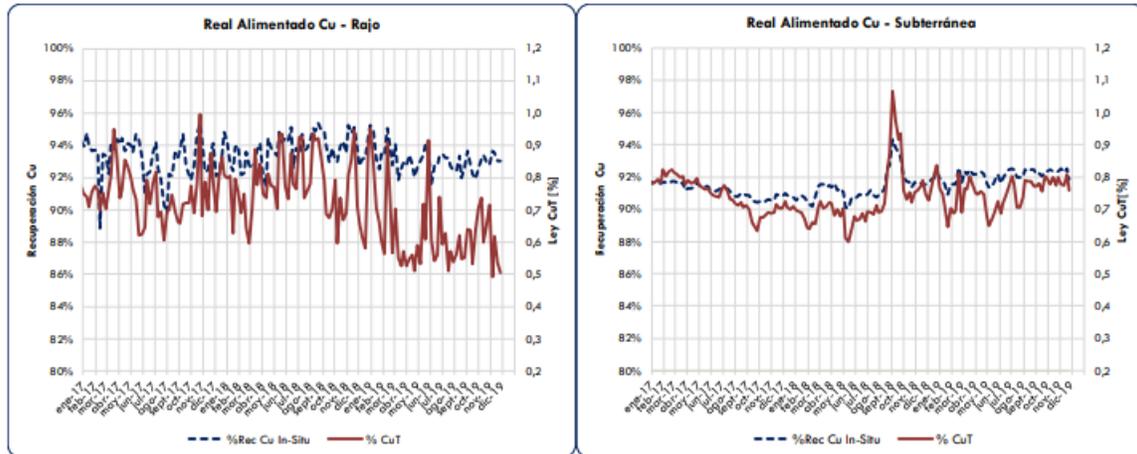


Figura 70. Ley y recuperación In-situ de Cu.

Se observa en las figuras anteriores, que el aporte de los minerales tanto de la mina subterránea como el rajo se mantiene constante para los años estudiados, con un promedio de 60/40 para los minerales rajo/subterránea.

En cuanto a la participación de las UGM de Cu por cada una de las minas, se tiene que las UGM predominantes son las 1 y 2, con una menor participación de las 4 y 5, estas últimas aportadas principalmente por la mina subterránea.

En la mina rajo se muestra además que la participación de la UGM 1 ha ido decreciendo en el año 2019, en comparación a los años 2017 y 2018, tendencia inversa en la mina subterránea que ha visto un crecimiento en la participación de la UGM 1.

En cuanto a la recuperación In-situ y ley del mineral, estos atributos presentan “peaks” a la vez con la mayor participación de la UGM 1 de cobre (mina subterránea) y presenta una mayor dispersión en los minerales del rajo (Figura 70).

La Figura 71 muestra el tratamiento instantáneo de las plantas de molienda SAG, MU1, MU2, Conv A, Conv B y Conv C en tph.

Este análisis corresponde a los datos filtrados, según lo descrito en la sección anterior. Los promedios para el periodo analizado en toneladas por hora son de 1,576 SAG, 979 MU2, 241 MU1, 410 Conv A, 420 Conv B y 469 Conv C.

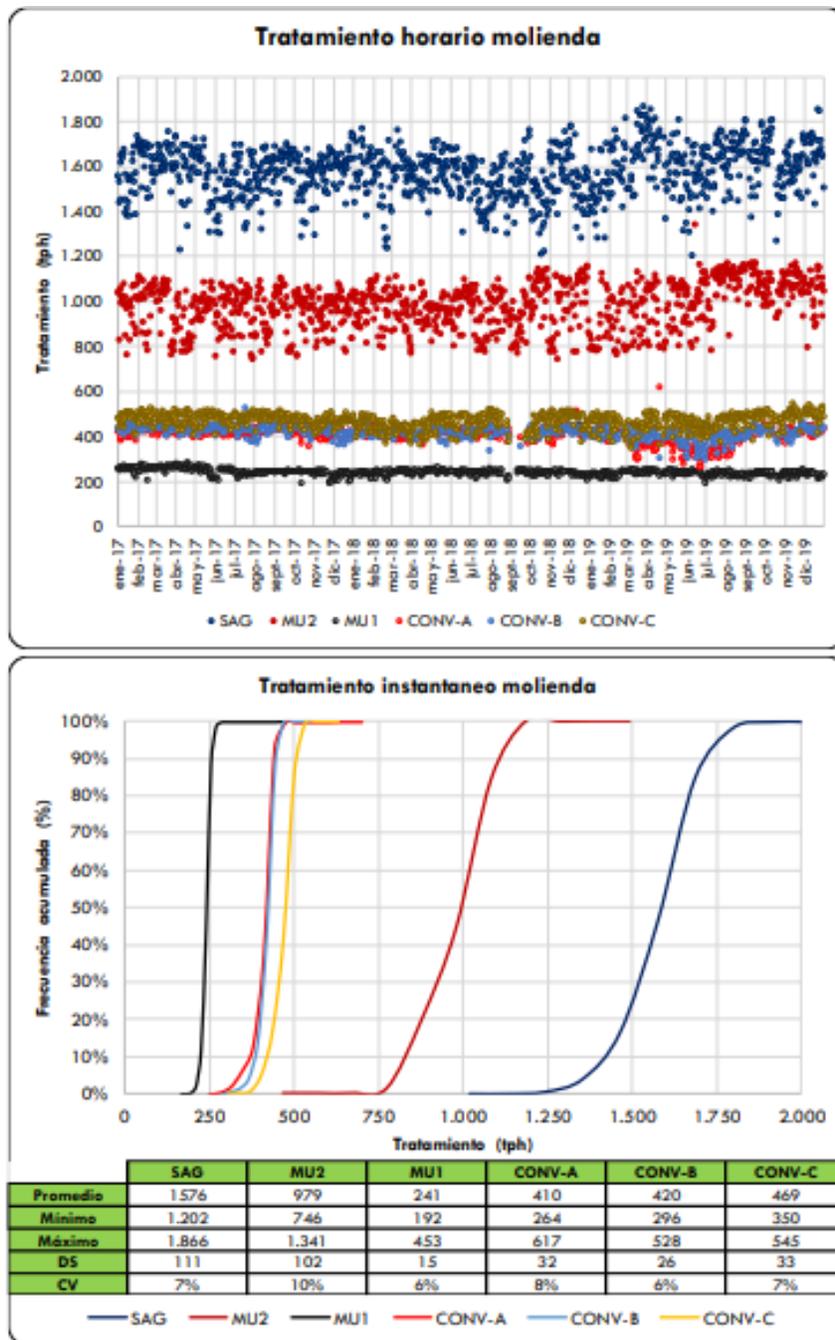


Figura 71. Tratamiento plantas de molienda.

La Figura 72 muestra la granulometría de la alimentación a flotación expresado como P80. Para la flotación primaria A-B el P80 alimentado es en promedio 211 μm , casi 30 μm inferior al P80 alimentado a la flotación primaria E (239 μm).

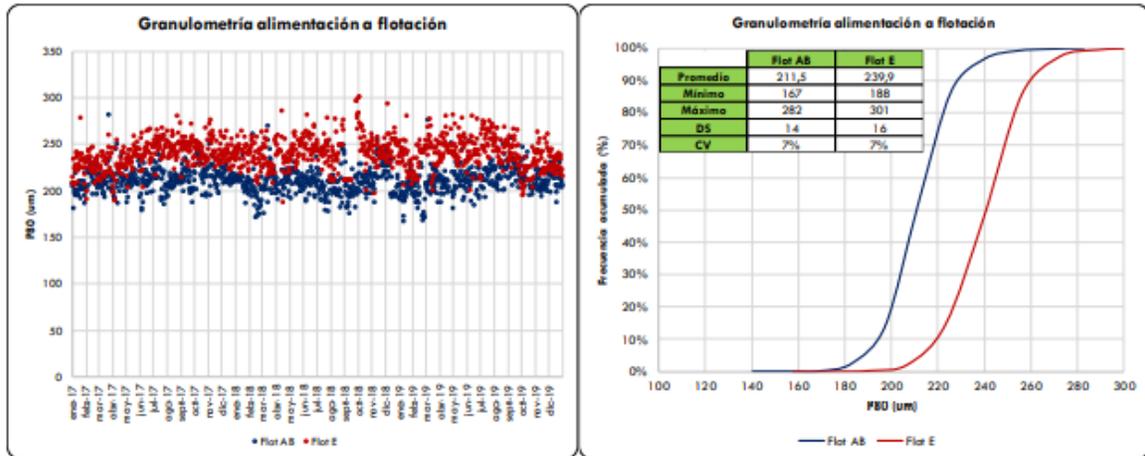


Figura 72. Grado de molienda en plantas de molienda.

5.3.3.2 Determinación de constantes cinéticas de planta (K_p)

Empleando la metodología de prueba y error se logró obtener el parámetro K_p (1/min) que minimiza la diferencia entre los valores que arroja el modelo y las recuperaciones primarias de planta. El resultado se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. K_p Cu.

Kp Cu (1/min)	
Planta AB	Planta E
0.140	0.150

Como se mencionó en secciones anteriores, se han obtenido valores de K_p cercanos a valores utilizados en modelos de recuperación primaria desarrollados anteriormente, sin embargo, se recomienda verificar y confirmar estos valores mediante muestreos cinéticos de las plantas de flotación AB y E.

Para el desarrollo de muestreos industriales, se recomienda lo siguiente:

- Verificar que la planta industrial se encuentre operando en régimen.
- Identificar la participación de cada UGM que está siendo alimentada a la concentradora.
- Para obtener información precisa y exacta del comportamiento de una UGM en planta, se recomienda muestrear cuando alguna de estas tenga una participación cercana al 100%.
- Determinar los puntos de muestreos críticos.

- Definir la cantidad mínima de masa y número de incrementos que conforman cada muestra.
- Contar con controles de calidad en la toma de muestras y supervisión para la correcta ejecución de cada protocolo.

5.3.3.3 Determinación de pendiente de la recuperación máxima R_{inf} en función del tamaño característico P80 para Cu [13].

La Tabla 19 muestra el comportamiento de la recuperación máxima R_{inf} (%) respecto al grado de molienda de los minerales por UGM de Cu.

Tabla 19. Pendientes “m” de corrección R_{inf} versus P80 para Cu.

Ajuste por P80 Minerales Mina				
Elemento	Cu			
UGM	150 – 180 μm	180 – 210 μm	210 – 240 μm	240 – 270 μm
1	-0.026	-0.031	-0.056	-0.064
2	-0.035	-0.055	-0.059	-0.082
3	-0.033	-0.046	-0.050	-0.060
4	-0.036	-0.047	-0.059	-0.077
5	-0.009	-0.009	-0.052	-0.189

Se observa que a medida aumenta el P80 de alimentación a flotación las pendientes de corrección de R_{inf} aumentan. Es decir, la pérdida de recuperación por variaciones de P80 es mayor a medida que el P80 crece.

5.3.3.4 Validación del modelo de recuperación primaria de Cu

La Figura 73 y Tabla 20 presentan la validación del modelo de procesos de recuperación primaria para Cu.

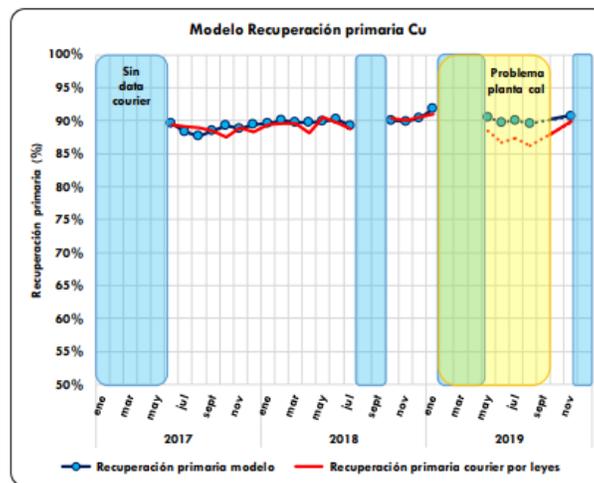


Figura 73. Resultados modelo de recuperación primaria de Cu.

Tabla 20. Resultados mensuales/anuales recuperaciones primarias de Cu.

Año	Modelo	Courier por leyes	Error Anual	Error Mensual Absoluto
2017	88.7%	88.6%	0.11%	0.01% / 2.0%
2018	89.9%	89.8%	0.09%	0.18% / 2.0%
2019	91.6%	90.9%	0.80%	0.76% / 1.02%

Respecto a estos resultados, se puede comentar lo siguiente:

- La recuperación planta con la que se compara el modelo desarrollado corresponde a la recuperación calculada a partir de las leyes registradas por los equipos Courier. Esto se debe a que no se dispone de un quiebre entre la recuperación primaria y el circuito limpieza-barrido en los reportes diarios de la planta concentradora (RespMet).
- Se identifican periodos tanto en 2017, 2018 y 2019 en los cuales no es posible validar el modelo por no contar con datos con los cuales comparar sus resultados (leyes Courier). Además, se precisa el periodo de 2019 (feb-oct) en que existieron problemas con la planta de cal, periodo en el cual se adicionó este reactivo de forma manual. Para fines de 2019 se observa que el modelo nuevamente converge con los resultados de la planta, lo que coincide con la fecha en la que se regularizó la adición de cal en planta.
- Para los tres años analizados (excluyendo periodo con problemas en planta de cal), el modelo presenta un error anual menor a 0.5% con un rango mensual de 0 a 2% absoluto.

5.3.4 Resultados del modelo predictivo de recuperación primaria de molibdeno

5.3.4.1 Análisis de estadística operacional

En la Figura 74 se observa la recuperación primaria In-situ de los minerales de la mina rajo y subterránea de molibdeno.

En el caso del Mo se presenta mayor variabilidad de ley en los minerales provenientes del rajo y un decrecimiento en la ley de alimentación en el último tiempo. Por su parte la mina subterránea, presenta menor variabilidad en la ley de alimentación a planta y esta se ha incrementado en la segunda mitad de 2019.

Para ambos orígenes se nota una relación entre la ley de alimentación y la recuperación In-situ de los minerales. Mientras que el rajo ve disminuida su recuperación al mismo tiempo que su ley, la mina subterránea la ha visto incrementada en el segundo semestre de 2019.

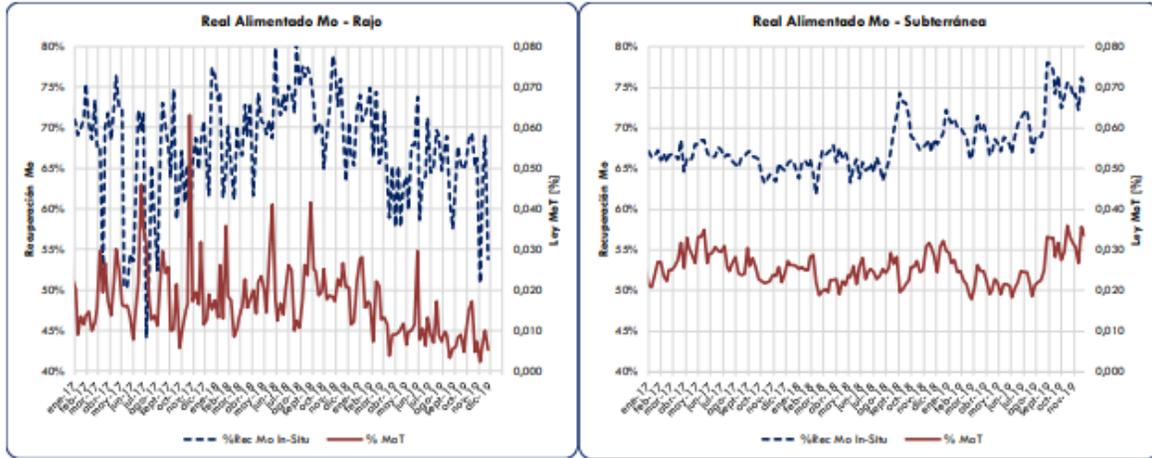


Figura 74. Ley de minerales Mo.

5.3.4.2 Determinación de constantes cinéticas de planta (K_p)

En forma similar a la obtención del K_p para Cu, se presenta el resultado de la metodología de prueba y error en la obtención del parámetro K_p (1/min) para Mo (Tabla 21).

Tabla 21. K_p Mo.

Kp Mo (1/min)	
Planta AB	Planta E
0.120	

Como se mencionó secciones anteriores, se han obtenido valores de K_p cercanos a valores utilizados en modelos de recuperación primaria desarrollados anteriormente, sin embargo, se recomienda verificar y confirmar estos valores mediante muestreos cinéticos de las plantas de flotación AB y E. En este caso las recomendaciones respecto a los muestreos son las mismas descritas en el caso del Cu.

5.3.4.3 Determinación de pendiente de la recuperación máxima R_{inf} en función del tamaño característico P80 para Mo

La Tabla 22 muestra el comportamiento de la recuperación máxima R_{inf} (%) respecto al grado de molienda de los minerales por UGM.

Tabla 22. Pendientes “m” de corrección Rinf versus P80 para Mo.

Ajuste por P80 Minerales Mina				
Elemento	Mo			
UGM	150 – 180 µm	180 – 210 µm	210 – 240 µm	240 – 270 µm
1	-0.113	-0.099	-0.147	-0.145
2	-0.069	-0.084	-0.098	-0.103
3	-0.105	-0.096	-0.242	-0.135
4	-0.054	-0.054	-0.050	-0.083
5	-0.085	-0.083	-0.134	-0.117

En el caso de la UGM 5 se ha asumido como pendiente el promedio de las otras 4 UGM, debido a la poca cantidad de pruebas que se dispone.

5.3.4.4 Validación del modelo de recuperación primaria de Mo

En el caso del Mo el modelo de proceso se ha comparado con la recuperación primaria de planta calculada a partir de los reportes RespMet y un factor de limpieza fijo de 91%. Esto se debe a que no se dispone de un quiebre entre la recuperación primaria y el circuito limpieza-barrido en los reportes diarios de la planta concentradora (RespMet). La Figura 75 y Tabla 23 muestran las recuperaciones reportadas y la recuperación primaria estimada para Mo.

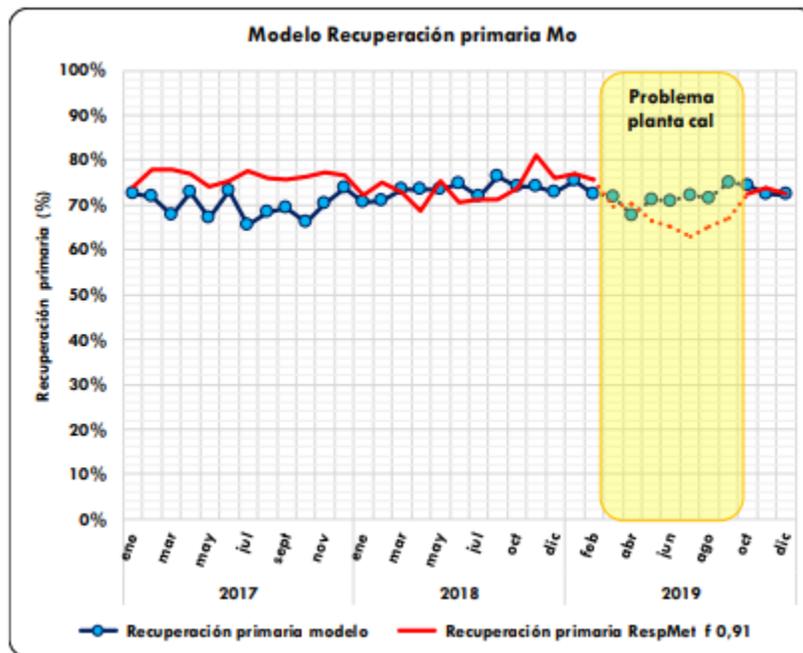


Figura 75. Resultados modelo de recuperación primaria colectiva de Mo.

Tabla 23. Resultados mensuales y anuales recuperación primaria colectiva de Mo.

Año	Modelo	Planta primaria (Respmet)	Error anual	Error Mensual Absoluto
2017	69.7%	76.4%	8.8%	2.34% / 15.8%
2018	73.2%	73.6%	0.6%	0.36% / 8.7%
2019	72.3%	70.3%	0.9%	0.3% / 2.8%

Respecto a estos resultados, se puede comentar lo siguiente:

- El modelo de procesos desarrollado obtiene errores anuales menores al 1% para los años 2018 y 2019, mientras que para 2017 el error es mayor alcanzando un 8.8%. Al igual que en modelo de Cu, el periodo de febrero a octubre de 2019 no se consideró dentro del análisis por los problemas en la adición de cal.
- Las diferencias entre el modelo de procesos y la recuperación de la planta para el año 2017 se pueden deber a los siguientes factores:
 - El factor de limpieza ocupado de 91% no necesariamente puede acercarse al real de dicho año debido posiblemente a cambios de estrategias operacionales que no se cumplieron en los años 2018-2019.
- En el caso del Mo no se utilizó la recuperación calculada desde las leyes Courier. Esto debido a que variaciones en milésimas en la cola de la etapa primaria, afecta hasta en 4 puntos porcentuales la recuperación de esta etapa, lo que se muestra a modo de ejemplo en la Tabla 24.

Tabla 24. Variación de recuperación primaria de Mo.

	Mo			
	Alimentación	Concentrado	Cola	Rec Primaria
	(%)	(%)	(%)	(%)
Caso 1	0.025	0.20	0.007	74.6%
Caso 2	0.025	0.20	0.008	70.8%
Caso 3	0.025	0.20	0.009	67.0%

5.4 Modelo de Procesos – Recuperación Másica

La metodología del modelo de recuperación másica, al igual que la recuperación metalúrgica, se basa en el escalamiento de los atributos geometalúrgicos que tienen los minerales, a través de los cuales se desarrolla el modelo de procesos a escala industrial [14].

5.4.1 Propuesta de metodología

Desde la información geometalúrgica con la que cuenta la división, se propuso desarrollar una metodología de estimación de recuperación másica primaria, que consideró las siguientes variables:

- Origen del mineral, identificando los minerales de la mina rajo y la mina subterránea.
- Información geometalúrgica del mineral alimentado a planta por períodos, promedio de recuperación másica por UGM de cobre para distintos periodos. No se dispone de UGM de recuperación másica.
- Granulometría de alimentación del mineral a flotación (P80 producto de molienda/clasificación).
- Tiempo de residencia del mineral en la etapa de flotación primaria, el cual es el mismo del modelo de recuperación metalúrgica de Cu.

El desarrollo del modelo tuvo como objetivo principal establecer una metodología de construcción de un modelo de procesos 100% fenomenológico y predictivo de la recuperación másica, a partir de la información geometalúrgica In-situ de los minerales alimentados a la concentradora.

5.4.2 Desarrollo de modelo predictivo de recuperación másica

5.4.2.1 Determinación de modelo cinético de recuperación másica

Para predecir el comportamiento de la recuperación másica, fue necesario encontrar un modelo que reprodujera su comportamiento. Un modelo cinético que ha demostrado tener buen ajuste a curvas de recuperación másica a escala laboratorio es el modelo bifásico lineal, el cual es un modelo de tres parámetros que se representa por la siguiente ecuación:

$$R_{m\acute{a}sica}(\%) = 1 - (f \cdot e^{-k_1 \cdot t} + (1 - f) \cdot e^{-k_2 \cdot t})$$

Donde:

$R_{m\acute{a}sica}(\%)$:	Recuperación másica al tiempo t.
$f(\%)$:	Fracción de masa altamente hidrofóbica.
k_1 (1/min):	Constante cinética de masa altamente hidrofóbica.
k_2 (1/min):	Constante cinética de arrastre o baja hidrofobicidad.
t (min):	Tiempo de flotación.

El escalamiento de este modelo desde el nivel laboratorio a planta industrial, requiere la definición de las constantes k_1 y k_2 , mientras que la constante f es un parámetro intrínseco del mineral, el cual depende del grado de molienda y tipo de mineral.

5.4.2.2 Determinación de constantes cinéticas por UGM de mineral

i. Fracción de masa hidrofóbica (f)

El porcentaje de masa hidrofóbica (f) se define como aquella fracción de la masa que es propensa a flotar debido a la hidrofobicidad, la cual puede ser intrínseca del mineral y/o potenciada por la adicción de reactivos. Esta fracción de masa suele flotar rápidamente en los primeros minutos de la prueba, para luego dar paso a las partículas que, sin tener alta hidrofobicidad, son flotadas preferencialmente por “arrastre” ($1-f$).

Para este estudio, se asumió que el valor de “ f ” se mantiene entre las pruebas de laboratorio y la planta industrial.

Para la determinación de “ f ” se analizaron las pruebas geometalúrgicas, observándose que este parámetro se puede estimar a partir de la recuperación másica In-situ, encontrando para cada UGM una correlación de estimación, como se presenta en la Figura 76.

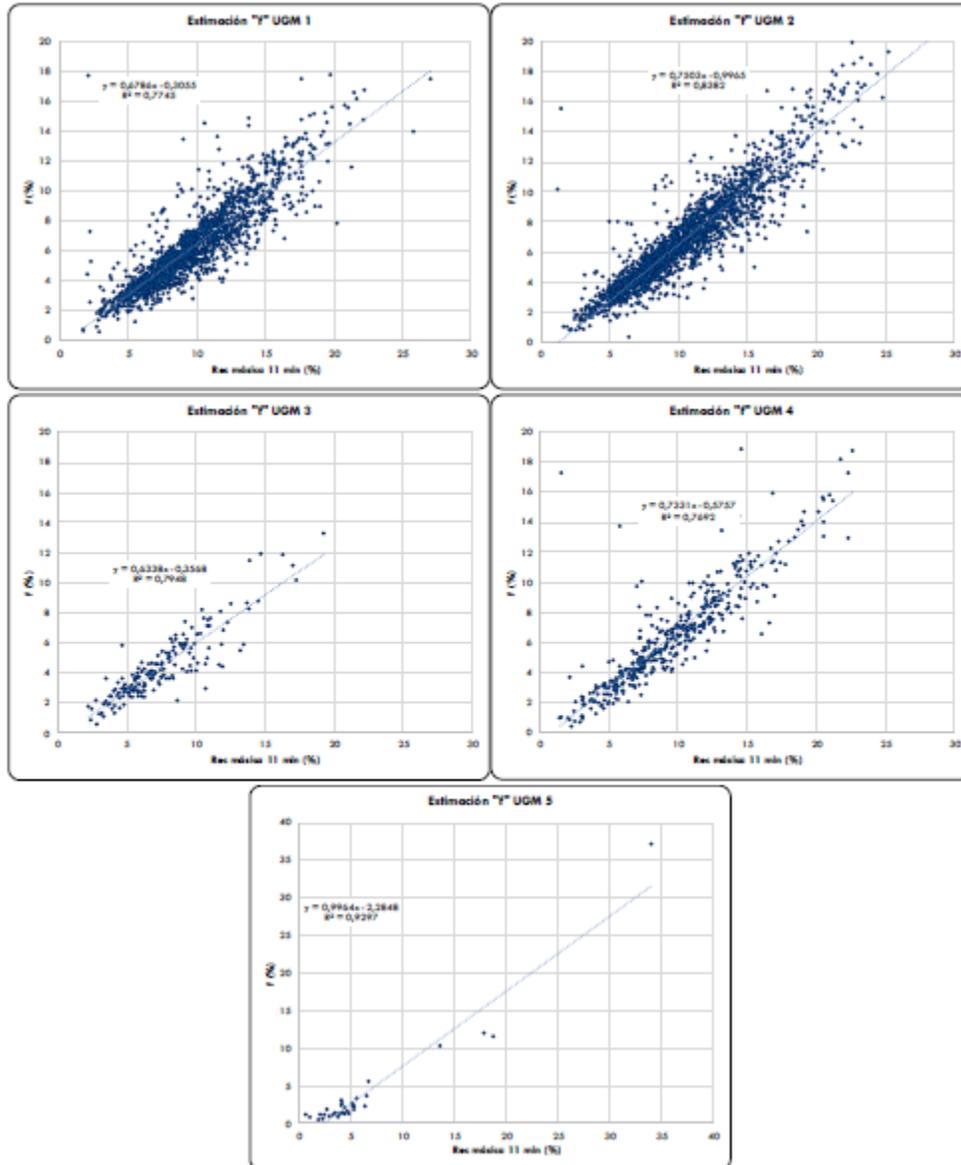


Figura 76. Correlación parámetro "f" UGM Codelco Andina.

ii. Análisis de comportamiento de la masa hidrofóbica en función del tamaño característico P80

El análisis del comportamiento del parámetro "f", en función del tamaño característico P80 (μm) de las muestras, se realizó considerando las pruebas cinéticas de flotación primaria que cuentan con distintas granulometrías de alimentación (entre 150 y 350 μm), y que son realizadas bajo el estándar geometalúrgico de la división.

Durante el análisis se observó que el parámetro “ f ” se relaciona con el grado de molienda (P80), obteniéndose las siguientes pendientes por UGM y tramo de P80 (Tabla 25):

Tabla 25. Ajuste de P80 parámetro “ f ”.

UGM	m			
	150 – 180 μm	180 – 210 μm	210 – 240 μm	240 – 270 μm
1	0.00425	-0.00017	0.00014	-0.00748
2	-0.00135	-0.00674	-0.00604	-0.00950
3	-0.00153	0.00868	-0.01234	-0.00657
4	-0.00834	-0.00198	-0.00968	-0.00462
5	-0.02141	-0.02403	-0.00709	0.03206

iii. Determinación de parámetros “ k_1 ” y “ k_2 ”

Las constantes cinéticas de planta para “ k_1 ” y “ k_2 ” fueron definidas a partir de iteraciones numéricas que permitieran un bajo error de estimación entre el modelo y la recuperación másica real de la planta de flotación primaria. Los valores definidos se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. “ k_1 ” y “ k_2 ”.

K	Mina Rajo				
	1	2	3	4	5
1	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
2	0.004	0.001	0.002	0.002	0.002
K	Mina Subterránea				
	1	2	3	4	5
1	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
2	0.004	0.001	0.002	0.002	0.002

5.4.2.3 Base de cálculo para los modelos de recuperación másica

A continuación, se presentan las bases de cálculo del modelo:

- Flotación primaria AB
 - N° de líneas : 4
 - N° de celdas por línea : 8 celdas
 - Volumen nominal por celda : 100 m³

- Flotación primaria E
 - N° de líneas : 2
 - N° de celdas por línea : 4 celdas
 - Volumen nominal por celda : 130 m³

Tiempo de residencia: Desde modelo de recuperación primaria de Cu.

5.4.3 Resultados del modelo predictivo de recuperación másica primaria

Una vez desarrollada la metodología a utilizar, se procedió con los resultados del modelo de recuperación másica primaria.

5.4.3.1 Análisis de la estadística operacional

El periodo considerado para el análisis comprende el periodo entre enero de 2017 y diciembre de 2019.

La recuperación másica primaria se estimó mediante la siguiente formula:

$$R_{masa\ primaria}(\%) = \left(\frac{Ley_{almCu} - Ley_{cola\ primariaCu}}{Ley_{conc\ primariaCu} - Ley_{cola\ primariaCu}} \right)$$

Para la estimación de la recuperación másica primaria se utilizaron leyes reportadas en el archivo de reporte diario de la concentradora (RespMet), y la estimación mensual se realizó ponderando la recuperación primaria másica por la masa alimentada de cada día (TPD).

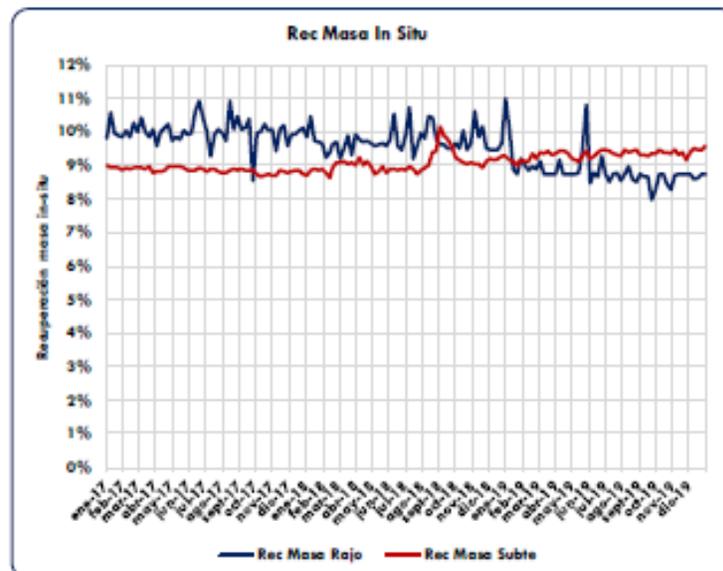


Figura 77. Recuperación In-situ minerales División Andina.

La Figura 77 muestra la recuperación in-situ por origen de los minerales de la división. Se observa que los minerales del rajo a partir del año 2019 presentan una baja en su recuperación In-situ másica de un 10% (de 10 a 9 % promedio), mientras que los de la mina subterránea aumentan un 5% en el periodo 2017-2019 (de 9 a 9,5% promedio). Se puede inferir además que en los periodos en que aumenta la participación de la UGM 1 de Cu aumenta la recuperación másica.

La estimación de la Recuperación de masa In-situ se realizó ponderando la participación de cada UGM de Cu por su recuperación másica característica, según lo presentado en la Tabla 27.

Tabla 27. Recuperación másica por UGM.

UGM Rec Cu	Rajo			Subterránea
	2017	2018	2019	2017-2019
1	11.0	11.0	11.0	10.4
2	10.0	9.5	8.8	9.3
3	9.1	8.3	8.0	7.6
4	7.3	7.3	7.3	8.6
5	6.1	6.1	6.1	6.1

5.4.3.2 Validación del modelo de recuperación másica primaria

La validación del modelo de recuperación másica propuesto se presenta en la Figura 78 y Tabla 28. Los gráficos y la tabla indicados muestran las recuperaciones estimadas de la planta y la recuperación estimada por el modelo.

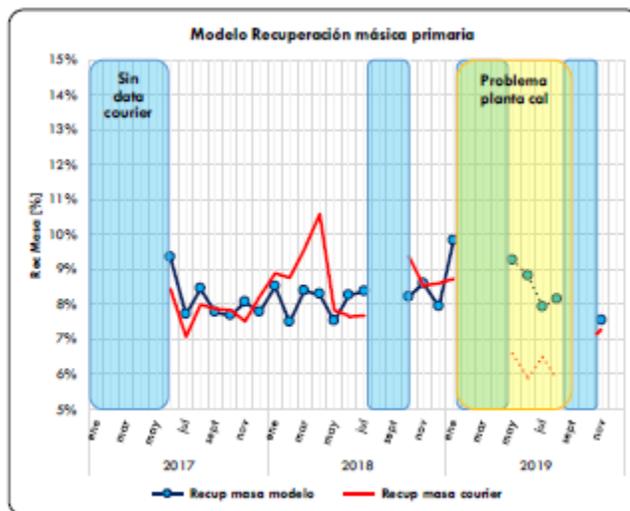


Figura 78. Resultados modelo de recuperación másica primaria colectiva.

Tabla 28. Resultados anuales recuperación másica primaria colectiva.

Año	Modelo	Courier	Error anual	Error Mensual Absoluto
2017	8.0%	7.8%	2.6%	1.2% / 10.7%
2018	8.1%	8.6%	5.4%	0.74% / 21.7%
2019	8.8%	6.9%	10.5%	0.86% / 12.3%

* Año 2019 no considera meses con problemas en planta de cal.

Respecto a estos resultados, se puede comentar lo siguiente:

- El modelo de procesos desarrollado obtiene errores anuales entre 2.6 y 5.4% para los años 2017 y 2018, mientras que para 2019 el error es mayor, esto debido en parte a que solo se tomaron en cuenta los datos de enero y noviembre para este año, descartando el periodo de febrero a octubre por los problemas en la adición de cal.
- La magnitud de los errores, tanto mensuales como anuales, son mayores a los modelos de recuperación metalúrgica debido al orden de magnitud de la recuperación másica.

5.5 Modelo de Procesos – Ley de concentrado primario

5.5.1 Propuesta de metodología

Para el modelo de ley de Cu y Mo en concentrado primario se utilizaron los resultados del modelo de recuperación metalúrgica y modelo de recuperación másica, además de la ley de alimentación de los elementos Cu y Mo.

La Ley de concentrado primario se estimó según lo siguiente:

$$Ley_{concentrado\ primaria}(\%) = Ley_{alimentación} \cdot \frac{R_{metalúrgica\ modelo}}{R_{másica\ modelo}} \cdot f$$

Donde:

- $Ley_{alimentación}(\%)$: Ley de alimentación del elemento de interés.
 $R_{metalúrgica}(\%)$: Recuperación metalúrgica del elemento de interés desde modelo.
 $R_{másica}(\%)$: Recuperación másica desde modelo.
 f : Factor de ajuste.

5.5.2 Resultados del modelo predictivo de ley de concentrado primario

5.5.2.1 Validación del modelo de ley de concentrado primario

El periodo considerado para el análisis comprende el periodo entre enero de 2017 y diciembre de 2019. En la Figura 79 y

Tabla 29 se presentan los resultados obtenidos de la ley de Cu y Mo en concentrado primario.

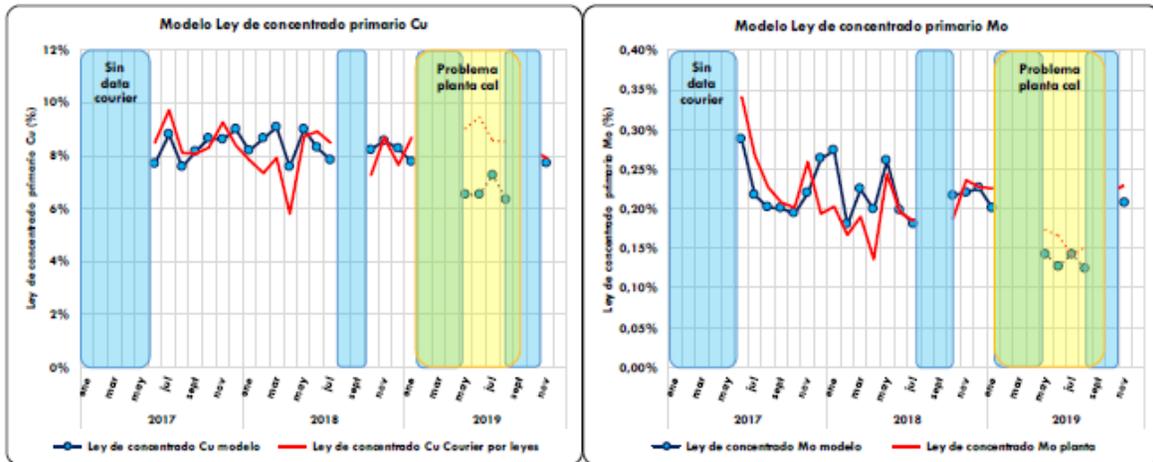


Figura 79. Resultados modelo de ley de concentrado primario.

Tabla 29. Resultados anuales ley de concentrado primario.

Ley Cu				
Año	Modelo	Real	Error Anual	Error Mensual Absoluto
2017	8.39%	8.60%	2.42%	1.1% / 9.6%
2018	8.45%	7.99%	5.79%	0.93% / 30.2%
2019	7.78%	8.52%	8.76%	0.16% / 10.2%
Ley Mo				
Año	Modelo	Real	Error Anual	Error Mensual Absoluto
2017	0.22%	0.23%	5.04%	3.7% / 35.8%
2018	0.22%	0.20%	11.31%	0.39% / 46.6%
2019	0.20%	0.22%	9.66%	0.91% / 11.1%

Los principales comentarios sobre los resultados obtenidos son los siguientes:

- El modelo de ley de concentrado primario desarrollado para los dos elementos de interés, Cu y Mo reproduce el comportamiento de los minerales de Andina en la flotación primaria.

- Para Cu el error promedio de cada año es menor a un 5.8%, mientras que para Mo el promedio anual es de hasta 11%, en los años 2017 y 2018.

5.6 Modelo de Procesos – Recuperación circuito Limpieza/Barrido

La metodología del modelo de recuperación del circuito limpieza-barrido, se basó en el desarrollo de un balance de finos del circuito, en el cual las recuperaciones de la etapa barrido se definen mediante una cinética en función de los tiempos de residencia.

5.6.1 Propuesta de metodología

El modelo de procesos de recuperación limpieza-barrido consideró la información geometalúrgica de los minerales de la división, en cuanto a recuperación metalúrgica y masa de la etapa primaria (la última expresada en términos de ley de concentrado primario), que son los principales factores del modelo propuesto.

El desarrollo del modelo consideró las siguientes etapas:

- Elaboración de balance de finos diario para Cu.
- Elaboración de balance de finos diario para Mo (Basado en balance de masa de Cu).
- Mediante iteración se buscaron los valores de recuperación Barrido y Limpieza.
 - Debido a la falta de valores reportados de las recuperaciones de las etapas intermedias de la limpieza, éstas se iteran para cada uno de los días considerados y ajustan de modo de minimizar la diferencia entre la recuperación limpieza calculada a partir de leyes Courier y la obtenida de los balances de finos diarios.
- Para Barrido se ajustó modelo de García-Zúñiga y se obtuvo la cinética promedio de la etapa.
 - Para cada uno de los días se ajustaron curvas de García-Zúñiga, se fijó la recuperación infinita en 99.9% y se iteró la constante cinética del modelo de modo de ajustarse al valor obtenido en el paso anterior de la metodología.

- Posteriormente el promedio de estas constantes se utilizó para ajustar la recuperación de Barrido que se introduce en los balances del modelo.
- Estimación de Recuperación Limpieza construyendo balance de finos diario tomando como input Recuperación Primaria y Recuperación Másica modelada.

En la Figura 80 se presenta un diagrama de la flotación colectiva de la planta concentradora y se identifica el área modelada.

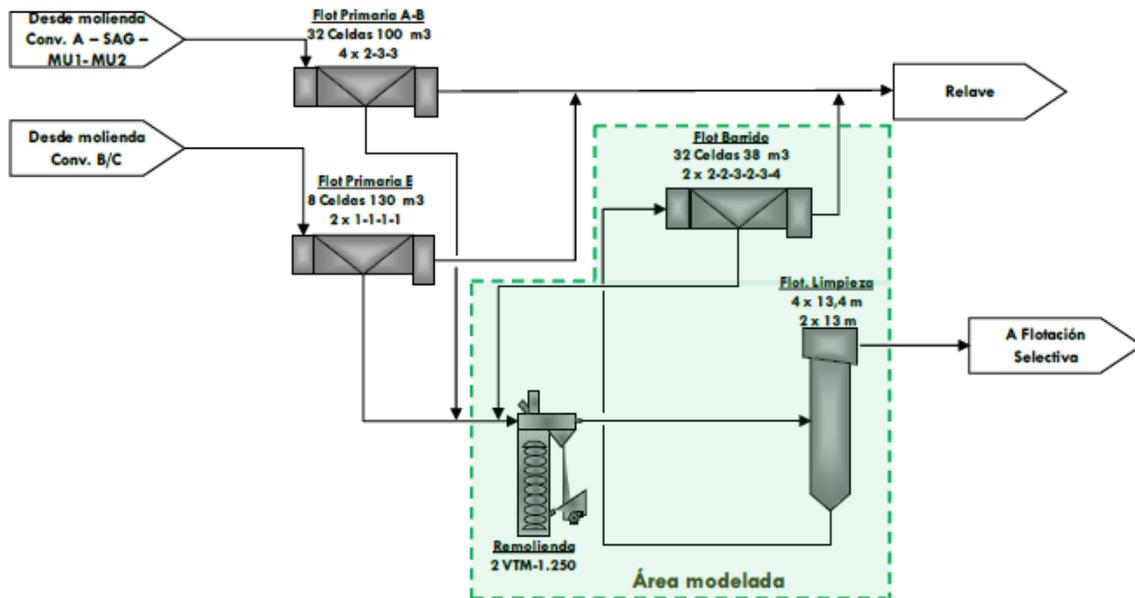


Figura 80. Área modelada circuito limpieza-barrido.

5.6.2 Desarrollo de modelo predictivo de recuperación limpieza-barrido

5.6.2.1 Criterios para balance de finos de circuito limpieza-barrido

Para el modelo de Recuperación Limpieza se asumieron los siguientes criterios:

- Ley de Concentrado Barrido: 7%
- Para la validación del modelo se consideraron los días en que:
 - Se hayan utilizado en la validación del modelo de recuperación primaria.
 - Se hayan utilizado en la validación del modelo de recuperación másica y ley de concentrado.

- Tengan la bitácora con la totalidad de los datos requeridos en el modelo.
- Que la recuperación limpia no sea considerada un outlier.

5.6.2.2 Criterios para estimación de recuperación metalúrgica etapa Barrido

Para la estimación de la recuperación de la etapa limpieza se asumen los siguientes criterios:

- Concentración de sólidos (Cp) de alimentación a etapa barrido de 29%.
- Gravedad específica del mineral alimentado a etapa limpieza de 3.2.
- Kp de Cu para etapa barrido de 0.116 1/min (Resultado cinéticas diarias periodo enero 2017 a diciembre 2019).
- Kp de Mo para etapa limpieza de 0.061 1/min (Resultado cinéticas diarias periodo enero 2017 a diciembre 2019).
- Volumen inicial:
 - Número de líneas: 2
 - Número de Celdas por línea: 16
 - Capacidad por celda: 38 m³

5.6.3 Resultados del modelo de recuperación circuito limpieza-barrido

El período considerado para el análisis comprende el periodo entre enero de 2017 y diciembre de 2019. En la Figura 81 y Tabla 30 se presentan los resultados obtenidos en la recuperación del circuito limpieza-barrido para Cu y Mo.

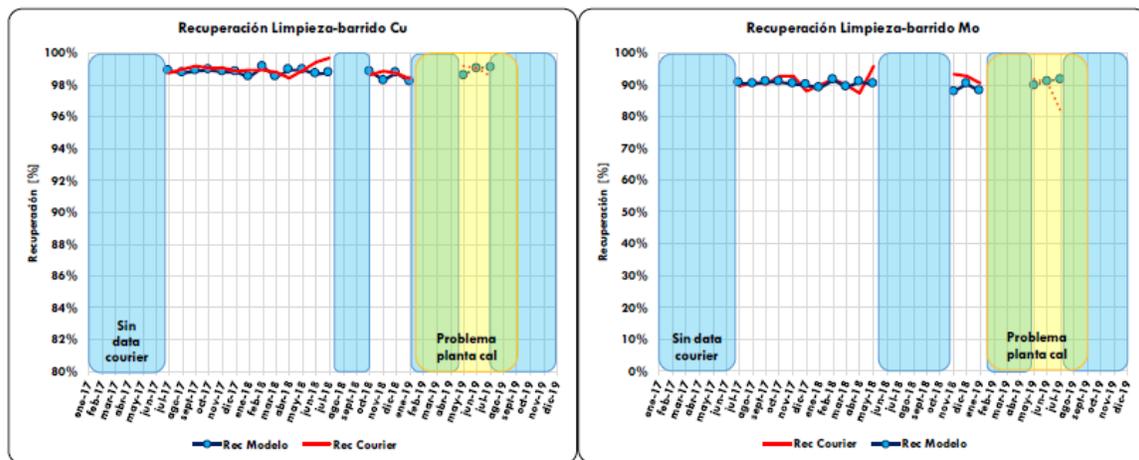


Figura 81. Resultados modelo de recuperación limpieza-barrido.

Tabla 30. Resultados anuales de modelo recuperación limpieza-barrido.

Circuito limpieza barrido Cu				
Año	Rec. Courier	Rec. Modelo	Rango Mensual	Error Anual
2017	99.0%	98.8%	0.07% / 0.30%	0.14%
2018	99.0%	98.7%	0.01% / 0.96%	0.27%
2019*	98.4%	98.2%	0.23% / 0.23%	0.23%
Circuito limpieza barrido Mo				
Año	Rec. Courier	Rec. Modelo	Rango Mensual	Error Anual
2017	90.8%	90.4%	0.65% / 2.6%	0.43%
2018	91.7%	89.6%	0.37% / 6.0%	2.3%
2019*	90.6%	88.2%	2.6% / 2.6%	2.6%

Respecto a estos resultados, se puede comentar lo siguiente:

- Para Cu y Mo, el modelo de procesos desarrollado reproduce el comportamiento y variabilidad de la recuperación del circuito limpieza barrido, obteniendo errores mensuales menores al 1% para el caso de Cu y 6% para el Mo.

5.7 Modelo de Procesos – Recuperación Selectiva

La metodología del modelo de recuperación de la flotación selectiva de Mo se basa en el desarrollo de un balance de finos del circuito, en el cual la recuperación de la etapa primaria se define mediante una cinética en función de los tiempos de residencia.

5.7.1 Propuesta de metodología

El modelo de procesos de recuperación selectiva tuvo como principal input la masa de concentrado mixto Cu-Mo y la ley de Mo de este flujo. El desarrollo del modelo consideró las siguientes etapas:

- Elaboración de balance de finos diario para Mo (Basado en reportes RespMet de la planta) [15].
- Mediante iteración se buscaron los valores de recuperación del circuito de limpieza de la flotación selectiva, que ajusten con la recuperación selectiva global reportada.
- Para etapa primaria de la flotación selectiva se ajustó modelo de García-Zúñiga y se obtuvo cinética promedio de cada etapa. Se fijó la recuperación

infinita como el valor máximo obtenido en la etapa primaria del periodo 2017-2019.

- Estimación de recuperación selectiva construyendo balance de finos diario tomando como input la masa de concentrado colectivo Cu-Mo y la ley de Mo de alimentación fresca a flotación selectiva.

En la Figura 82 se presenta un diagrama de la flotación selectiva.

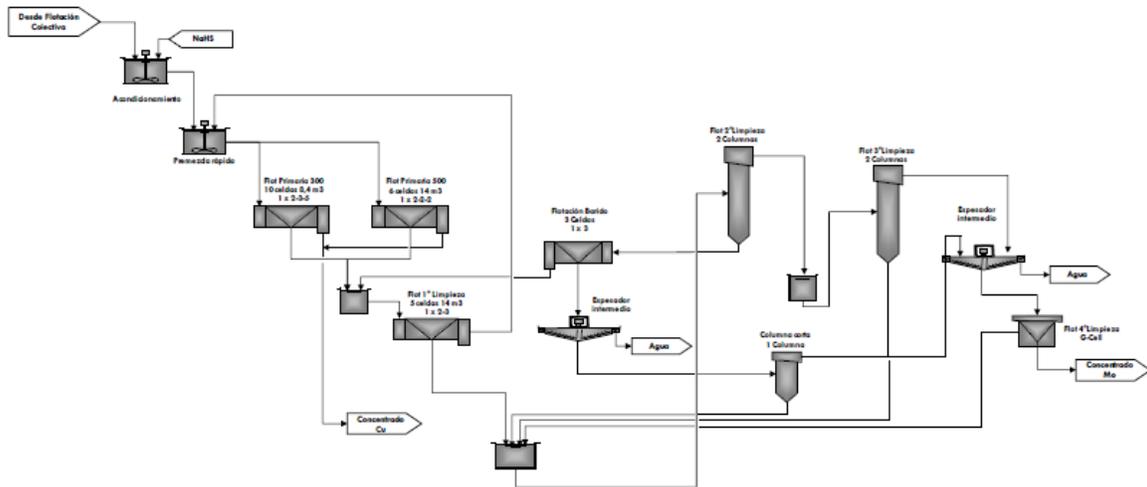


Figura 82. Flotación selectiva División Andina.

5.7.2 Desarrollo de modelo predictivo de recuperación selectiva

5.7.2.1 Criterios para balance de finos de flotación selectiva

Para el modelo de Recuperación selectiva se asumieron los siguientes criterios:

- Para la incorporación en la validación del modelo se consideran los días que:
 - Tengan en la bitácora reportada la recuperación de la planta selectiva.
 - Tengan la bitácora con la totalidad de los datos requeridos en el modelo.

5.7.2.2 Criterios para estimación de recuperación metalúrgica etapa primaria selectiva de Mo

Para la estimación de la recuperación de la etapa primaria se asumieron los siguientes criterios:

- Concentración de sólidos (Cp) de alimentación a etapa primaria de 32% para los años 2017 y 2018, para el año 2019 se asume un valor de 18% con base en muestreos planta.
- Gravedad específica del mineral alimentado a etapa primaria de 4.2.
- Kp etapa primaria para Mo de 0.100 1/min para 2017 y 2018.
- Kp etapa primaria para Mo de 0.120 1/min para 2019.
- Volumen útil celdas 300:
 - Número de líneas: 1
 - Número de Celdas por línea: 10
 - Capacidad por celda: 300 pie³
 - Volumen útil por celda: 80%
- Volumen útil celdas 500:
 - Número de líneas: 1
 - Número de Celdas por línea: 6
 - Capacidad por celda: 500 pie³
 - Volumen útil por celda: 80%

5.7.3 Resultados del modelo de recuperación selectiva

El periodo considerado para el análisis comprende el periodo entre enero de 2017 y diciembre de 2019. En la Figura 83 y Tabla 31 se presentan los resultados obtenidos en recuperación selectiva de Mo [16].

Tabla 31. Resultados anuales de modelo recuperación selectiva.

Circuito selectiva Mo				
Año	Rec. Real	Rec. Modelo	Rango Mensual	Error Anual
2017	83.6%	82.9%	0.47% / 7.6%	0.87%
2018	82.4%	82.0%	0.07% / 8.5%	0.46%
2019*	84.4%	83.2%	1.4% / 1.4%	1.4%

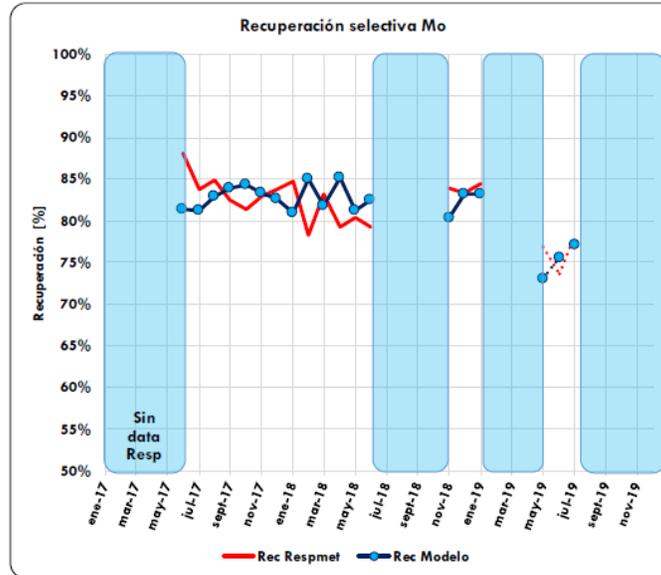


Figura 83. Resultados modelo de recuperación selectiva.

Los principales comentarios de los resultados obtenidos son:

- Para molibdeno, el modelo de procesos de recuperación selectiva obtiene errores mensuales menores al 8.5% y anualmente bajo el 1.5%.
-

5.8 Validación y Conciliación 2020

Con la finalidad de validar el modelo desarrollado para el año 2020 se realizó la evaluación comparativa de los resultados obtenidos versus el modelo de procesos utilizado actualmente en la División.

5.8.1 Evaluación Modelos de Procesos

La evaluación de los modelos de procesos se realizó para el periodo comprendido entre noviembre 2019 y abril 2020.

5.8.1.1 Modelo de recuperación primaria de Cu

La Figura 84 presenta la recuperación primaria de Cu para los circuitos de flotación AB y E de acuerdo con modelo de procesos utilizado actualmente en la División y el nuevo modelo desarrollado, observando una mayor diferencia en la recuperación primaria del circuito de flotación rougher AB.

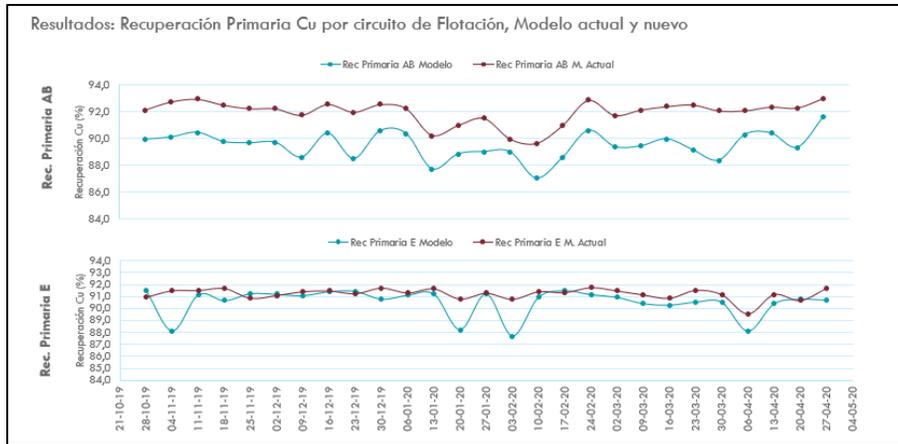


Figura 84. Recuperación Primaria por circuito de flotación modelo actual y nuevo.

La Tabla 32 y las Figura 85Figura 86 presentan la recuperación primaria de Cu global.

Tabla 32. Conciliación recuperación primaria de Cu Global.

Periodo	Rec. Cu	Factor de ajuste	Desv Std	Promedio Real	Error (%)
Nov 19 – Abr 20	Rec 1° Colectiva Modelo	100.00%	1.3	90.02%	1.5
	Rec 1° Colectiva Modelo Actual	100.00%	2.1		2.3
	Rec 1° Colectiva Modelo Ajuste	100.28%	1.3		1.5
	Rec 1° Colectiva Modelo Actual Ajuste	98.12%	1.2		1.3

Se observa que el modelo de procesos desarrollado presenta un menor error respecto a la recuperación real representado por un 1.5%. De igual manera y considerando un factor de 98.12% es posible ajustar el modelo actual, obteniendo un error de 1.3%.

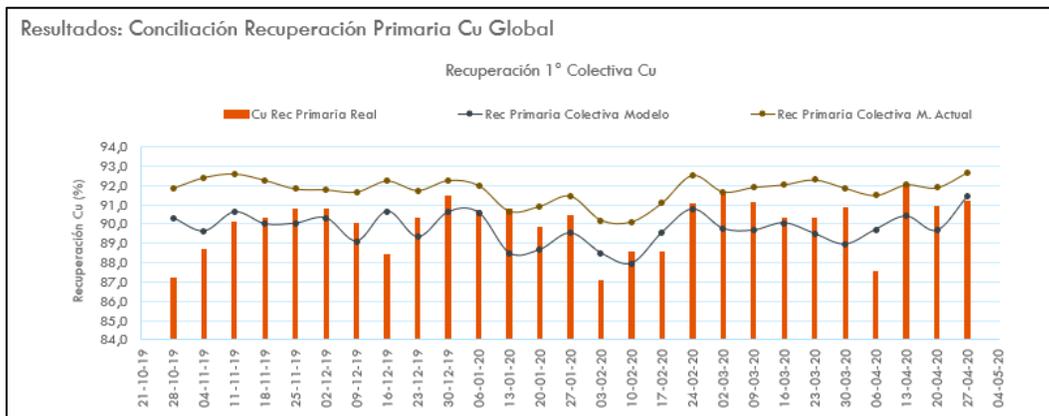


Figura 85. Recuperación Primaria de Cu modelo actual y nuevo.

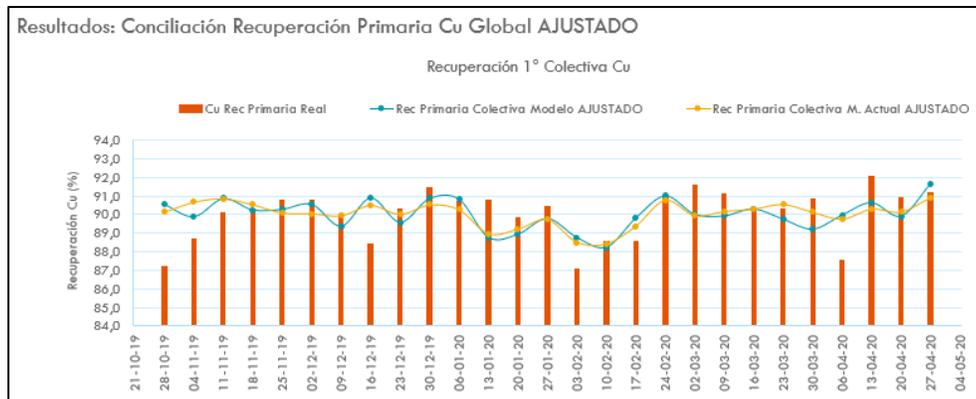


Figura 86. Recuperación Primaria de Cu modelo actual y nuevo ajustado.

5.8.1.2 Modelo de recuperación primaria de Mo [17]

La Tabla 33 Tabla 32 y las Figura 87 Figura 88 presentan la recuperación primaria de Mo global.

Tabla 33. Conciliación recuperación primaria de Mo Global.

Periodo	Rec. Mo	Factor de ajuste	Desv Std	Promedio Real	Error (%)
Nov 19 – Abr 20	Rec 1° Colectiva Modelo	100.00%	5.9	69.73%	8.5*
	Rec 1° Colectiva Modelo Actual	100.00%	6.2		8.9*
	Rec 1° Colectiva Modelo Ajuste	93.57%	3.5		5.0*
	Rec 1° Colectiva Modelo Actual Ajuste	105.98%	4.7		6.8*

*Para el cálculo de error se filtraron los datos de recuperación que quedan fuera de distribución normal (2 desviaciones estándar)

Se observa que el modelo de procesos desarrollado presenta un menor error respecto a la recuperación real representado por un 8.5% el que al ser ajustado con un factor de 93.57% disminuye su error a 5.0%.

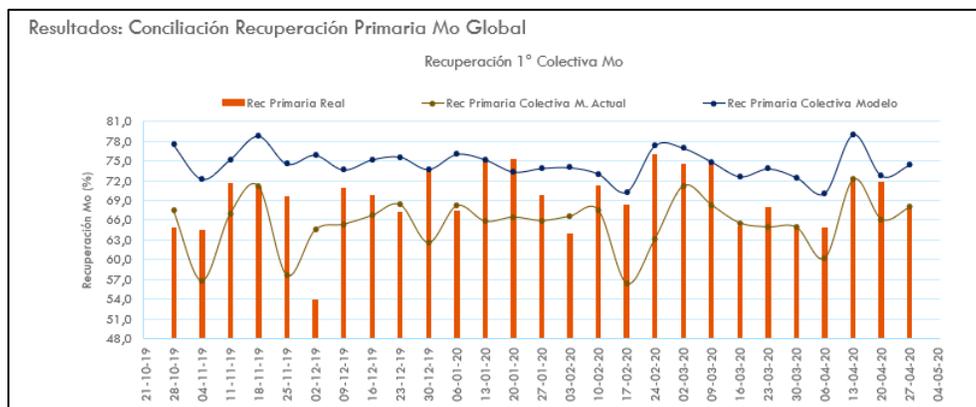


Figura 87. Recuperación Primaria de Mo modelo actual y nuevo.

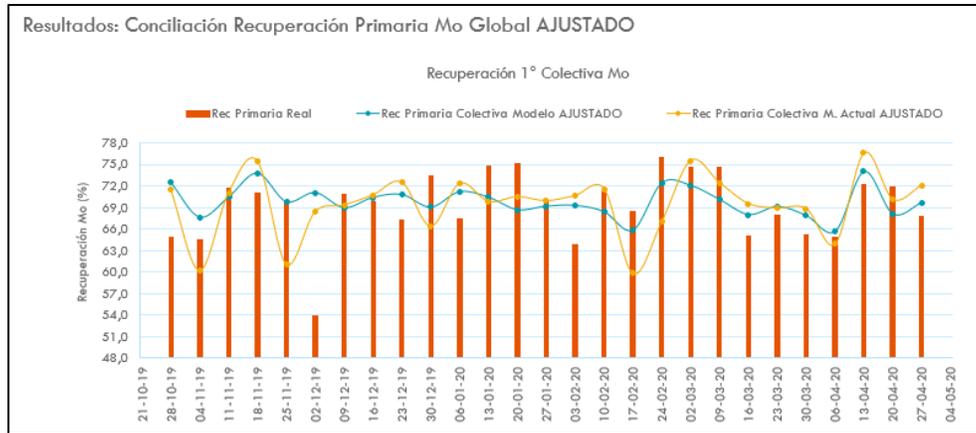


Figura 88. Recuperación Primaria de Mo modelo actual y nuevo ajustado.

5.8.1.3 Modelo de recuperación limpieza-barrido de Cu [18]

Para la recuperación limpieza-barrido y global se evaluaron 4 escenarios:

- Ley de Concentrado Fija: 28.0% parámetro de calidad actual
- Ley de concentrado limitada por Razón de enriquecimiento máximo, según ley de alimentación:

Ley de cabeza de Cu	RE
< 0.6	48
$0.6 \leq Cu \leq 0.8$	40
> 0.8	34

- Ley de concentrado calculada con divisional:

$$\%Cu_{conc} = -16.855 + 31.499 \cdot \%Cu_{cabeza_{pond}} - 0.1073 \cdot \frac{Ley Fe_{cabeza}}{Ley Cu_{cabeza}} + 0.5773 \cdot RE$$

- Ley de concentrado real

En la Figura 89 se presenta la recuperación Limpieza Barrido de Cu para los 4 escenarios mencionados.

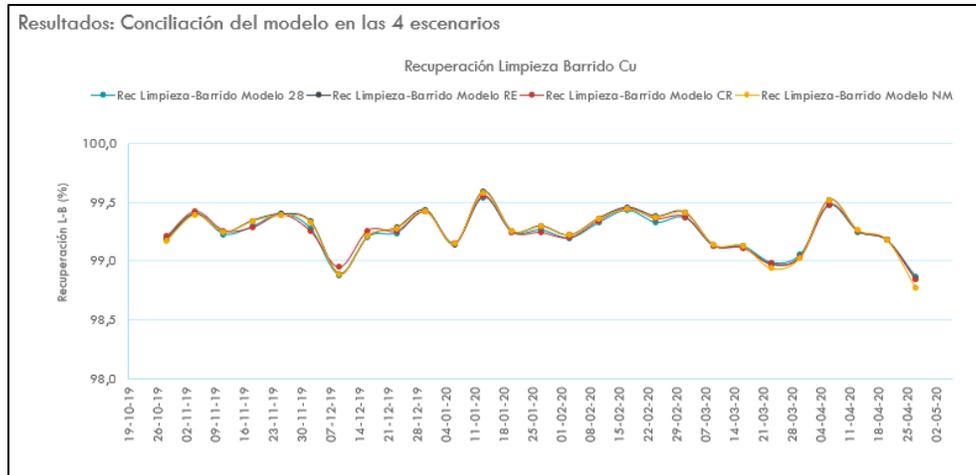


Figura 89. Recuperación Cu Circuito Limpieza-Barrido.

5.8.1.4 Modelo de recuperación colectiva global de Cu

La Tabla 34, Tabla 33, Tabla 32 y las Figura 90, Figura 91 presentan la recuperación colectiva global de Cu.

Tabla 34. Conciliación recuperación colectiva global de Cu.

Periodo	Rec. Cu	Factor de ajuste	Desv Std	Promedio Real	Error (%)
Nov 19 – Abr 20	Rec Colectiva Global 28	100.00%	2.2	87.32	2.5
	Rec Colectiva Global RE	100.00%	2.2		2.5
	Rec Colectiva Global NM	100.00%	2.2		2.5
	Rec Colectiva Global CR	100.00%	2.2		2.5
	Rec Colectiva Global M. Actual	100.00%	2.0		2.3
	Rec Colectiva Global 28 Ajuste	97.75%	1.3		1.5
	Rec Colectiva Global RE Ajuste	97.73%	1.3		1.5
	Rec Colectiva Global NM Ajuste	97.73%	1.3		1.5
	Rec Colectiva Global CR Ajuste	97.74%	1.3		1.5
Rec Colectiva Global M. Actual Ajuste	100.00%	1.2	1.3		

Se observa que el modelo de procesos desarrollado en los escenarios evaluados presenta un error de 2.5% respecto a la recuperación real, mientras que el modelo actual presenta un error de 2.3%. Considerando un factor de ajuste de 97.7% y 100% es posible disminuir estos errores a valores de 1.5% y 1.3% respectivamente.

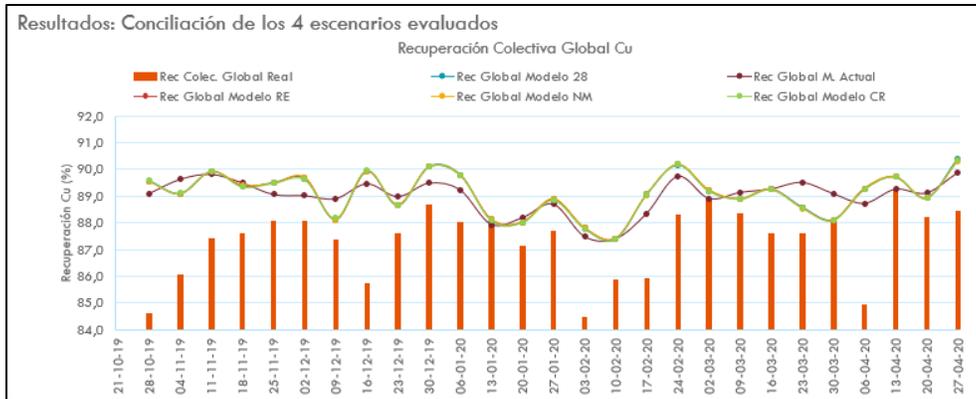


Figura 90. Modelo Recuperación Colectiva Global Cu.

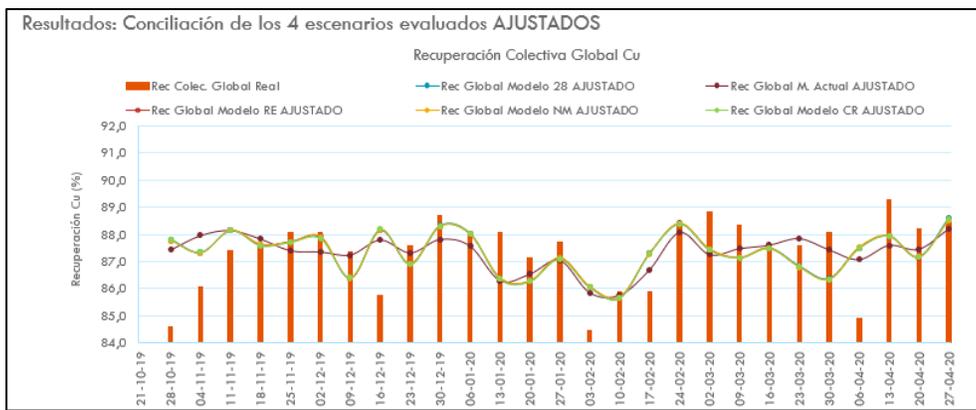


Figura 91. Modelo Recuperación Colectiva Global Cu Ajustado.

5.8.1.5 Modelo de recuperación limpieza-barrido de Mo

En la Figura 92 Figura 89 se presenta la recuperación Limpieza Barrido de Mo para los 4 escenarios mencionados.

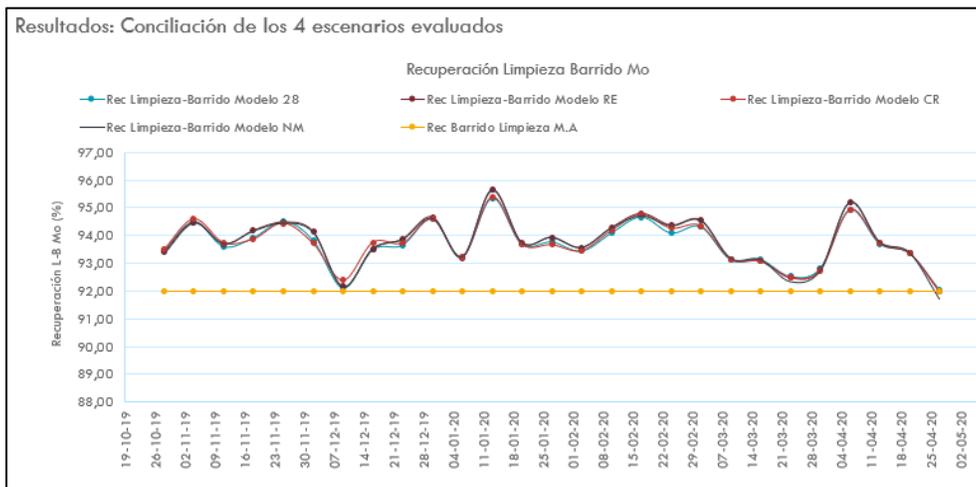


Figura 92. Recuperación Mo Circuito Limpieza-Barrido.

5.8.1.6 Modelo de recuperación colectiva global de Mo

La Tabla 35 y las Figura 93 y Figura 94 Tabla 34 Tabla 33 Tabla 32 presentan la recuperación colectiva global de Mo.

Tabla 35. Conciliación recuperación colectiva global de Mo.

Periodo	Rec. Mo	Factor de ajuste	Desv Std	Promedio Real	Error (%)
Nov 19 – Abr 20	Rec Colectiva Global 28	100.00%	6.5	64.15	10.1
	Rec Colectiva Global RE	100.00%	6.5		10.2
	Rec Colectiva Global NM	100.00%	6.5		10.1
	Rec Colectiva Global CR	100.00%	6.5		10.1
	Rec Colectiva Global M. Actual	100.00%	5.7		8.8
	Rec Colectiva Global 28 Ajuste	98.20%	3.0		4.7
	Rec Colectiva Global RE Ajuste	98.10%	3.0		4.7
	Rec Colectiva Global NM Ajuste	98.13%	3.0		4.7
	Rec Colectiva Global CR Ajuste	98.15%	3.0		4.7
	Rec Colectiva Global M. Actual Ajuste	99.99%	4.3		6.7

Se observa que el modelo de procesos desarrollado en los escenarios evaluados presenta un error de 10.1% respecto a la recuperación real, mientras que el modelo actual presenta un error de 8.8%. Considerando un factor de ajuste de 98.1% y 99.9% es posible disminuir estos errores a valores de 4.7% y 6.7% respectivamente.

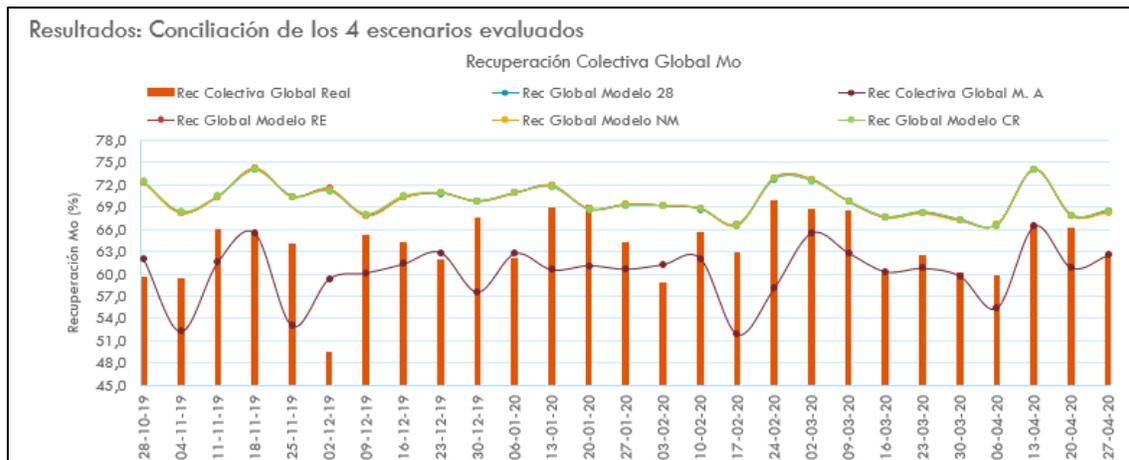


Figura 93. Modelo Recuperación Colectiva Global Mo.

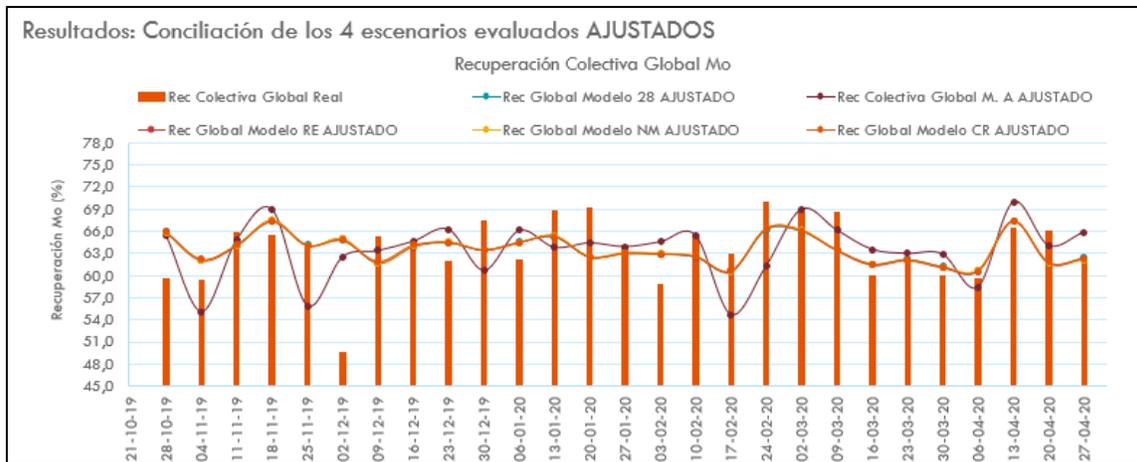


Figura 94. Modelo Recuperación Colectiva Global Mo Ajustado.

5.8.1.7 Modelo de recuperación selectiva

Para la recuperación selectiva se evaluaron 3 escenarios:

- Recuperación máxima R_{inf} : 94.4, propuesta en el modelo
- Recuperación máxima variable, dependiente de ley de concentrado mixto

Ley de conc mixto	R_{inf}
0.4 – 0.5	86.15
0.6 – 0.6	87.63
0.6 – 0.7	87.75

- Recuperación máxima variable y C_p primario: 37%

La Tabla 36 y las Figura 95 y Figura 96 presentan la recuperación selectiva de Mo.

Tabla 36. Conciliación recuperación selectiva de Mo.

Periodo	Rec. Mo	Factor de ajuste	Desv Std	Promedio Real	Error (%)
Nov 19 – Abr 20	Rec Selectiva R_{inf} : 94.4	100.00%	13.711	71.09	19.28
	Rec Selectiva R_{inf} : variable	100.00%	6.139		8.63
	Rec Selectiva M. Árbol	100.00%	7.434		10.45
	Rec Selectiva M. MV	100.00%	6.851		9.63
	Rec Selectiva R_{inf} : 94.4 Ajuste	85.33%	3.922		5.51
	Rec Selectiva R_{inf} : variable Ajuste	94.56%	4.291		6.03
	Rec Selectiva M. Árbol Ajuste	92.08%	3.470		4.88
	Rec Selectiva M. MV Ajuste	92.90%	3.584		5.04

Se observa que el modelo de procesos desarrollado presenta un error de 19.28% respecto a la recuperación real, el que al ser ajustado con un factor de 85.33% disminuye su error a 5.51%.

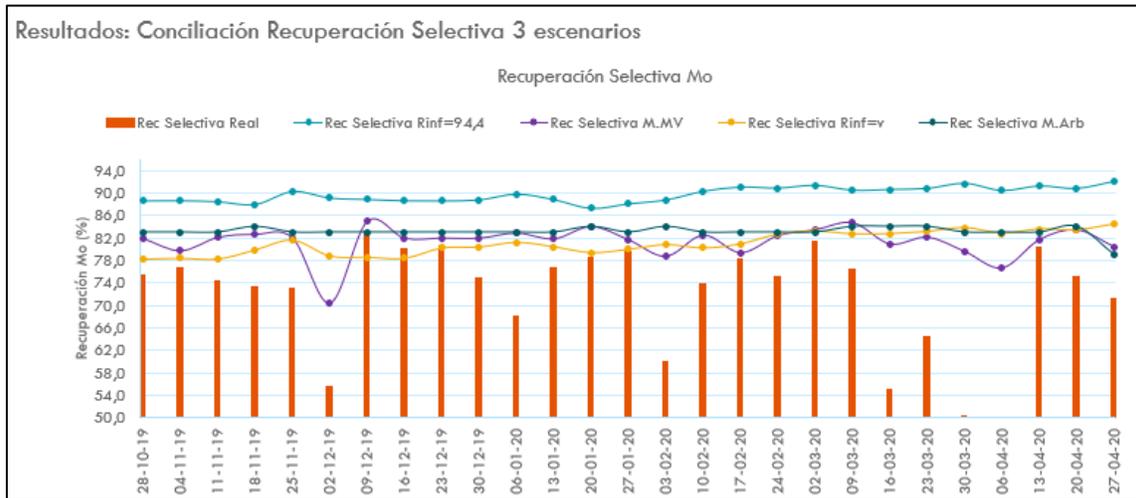


Figura 95. Modelo Recuperación Selectiva.

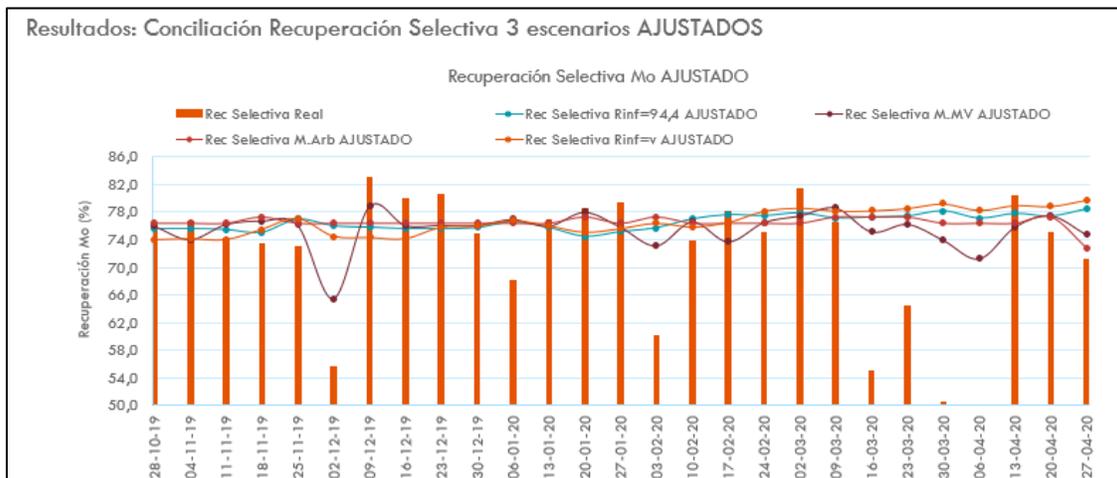


Figura 96. Modelo Recuperación Selectiva Ajustado.

5.9 Evaluación Impacto Económico

En la Figura 16 se presentan los resultados de la planta de flotación selectiva de división Andina. Se observa la evidente tendencia a la baja en la ley de alimentación de molibdeno (1.10% a 0.45%), en su recuperación (86% a 78%) y en la ley del concentrado final (45.4% a 39.4%).

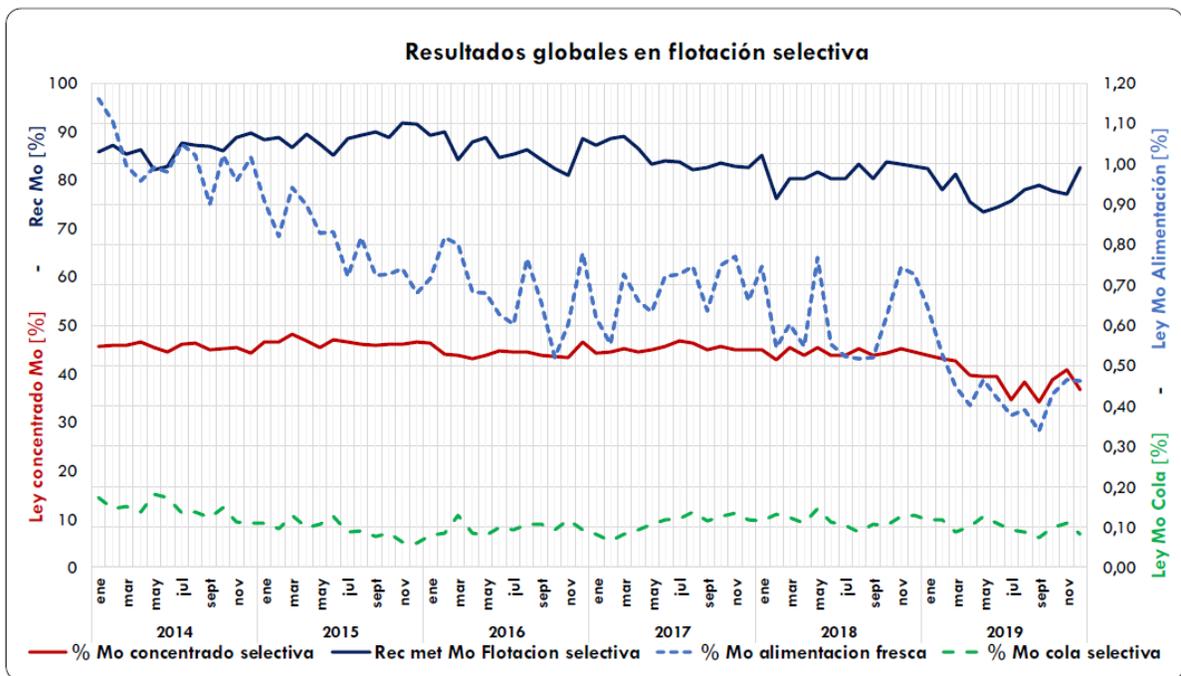


Figura 97. Resultados mensuales flotación selectiva.

Para obtener los mismos resultados de recuperación y ley de concentrado con una ley de Mo en alimentación cada vez menor, es necesario concentrar cada vez más el mineral con la misma infraestructura.

En virtud de este requerimiento, que obliga a tener factores de enriquecimiento de a lo menos el doble que se tenía el 2014, y con prácticamente las mismas etapas de limpieza, se concluye que uno de los factores en la baja de recuperación de Mo, la menor ley de Mo en concentrado mixto. Este factor no ha sido considerado en el proceso de planificación, al no estimar su impacto en el factor de enriquecimiento que se debe generar para dar cumplimiento con la calidad comercial de venta de molibdeno. De esta forma al analizar las metas de los últimos cuatro años se obtiene un aumento en el error porcentual entre el valor de recuperación planificado y el resultado real obtenido en la planta de flotación selectiva.

Tabla 37. Recuperación Selectiva Real vs Programa 2017-2020

Año	Rec. Mo Selectiva Real (%)	Rec. Mo Selectiva Programa (%)	Error (%)
2017	84.20	86.28	2.50
2018	80-53	86.71	7.13
2019	76.83	85.35	10.00
2020	62.98	82.05	23.00

Al realizar un análisis del impacto productivo en detalle de los últimos años se obtiene el siguiente resultado.

En el año 2017 el programa de planificación consideró un plan anual con una recuperación selectiva de molibdeno de 86.28% obteniendo un resultado real de 84.2%. Cabe destacar que este año las leyes de alimentación aún se encuentran dentro del diseño establecido en el proceso de flotación selectiva.

Tabla 38. Cumplimiento Anual Real vs Programa de Producción Molibdeno P0 2017

Comparación	Ley Cab Mo (%)	Rec Colect (%)	Rec Select (%)	Rec Global (%)	Prod. Mo Ac Planta Moly TF	Prod. Moly L.R Total TF	Lotes Moly Ac TF
Real	0.0239	68.38	84.20	57.58	4,387.293	5,703.97	0.00
Programa	0.0186	68.55	86.28	59.14	3,469.335	6,000.00	0.00
Cumpl. Relat	128.89	99.75	97.59	97.35	126.46	95.07	0.00
Cumpl. Absol.	0.0054	-0.17	-2.1	-1.6	917.958	-296.03	0.00

En el año 2018 el programa de planificación consideró un plan anual con una recuperación selectiva de molibdeno de 86.71% obteniendo un resultado real de 80.53%. Generando una desviación de 5.2 MUSD de acuerdo a los valores comerciales de venta y producción de molibdeno.

Tabla 39. Cumplimiento Anual Real vs Programa de Producción Molibdeno P0 2018

Comparación	Ley Cab Mo (%)	Rec Colect (%)	Rec Select (%)	Rec Global (%)	Prod. Mo Ac Planta Moly TF	Prod. Moly L.R Total TF	Lotes Moly Ac TF
Real	0.0221	67.06	80.53	54.00	3,941.754	5,383.83	0.00
Programa	0.0190	68.93	86.71	59.77	3,653.820	6,000.00	0.00
Cumpl. Relat	116.38	97.29	92.87	90.35	95.56	89.73	0.00
Cumpl. Absol.	0.0031	-1.87	-6.2	-5.8	-162.066	-616.17	0.00

En el año 2019 el programa de planificación consideró un plan anual con una recuperación selectiva de molibdeno de 85.35% obteniendo un resultado real de 76.83%. Generando una desviación de 6.8 MUSD de acuerdo a los valores comerciales de venta y producción de molibdeno.

Tabla 40. Cumplimiento Anual Real vs Programa de Producción Molibdeno P0 2019

Comparación	Ley Cab Mo (%)	Rec Colect (%)	Rec Select (%)	Rec Global (%)	Prod. Mo Ac Planta Moly TF	Prod. Moly L.R Total TF	Lotes Moly Ac TF
Real	0.0159	59.84	76.83	45.98	2,149.069	3,919.27	0.00
Programa	0.0189	65.82	85.35	56.18	3,442.792	6,000.00	0.00
Cumpl. Relat	84.18	90.91	90.02	81.83	62.42	65.32	0.00
Cumpl. Absol.	-0.0030	-5.98	-8.5	-10.2	-1,293.723	-2,080.73	0.00

En el año 2020 el programa de planificación consideró un plan anual con una recuperación selectiva de molibdeno de 82.05% obteniendo un resultado real de

62.98%. Generando una desviación de 9.2 MUSD de acuerdo a los valores comerciales de venta y producción de molibdeno.

Tabla 41. Cumplimiento Anual Real vs Programa de Producción Molibdeno P0 2020

Comparación	Ley Cab Mo (%)	Rec Colect (%)	Rec Select (%)	Rec Global (%)	Prod. Mo Ac Planta Moly TF	Prod. Moly L.R Total TF	Lotes Moly Ac TF
Real	0.0195	64.53	62.98	40.02	2,104.425	4,107.96	0.00
Programa	0.0146	60.83	82.05	49.91	1,983.529	4,772.90	0.00
Cumpl. Relat	133.29	104.45	76.76	80.18	106.09	86.07	0.00
Cumpl. Absol.	0.0049	2.71	-19.1	-9.9	120.896	-664.95	0.00

En resumen, durante los últimos 4 años se han incrementado las desviaciones de recuperación selectiva respecto al programa planificado, generando un potencial impacto económico cercano a los -23 MUSD. Para mitigar estos efectos de pérdida cabe destacar que se realizaron planes de corto plazo mediante aumentos de tratamiento de mineral y ajustes de los planes de producción.

Tabla 42. Estimación Potencial Impacto Económico

Año	Rec. Mo Selectiva Real (%)	Rec. Mo Selectiva Programa (%)	Error (%)	Potencial Impacto Económico (MUSD)
2017	84.20	86.28	2.50	-1.60
2018	80-53	86.71	7.13	-5.20
2019	76.83	85.35	10.00	-6.80
2020	62.98	82.05	23.00	-9.20

La implementación del nuevo modelo de recuperación selectiva fue considerado para el proceso de planificación 2021, con el objetivo de cumplir los compromisos comerciales de venta y no generar desviaciones económicas en el plan de producción. De acuerdo a los resultados analizados en la etapa de validación y conciliación, el nuevo modelo de permite reducir el error de 10-20% a valores aceptados en los procesos de planificación (5%) de esta manera disminuyendo los potenciales impacto económicos en los ejercicios financieros de la división.

6 Conclusiones y Recomendaciones

División Andina CODELCO ha presentado en los últimos cinco años una caída en la calidad del mineral alimentado desde la mina Rajo asociado a la disminución de la ley de molibdeno.

Como consecuencia la Planta de Flotación Selectiva de Molibdeno ha presentado mermas en los indicadores de recuperación declarados en la planificación, generando dificultades para concentrar selectivamente el mineral y cumplir con los compromisos comerciales.

El resultado técnico de recuperación selectiva de molibdeno producto de las características actuales del yacimiento y modelo de explotación de División andina, repercute en las variables actuales consideradas en los modelos de estimación de los elementos de interés (cobre-molibdeno), en el caso del molibdeno al corresponder a un sub-producto del proceso de recuperación de cobre, no cuenta en muchas ocasiones con la robustez o información de detalle requerida en los modelos de planificación, de esta manera al no considerar todos los elementos se producen diferencias considerables en los resultados productivos comprometidos en los planes de producción y los resultados reales obtenidos en las plantas de proceso, en consecuencia en diferencias económicas comprometidas en los ejercicios financieros anuales de las distintas compañías mineras.

A partir de las pruebas geometalúrgicas de División Andina, es posible obtener modelos de procesos industriales de recuperación metalúrgica, másica y ley de concentrado primario para los elementos cobre y molibdeno.

De la misma forma se han obtenidos modelos de recuperación del circuito limpieza-barrido y de la flotación selectiva.

El modelo de recuperación primaria de molibdeno reproduce el comportamiento y variabilidad de la recuperación primaria de los minerales de División Andina en la planta industrial, obteniendo errores mensuales menores al 9% y anuales menores a 1% en los últimos dos años (2018-2019), en forma similar al modelo de recuperación primaria de Cu estos resultados superan las exigencias actuales de la industria.

Para el Molibdeno, el modelo de procesos propuestos para la recuperación selectiva obtiene errores mensuales menores al 8.5% y anualmente bajo el 5%.

La implementación del nuevo modelo de recuperación selectiva fue considerado para el proceso de planificación 2021, con el objetivo de cumplir los compromisos comerciales de venta y no generar desviaciones económicas en el plan de producción. De acuerdo a los resultados analizados en la etapa de validación y conciliación, el nuevo modelo de permite reducir el error de 10-20% a valores

aceptados en los procesos de planificación (5%) de esta manera disminuyendo los potenciales impacto económicos en los ejercicios financieros de la división.

Para continuar mejorando el modelo propuesto se recomienda verificar las constantes cinéticas de planta (k_p) en flotación colectiva primaria, colectiva limpieza-barrido y selectiva mediante la realización de muestreos cinéticos. Para el desarrollo de estos, se recomienda lo siguiente:

- Verificar que la planta industrial se encuentre operando en régimen.
- Identificar la participación de cada UGM que está siendo alimentado a la planta concentradora.
- Para obtener información precisa y exacta del comportamiento de una UGM en planta, se recomienda muestrear cuando alguna de éstas tenga una participación cercana al 100%.
- Definir la cantidad mínima de masa y número de incrementos que conforman cada muestra.
- Contar con controles de calidad en la toma de muestras y supervisión para la correcta ejecución de cada protocolo.

Realizar muestreos industriales que incluyan pruebas de laboratorio con el fin de obtener información relevante respecto a la estimación de un factor de escala de ley de concentrado primario de los elementos de interés, que reproduzca la ley de concentrado primario en la planta.

En línea con el punto anterior, se recomienda incorporar en el modelo de bloques leyes de concentrado primario acumulado y recuperación másica primaria a distintos tiempos de flotación según las pruebas geometalúrgicas.

Se recomienda que la recuperación másica In-situ sea estimada y agregada al modelo de bloques a partir de los resultados de cada una de las pruebas geometalúrgicas, con el objetivo de precisar la recuperación másica y lograr así menor variabilidad en el modelo de procesos.

7 Bibliografía

- [1] Empírica, “Informe Diagnóstico Metalúrgico Flotación Selectiva, Codelco Chile División Andina”, Marzo 2020.
- [2] Superintendencia de Geología- Gerencia de Recursos Mineros, “Informe de Base de Datos 2019, Codelco Chile División Andina”, Septiembre 2019.
- [3] Bustos, C., “Análisis Estadístico de Datos de Recuperación de Molibdeno, Codelco Chile División Andina”, Julio 2018
- [4] Superintendencia de Ingeniería de Procesos, “Reportes metalúrgicos desde enero 2014 a diciembre 2019”, Enero 2020.
- [5] Berkowitz G., “Informe Pre-diagnóstico Metalúrgico Flotación Selectiva, Codelco Chile División Andina”, Octubre 2019.
- [6] González E., Fuentealba L., “Análisis Recuperación Molibdeno División Andina, Proyecto IM2, Octubre 2014.
- [7] Dondero, A. “Flotación de minerales”. Escuela de Ingeniería Química, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 2006.
- [8] Superintendencia de Geología- Gerencia de Recursos Mineros, “Resultados análisis QEMSCAN 2015 – 2019, alimentación Rougher flotación selectiva”, Marzo 2020.
- [9] Martínez C., “Definición de Unidades de Recuperación Rougher Codelco División Andina”, Agosto 2019.
- [10] Castro, S. “Flotation of Molybdenite”, In International Molybdenum Encyclopedia, Processing and Metallurgy, Edited by Alexander Sutulov, Santiago, Chile, Volume II, 1979.
- [11] Superintendencia de Gestión Producción, “Caracterización de minerales alimentados a planta concentradora abril 2013 – diciembre 2019”
- [12] Gutierrez L., Sepúlveda J., (1986), “Dimensionamiento y optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica.
- [13] Yianatos, J. “Flotación de Minerales”, Valparaíso: DEPARTAMENTO DE PROCESOS QUIMICOS Y AMBIENTALES, Universidad técnica Federico Santa Maria, 2008.
- [14] Mardones R.,” Informe Modelo de Procesos, Codelco Chile División Andina”, Marzo 2020.

[15] Superintendencia de Ingeniería de Procesos, "Data Courier diaria enero 2014 a julio-2019, Enero 2020.

[16] Mardones R., Plan de Producción 2019 Codelco División Andina, Enero 2020

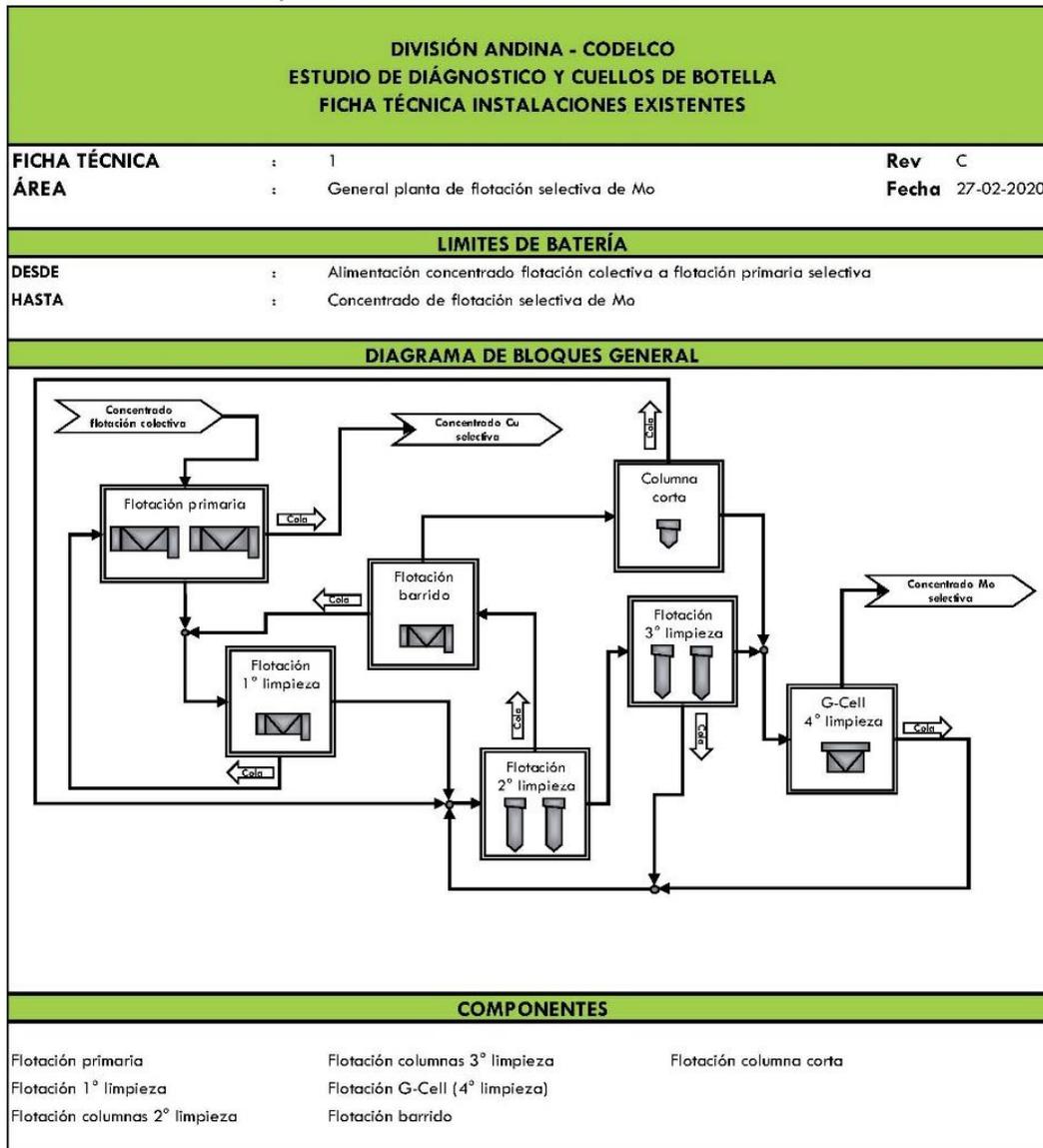
[17] Mardones R., "Evaluación Nuevos Modelos, Bases de Planificación Concentración". Mayo 2020

[18] Rodriguez C., "Conciliación Modelos- Tratamiento en Molienda, Recuperaciones de Cobre 2015-2020", Abril 2020.

Anexos

Anexo A: Guías Técnicas de Etapas de Flotación Selectiva

Ficha técnica 1: General planta de flotación selectiva de Mo.



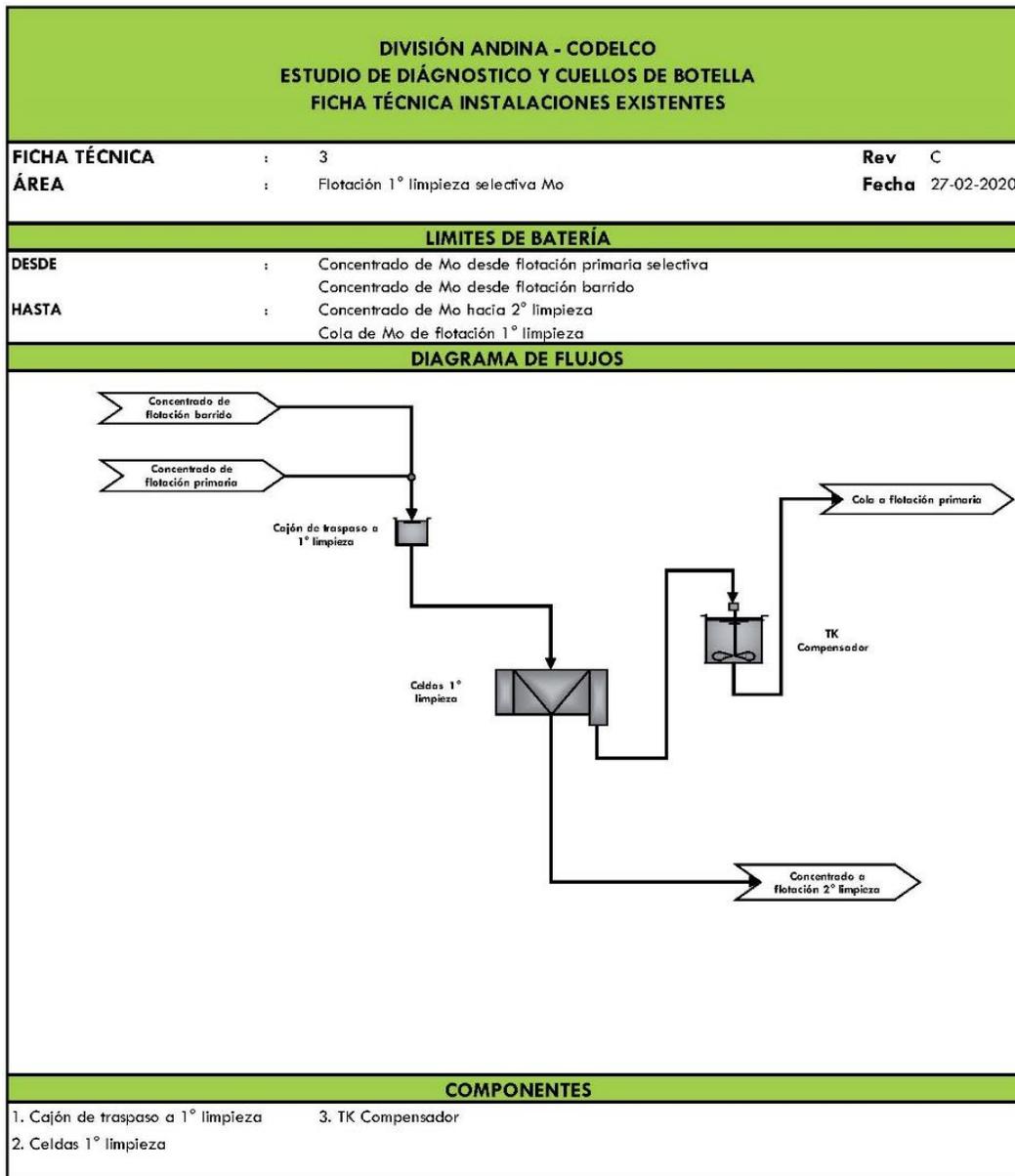
BASES DE DISEÑO GENERALES			
Parámetro Metalúrgicos	Unidad	Diseño	Observaciones
- Tratamiento nominal de concentrado mixto	tpd	1860	Promedio Respmet periodo ene-2018 a dic-2019
- Programa de Producción			
- Horas por día	h	24	
- Días por año	día	365	
- Utilización	%	97	Basado en registros existentes Respmet
- Ley de concentrado mixto (alimentación a selectiva)			
- Cobre	%	27,5	Promedio Respmet periodo ene-2018 a dic-2019
- Molibdeno	%	0,53	Promedio Respmet periodo ene-2018 a dic-2019
- Recuperación Global			
- Cobre	%	99,8	Promedio Respmet periodo ene-2018 a dic-2019
- Molibdeno	%	77,5	Promedio Respmet periodo ene-2018 a dic-2019
- Ley de concentrado final selectiva			
- Cobre	%	5,8	Promedio Respmet periodo ene-2018 a dic-2019
- Molibdeno	%	41,7	Promedio Respmet periodo ene-2018 a dic-2019
- Ley de cola final selectiva			
- Cobre	%	27,6	Promedio Respmet periodo ene-2018 a dic-2019
- Molibdeno	%	0,12	Promedio Respmet periodo ene-2018 a dic-2019
- Gravedad Específica mineral del concentrado mixto	-	4,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Concentración de sólidos alimentación a selectiva	%	42,0	Estimado para balance de materiales optimizado

Ficha técnica 2: Flotación primaria selectiva de Mo.

DIVISIÓN ANDINA - CODELCO ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO Y CUELLOS DE BOTELLA FICHA TÉCNICA INSTALACIONES EXISTENTES		
FICHA TÉCNICA	: 2	Rev C
ÁREA	: Flotación primaria selectiva Mo	Fecha 27-02-2020
LIMITES DE BATERÍA		
DESDE	: Concentrado de Cu-Mo desde flotación colectiva Cola desde flotación 1º limpieza	
HASTA	: Concentrado de Mo desde flotación barrido Cola de Mo (concentrado de Cu) a espesamiento Concentrado de Mo a flotación 1º limpieza	
DIAGRAMA DE FLUJOS		
COMPONENTES		
1. Estanque pre-mezcla rápida	3. Estanque mezcla rápida	5. Celdas rougher 500
2. Cajón de traspaso	4. Celdas rougher 300	6. Cajón cola rougher

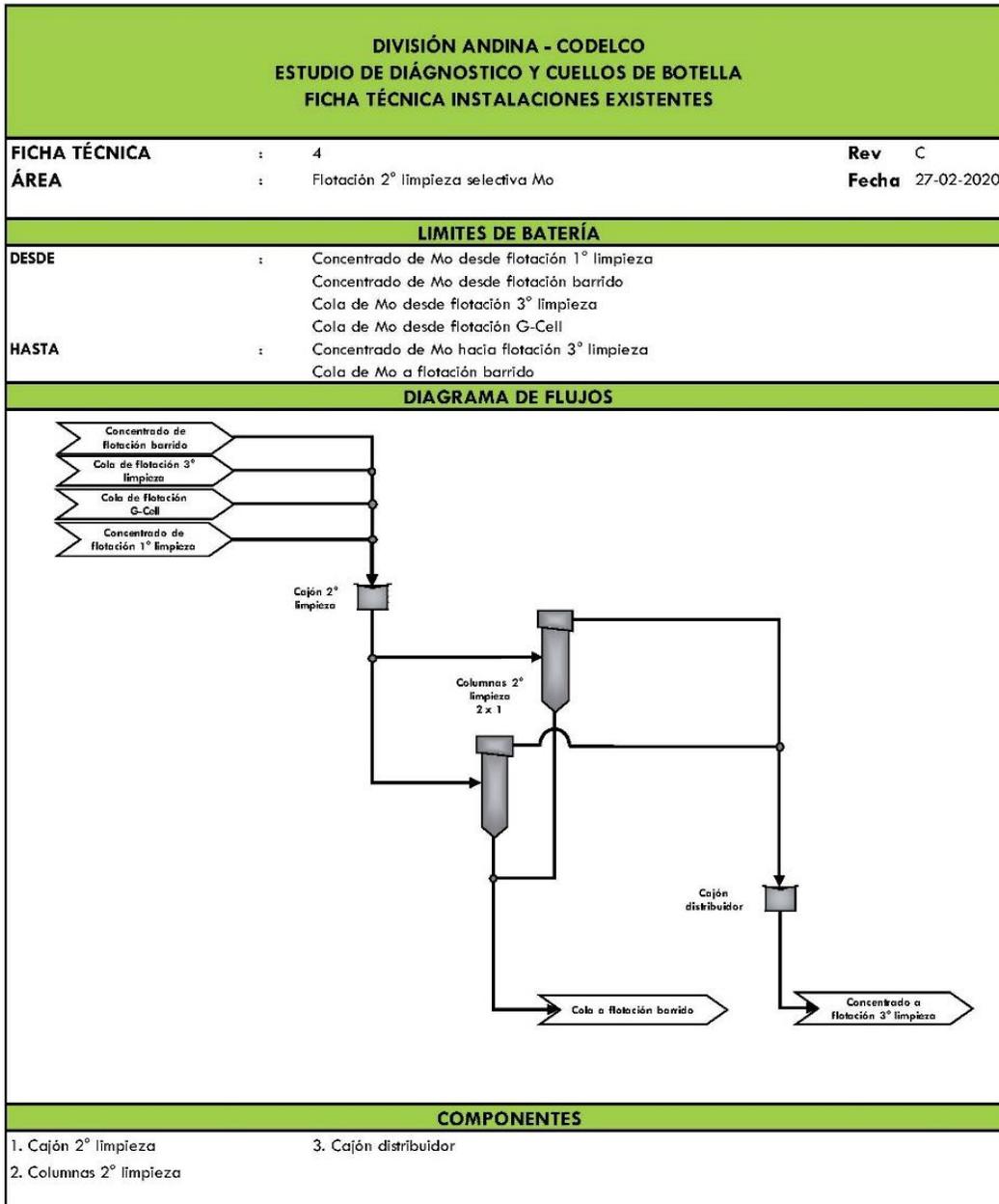
EQUIPOS E INSTALACIONES				
CARACTERÍSTICAS	Unidad	Valor	OBSERVACIONES	
1. Estanque pre-mezcla rápida				
Cantidad	Unidad	1	No disponible dentro de antecedentes facilitados	
Volumen	m ³	N/D		
2. Cajón de traspaso				
Cantidad	Unidad	1	No disponible dentro de antecedentes facilitados	
Volumen	m ³	N/D		
3. Estanque mezcla rápida				
Cantidad	Unidad	1	No disponible dentro de antecedentes facilitados	
Volumen	m ³	N/D		
4. Celdas rougher 300				
- Fabricante		Wemco		
- Modelo		Wemco 300		
- Cantidad de bancos		1		
- Celdas por banco		10		
- Arreglo		2-3-5		
- Capacidad celdas	m ³ / celda	8,5		
	pie ³ /celda	300		
- Volumen efectivo	m ³ / celda	6,8		
	pie ³ /celda	240		
5. Celdas rougher 500				
- Fabricante		Wemco		
- Modelo		Wemco 500		
- Cantidad de bancos		1		
- Celdas por banco		6		
- Arreglo		2-2-2		
- Capacidad celdas	m ³ / celda	14,2		
	pie ³ /celda	500		
- Volumen efectivo	m ³ / celda	11,3		
	pie ³ /celda	400		
6. Cajón cola rougher				
Cantidad	Unidad	1	No disponible dentro de antecedentes facilitados	
Volumen	m ³	N/D		
BASES DE DISEÑO				
Parámetro Metalúrgicos	Unidad	Diseño	Observaciones	
* Flotación primaria				
- Porcentaje sólidos en peso alimentación	%	40,0	Estimado para balance de materiales optimizado	
- Tiempo de residencia (sobre volumen útil)	min	30	Resultado de balance de flotación selectiva	
- Volumen útil de celda	%	80	Criterio utilizado para balance de flotación selectiva	
- Ley de concentrado (Mo)	%	2,0	Estimado para balance de finos optimizado	
- Recuperación (Mo)	%	85,0	Estimado para balance de finos optimizado	
- Gravedad específica concentrado		4,2	Estimado para balance de materiales optimizado	
- Porcentaje sólidos de concentrado	%	38,0	Estimado para balance de materiales optimizado	
- Porcentaje sólidos de concentrado (diluído)	%	37,0	Estimado para balance de materiales optimizado	
- Gravedad específica colas		4,0	Resultado de balance de materiales optimizado	
- Ley de cola primario (Mo)	%	0,10	Resultado de balance de finos optimizado	

Ficha técnica 3: Flotación 1° limpieza selectiva de Mo.



EQUIPOS E INSTALACIONES			
CARACTERÍSTICAS	Unidad	Valor	OBSERVACIONES
1. Cajón de traspaso a 1° limpieza			
Cantidad	Unidad	1	
Volumen	m ³	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
2. Celdas 1° limpieza			
- Fabricante	Wemco		
- Modelo	N/D		No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Cantidad de bancos	1		
- Celdas por banco	5		
- Arreglo	3-2		
- Capacidad celdas	m ³ / celda	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
	pie ³ /celda	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Volumen efectivo	m ³ / celda	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
	pie ³ /celda	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
3. TK Compensador			
Cantidad	Unidad	1	
Volumen	m ³	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
BASES DE DISEÑO			
Parámetro Metalúrgicos	Unidad	Diseño	Observaciones
* Flotación 1° limpieza			
- Porcentaje sólidos en peso alimentación	%	26,6	Estimado para balance de materiales optimizado
- Tiempo de residencia (sobre volumen útil)	min	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Volumen útil de celda	%	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Ley de concentrado (Mo)	%	4,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Recuperación (Mo)	%	80,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Gravedad específica concentrado		4,3	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado	%	25,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado (diluido)	%	24,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Gravedad específica colas		4,2	Resultado de balance de materiales optimizado
- Ley de cola 1° limpieza (Mo)	%	0,70	Resultado de balance de finos optimizado

Ficha técnica 4: Flotación 2° limpieza selectiva de Mo.



EQUIPOS E INSTALACIONES			
CARACTERÍSTICAS	Unidad	Valor	OBSERVACIONES
1. Cajón 2° limpieza			
Cantidad	Unidad	1	No disponible dentro de antecedentes facilitados
Volumen	m ³	N/D	
2. Columnas 2° limpieza			
- Fabricante		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Modelo		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Cantidad		2	
- Altura	m	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Diámetro	m	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Tratamiento	t/h	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
3. Cajón distribuidor			
Cantidad	Unidad	1	No disponible dentro de antecedentes facilitados
Volumen	m ³	N/D	
BASES DE DISEÑO			
Parámetro Metalúrgicos	Unidad	Diseño	Observaciones
* Flotación 2° limpieza			
- Porcentaje sólidos en peso alimentación	%	22,3	Estimado para balance de materiales optimizado
- Tiempo de residencia (sobre volumen útil)	min	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Ley de concentrado (Mo)	%	20,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Recuperación (Mo)	%	40,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Gravedad específica concentrado		4,6	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado	%	22,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado (diluido)	%	21,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Gravedad específica colas		4,2	Resultado de balance de materiales optimizado
- Ley de cola 2° limpieza (Mo)	%	4,0	Resultado de balance de finos optimizado

Ficha técnica 5: Flotación 3° limpieza selectiva de Mo.

DIVISIÓN ANDINA - CODELCO ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO Y CUELLOS DE BOTELLA FICHA TÉCNICA INSTALACIONES EXISTENTES		
FICHA TÉCNICA	: 5	Rev C
ÁREA	: Flotación 3° limpieza selectiva Mo	Fecha 27-02-2020
LIMITES DE BATERÍA		
DESDE	: Concentrado Mo desde flotación 2° limpieza	
HASTA	: Concentrado de Mo hacia flotación G-Cell Cola de Mo a flotación barrido Concentrado a cajón de concentrado final (eventual)	
DIAGRAMA DE FLUJOS		
COMPONENTES		
1. Columnas 3° limpieza 2. Espesador intermedio		

EQUIPOS E INSTALACIONES			
CARACTERÍSTICAS	Unidad	Valor	OBSERVACIONES
1. Columnas 3° limpieza			
- Fabricante		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Modelo		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Cantidad		2	
- Altura	m	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Diámetro	m	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Tratamiento	t/h	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
2. Espesador intermedio			
- Cantidad		1	
- Tipo de espesador		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Diámetro	pie	11	
- Área	m ²	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
BASES DE DISEÑO			
Parámetro Metalúrgicos	Unidad	Diseño	Observaciones
* Flotación 3° limpieza			
- Porcentaje sólidos en peso alimentación	%	21,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Tiempo de residencia (sobre volumen útil)	min	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Ley de concentrado (Mo)	%	30,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Recuperación (Mo)	%	40,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Gravedad específica concentrado		4,7	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado	%	21,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado (diluido)	%	20,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Gravedad específica colas		4,6	Resultado de balance de materiales optimizado
- Ley de cola 3° limpieza (Mo)	%	16,4	Resultado de balance de finos optimizado

Ficha técnica 6: Flotación G-Cell (4° limpieza) selectiva de Mo.

DIVISIÓN ANDINA - CODELCO ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO Y CUELLOS DE BOTELLA FICHA TÉCNICA INSTALACIONES EXISTENTES		
FICHA TÉCNICA	: 6	Rev C
ÁREA	: Flotación G-Cell (4° limpieza) selectiva Mo	Fecha 27-02-2020
LIMITES DE BATERÍA		
DESDE	: Concentrado Mo desde flotación 3° limpieza	
HASTA	: Concentrado de Mo final a espesamiento y filtro Cola de Mo a flotación 2° limpieza	
DIAGRAMA DE FLUJOS		
<pre>graph TD; A[Concentrado de flotación 3° limpieza] --> B[Celda G-Cell]; B --> C[Concentrado final de Mo a espesamiento y filtración]; B --> D[Cola a flotación 2° limpieza];</pre>		
COMPONENTES		
1. Celda G-Cell		

EQUIPOS E INSTALACIONES			
CARACTERÍSTICAS	Unidad	Valor	OBSERVACIONES
1. Celda G-Cell			
- Fabricante		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Modelo		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Cantidad		1	
- Altura	m	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Diámetro	m	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Tratamiento	t/h	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
BASES DE DISEÑO			
Parámetro Metalúrgicos	Unidad	Diseño	Observaciones
* Flotación G-Cell			
- Porcentaje sólidos en peso alimentación	%	40,4	Estimado para balance de materiales optimizado
- Tiempo de residencia (sobre volumen útil)	min	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Ley de concentrado (Mo)	%	45,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Recuperación (Mo)	%	30,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Gravedad específica concentrado		4,8	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado	%	39,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado (diluido)	%	38,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Gravedad específica colas		4,6	Resultado de balance de materiales optimizado
- Ley de cola G-Cell (4° limpieza) (Mo)	%	15,3	Resultado de balance de finos optimizado

Ficha técnica 7: Flotación barrido selectiva de Mo.

DIVISIÓN ANDINA - CODELCO ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO Y CUELLOS DE BOTELLA FICHA TÉCNICA INSTALACIONES EXISTENTES		
FICHA TÉCNICA	: 7	Rev C
ÁREA	: Flotación barrido selectiva Mo	Fecha 27-02-2020
LÍMITES DE BATERÍA		
DESDE	: Concentrado Mo desde flotación 3° limpieza	
HASTA	: Concentrado de Mo final a espesamiento y filtro Cola de Mo a flotación 2° limpieza	
DIAGRAMA DE FLUJOS		
<pre> graph TD A[Cola de 2° limpieza] --> B[Celdas barrido] B --> C[Cola a flotación 1° limpieza] B --> D[Cajón colector] D --> E[Esposador intermedio] E --> F[Concentrado a flotación columna corta] </pre>		
COMPONENTES		
1. Celdas barrido	3. Esposador intermedio	
2. Cajón colector		

EQUIPOS E INSTALACIONES			
CARACTERÍSTICAS	Unidad	Valor	OBSERVACIONES
1. Celdas barrido			
- Fabricante		Wemco	
- Modelo		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Cantidad de bancos		1	
- Celdas por banco		3	
- Arreglo		3	
- Capacidad celdas	m ³ / celda	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
	pie ³ /celda	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Volumen efectivo	m ³ / celda	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
	pie ³ /celda	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
2. Cajón colector			
Cantidad	Unidad	1	
Volumen	m ³	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
3. Espesador intermedio			
- Cantidad		1	
- Tipo de espesador		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Diámetro	m	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Área	m ²	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
BASES DE DISEÑO			
Parámetro Metalúrgicos	Unidad	Diseño	Observaciones
* Flotación Barrido			
- Porcentaje sólidos en peso alimentación	%	15,1	Estimado para balance de materiales optimizado
- Tiempo de residencia (sobre volumen útil)	min	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Volumen útil de celda	%	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Ley de concentrado (Mo)	%	5,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Recuperación (Mo)	%	80,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Gravedad específica concentrado		4,2	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado	%	15,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado (diluido)	%	14,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Gravedad específica colas		4,2	Resultado de balance de materiales optimizado
- Ley de cola barrido (Mo)	%	2,2	Resultado de balance de finos optimizado

Ficha técnica 8: Flotación columna corta selectiva de Mo.

DIVISIÓN ANDINA - CODELCO ESTUDIO DE DIAGNÓSTICO Y CUELLOS DE BOTELLA FICHA TÉCNICA INSTALACIONES EXISTENTES			
FICHA TÉCNICA	:	8	Rev C
ÁREA	:	Flotación columna corta selectiva Mo	Fecha 27-02-2020
LIMITES DE BATERÍA			
DESDE	:	Concentrado Mo desde flotación barrido	
HASTA	:	Concentrado de Mo final a flotación G-Cell Cola de Mo a flotación 2° limpieza	
DIAGRAMA DE FLUJOS			
<pre> graph LR A[Concentrado de flotación barrido] --> B[Columna corta] B --> C[Concentrado a flotación G-Cell] B --> D[Cajón cola columna corta] D --> E[Cola a flotación 2° limpieza] </pre>			
COMPONENTES			
1. Columna corta 2. Cajón cola columna corta			

EQUIPOS E INSTALACIONES			
CARACTERÍSTICAS	Unidad	Valor	OBSERVACIONES
1. Columna corta			
- Fabricante		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Modelo		N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Cantidad		1	
- Altura	m	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Diámetro	m	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Tratamiento	t/h	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
2. Cajón cola columna corta			
Cantidad	Unidad	1	
Volumen	m ³	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
BASES DE DISEÑO			
Parámetro Metalúrgicos	Unidad	Diseño	Observaciones
* Flotación columna corta			
- Porcentaje sólidos en peso alimentación	%	30,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Tiempo de residencia (sobre volumen útil)	min	N/D	No disponible dentro de antecedentes facilitados
- Ley de concentrado (Mo)	%	15,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Recuperación (Mo)	%	45,0	Estimado para balance de finos optimizado
- Gravedad específica concentrado		4,5	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado	%	30,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Porcentaje sólidos de concentrado (diluído)	%	29,0	Estimado para balance de materiales optimizado
- Gravedad específica colas		4,1	Resultado de balance de materiales optimizado
- Ley de cola columna corta (Mo)	%	3,2	Resultado de balance de finos optimizado

