

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Sr. Fernando Parada Luna

Ingeniero Supervisor
Sr. Jorge Vargas Órdenes

**Pruebas de lixiviación en columnas de mineral
oxidado Doña Elba, Compañía Minera las Cenizas,**



Julio Antonio Bertoni Jara

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

Abril, 2018

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mis padres Carlos y Medegy, por la formación y por estar siempre a mi lado, de igual manera que mis hermanos Carlos y Bruno por su tremendo apoyo y cariño durante toda mi vida y agradecer a Tania, por su amor, apoyo y que ha sido un pilar importante en estos años que hemos estado juntos. A mi familia en general a mis abuelos Bruno y Marianela, tíos y primos, por sus constantes muestras de cariño, apoyo y preocupación.

También quiero agradecer a mis compañeros de universidad, amigos del colegio y de la vida por sus consejos y momentos de diversión que me han acompañado en este largo camino. Al Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción y en especial a mi profesor patrocinante, Fernando Parada, por sus consejos, excelente disposición y guía a lo largo de este trabajo, además de darme la oportunidad y haber confiado en mis capacidades.

Finalmente quisiera agradecer a toda la gente de la Planta de Óxidos de Las Cenizas que tuve el agrado de conocer y que durante el desarrollo de mi Memoria de Título, ayudaron en esta última etapa para convertirme en profesional, además de la confianza que depositaron en mí para realizar este trabajo. A las personas del hospedaje y casino que lograron que mi estancia en Taltal fuese una gran experiencia.

RESUMEN

La Planta de óxidos de Compañía Minera Las Cenizas procesa minerales oxidados de cobre provenientes de la mina Barreal Seco; éste ya está llegando a su tonelaje máximo de extracción, es por esto que procesará mineral del yacimiento Doña Elba. Esta investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento de dicho mineral en la etapa de lixiviación mediante pruebas en columnas y encontrar una alternativa viable de procesarlo.

El trabajo consideró la realización de pruebas de curado y de lixiviación iso-pH en botellas. Luego de esto se realizaron ensayos de lixiviación en columnas con diferentes dosificaciones de ácido en la etapa de aglomerado, pruebas con mezcla de mineral, variando el orden de las soluciones lixiviantes (ILS-Refino), solución de riego con mayor acidez y ensayos con diferentes granulometrías.

La prueba de sulfatación o curado tuvo como objetivo determinar la dosificación ideal de ácido en la etapa de aglomerado para el mineral Elba. Los resultados obtenidos indican que la dosificación ideal de 25 kg/t. La prueba de lixiviación iso-pH se realizó con el objetivo de determinar el máximo consumo de ácido y la máxima recuperación de cobre para el mineral Elba. Los resultados obtenidos fueron una recuperación de 84,0% y un consumo de ácido total de 88,8 kg/ton.

Se realizaron 12 pruebas en columnas, de las cuales el mejor resultado en cuanto a recuperación de CuT se obtuvo en la columna 12 con 68,97% y un consumo de ácido de 46,17 kg/ton, con condiciones de granulometría ajustada a un P80 -1/4 de pulgada, 22 kg/ton de ácido en aglomerado y riego con refino. En cuanto a consumo de ácido total, la columna 9 destacó con 30,85 kg/ton y una recuperación de CuT de 64,93% siendo la prueba con 30% mineral Elba y 70% mineral Dominio proveniente de la mina Barreal Seco.

Si bien se logró obtener resultados interesantes relacionados a la recuperación de cobre y el consumo de ácido, no se llegó a una condición operacional óptima y es por esto que en el presente proyecto se insta a seguir con pruebas de este tipo, con nuevas configuraciones.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general	1
1.2. Objetivo específico	1
2. ASPECTOS GENERALES.....	2
2.1. Compañía Minera Las Cenizas (CMLC)	2
2.2. Planta de Óxidos.....	2
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1. Aglomeración y curado ^{[1] [2] [6]}	4
3.1.1. Variables del proceso de aglomeración ^[2]	5
3.1.2. Equipos aglomeradores ^[1]	7
3.2. Lixiviación ^{[1] [3]}	8
3.2.1. Clasificación de tipos de pilas ^[2]	9
3.3. Ciclo y riego de la pila ^[2]	10
3.3.1. Sistema de riego de pilas ^{[2] [4]}	11
3.3.2. Efecto de la ganga ^{[3] [5]}	12
4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE POX	13
4.1. Chancado	13
4.2. Aglomeración y curado	14
4.3. Lixiviación.....	15
4.4. Extracción por solventes (SX).....	17
4.5. Electro obtención	18

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	21
5.1. Mineral utilizado	21
5.1.1. Análisis mineralógico del mineral Doña Elba	22
5.1.2. Leyes de cabeza mineral Doña Elba	24
5.2. Test de sulfatación o curado.....	24
5.3. Test lixiviación iso-pH en botellas agitadas.....	25
5.4. Ensayos de lixiviación en columnas	26
5.4.1. Descripción del equipo y procedimiento experimental	26
5.4.2. Pruebas en columnas	29
5.4.3. Granulometría y dosificación de ácido en aglomerado.....	31
5.4.4. Análisis químico de cabeza.....	32
5.4.5. Análisis químico soluciones de riego	33
6. RESULTADOS	35
6.4. Prueba de sulfatación o curado	35
6.5. Test lixiviación Iso-pH en botellas agitadas	37
6.6. Pruebas de lixiviación en columnas	40
6.6.1. Pruebas exploratorias.....	40
6.6.2. Análisis químico por tamaño a ripio columna 1	45
6.6.3. Pruebas finales.....	47
7. CONCLUSIONES.....	51
8. RECOMENDACIONES	53
BIBLIOGRAFIA	54
ANEXOS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica Planta de Óxidos, Faena Taltal, Compañía Minera Las Cenizas.	3
Figura 2. Comparación de la percolación entre mineral aglomerado y sin aglomerar. (Fuente: Dhawan, Safarzadeh, Miller, Moats, & Rajamani, 2013 ^[6]).....	4
Figura 3. Fuerzas de enlace en un aglomerado. (Fuente: Ipinza, Jorge. 2010. Hidrometalurgia I, Universidad Arturo Prat ^[2])	6
Figura 4. Representación esquemática de la operación de un tambor aglomerador. (Fuente: Ruiz, M. C. 2013. Hidrometalurgia. Universidad de Concepción ^[1])	7
Figura 5. Técnicas de irrigación de las pilas. (Fuente: Ipinza, Jorge. 2010. Hidrometalurgia I, Universidad Arturo Prat ^[2])	11
Figura 6. Diagrama de flujo circuito chancado Planta de Óxidos.....	14
Figura 7. Comparación mineral "Dominio" sin aglomerar y aglomerado, Planta de Óxidos, Las Cenizas, Taltal.	15
Figura 8. Pilas de lixiviación Planta de Óxidos, Las Cenizas, Taltal.....	16
Figura 9. Esquema de la etapa de extracción por solventes, Planta de Óxidos, Las Cenizas, Taltal.	18
Figura 10. Nave de Electro Obtención, Planta de Óxidos, Las Cenizas, Taltal.	19
Figura 11. Diagrama de flujos Planta de Óxidos, Las Cenizas, Taltal. ...	20
Figura 12. Ubicación geográfica mina Doña Elba.....	21
Figura 13. Esquema circuito de lixiviación en columnas.	27
Figura 14. Columnas de lixiviación. Compañía Minera Las Cenizas, Planta de Óxidos, Taltal.	28
Figura 15. Ejemplo muestras rotuladas drenaje de columnas a laboratorio.	29

Figura 16. Resultado prueba sulfatación, Dosificación de ácido en aglomerado versus concentración de cobre en solución de lavado.....	36
Figura 17. Resultado prueba de sulfatación, dosificación de ácido en aglomerado versus acidez en solución de lavado.	37
Figura 18. Curva cinética de extracción, pruebas exploratorias.....	41
Figura 19. Curva cinética de extracción, pruebas exploratorias.....	42
Figura 20. Curva cinética de extracción, pruebas exploratorias.....	43
Figura 21. Recuperación CuT y consumo de ácido total, Pruebas Exploratorias.....	44
Figura 22. Cinética de extracción, Pruebas Finales.	48
Figura 23. Recuperación de CuT y consumo de ácido total, Pruebas Finales.	49



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición Mineralógica.....	22
Tabla 2. Ocurrencia de Cobre.....	23
Tabla 3. Leyes de cabeza.....	24
Tabla 4. Parámetros experimentales para pruebas de sulfatación.	25
Tabla 5. Características de columnas de Lixiviación.....	27
Tabla 6. Resumen pruebas en columna.	30
Tabla 7. Tabla resumen pruebas de lixiviación en columna.....	32
Tabla 8. Análisis químico de cabeza pruebas en columnas de lixiviación.	32
Tabla 9. Análisis químico soluciones de riego.	33
Tabla 10. Resultado de análisis químico a muestra de lavado	35
Tabla 11. Resultado análisis químico solución fuerte, solución de lavado y ripió.....	37
Tabla 12. Extracción de cobre y consumo de ácido total en función del pH, lixiviación en botellas Iso-pH, SGS.....	39
Tabla 13. Resumen pruebas exploratorias en columna.	40
Tabla 14. Análisis químico de cabeza por malla columna 1.....	45
Tabla 15. Análisis químico de ripio por malla columna 1.	46
Tabla 16. Resumen pruebas finales en columna.....	47
Tabla 17. Resultados Test ICP OES.	55
Tabla 18. Análisis granulométrico por mallas, columna 1	57
Tabla 19. Análisis granulométrico por mallas, columna 2.	57
Tabla 20. Análisis granulométrico por mallas, columna 3.	58
Tabla 21. Análisis granulométrico por mallas, columna 4.	58
Tabla 22. Análisis granulométrico por mallas, columna 5.	59
Tabla 23. Análisis granulométrico por mallas, columna 6.	59
Tabla 24. Análisis granulométrico por mallas, columna 7.	60
Tabla 25. Análisis granulométrico por mallas, columna 8.	60

Tabla 26. Análisis granulométrico por mallas, columna 9.	61
Tabla 27. Análisis granulométrico por mallas, columna 10.	61
Tabla 28. Análisis granulométrico por mallas, columna 11.	62
Tabla 29. Análisis granulométrico por mallas, columna 12.	62
Tabla 30. Análisis químico solución de drenaje columna 1.....	63
Tabla 31. Análisis químico solución de drenaje columna 2.....	64
Tabla 32. Análisis químico solución de drenaje columna 4.....	65
Tabla 33. Análisis químico solución de drenaje columna 3.....	66
Tabla 34. Análisis químico solución de drenaje columna 5.....	67
Tabla 35. Análisis químico solución de drenaje columna 6.....	68
Tabla 36. Análisis químico solución de drenaje columna 7.....	69
Tabla 37. Análisis químico solución de drenaje columna 8.....	70
Tabla 38. Análisis químico solución de drenaje columna 9.....	71
Tabla 39. Análisis químico solución de drenaje columna 10.....	72
Tabla 40. Análisis químico solución de drenaje columna 11.....	73
Tabla 41. Análisis químico solución de drenaje columna 12.....	74
Tabla 42. Extracción diaria de cobre, columna 1.	75
Tabla 43. Extracción diaria de cobre, columna 2.	76
Tabla 44. Extracción diaria de cobre, columna 3.	77
Tabla 45. Extracción diaria de cobre, columna 4.	78
Tabla 46. Extracción diaria de cobre, columna 5.	79
Tabla 47. Extracción diaria de cobre, columna 6.	80
Tabla 48. Extracción diaria de cobre, columna 7.	81
Tabla 49. Extracción diaria de cobre, columna 8.	82
Tabla 50. Extracción diaria de cobre, columna 9.	83
Tabla 51. Extracción diaria de cobre, columna 10.	84
Tabla 52. Extracción diaria de cobre, columna 11.	85
Tabla 53. Extracción diaria de cobre, columna 12.	86

Nomenclatura

CMLC	:	Compañía Minera Las Cenizas
LIX	:	Lixiviación
SX	:	Extracción por solventes
EW	:	Electro obtención (Electrowinning)
PLS	:	Solución rica en cobre (Pregnant Leaching Solution)
ILS	:	Solución intermedia de cobre
P80	:	Tamaño de malla o partícula en el cual pasa el 80% del producto
m	:	Metros
POX	:	Planta de Óxidos
RS	:	Razón de solubilidad en ácido sulfúrico
mm	:	Milímetros
kg	:	Kilogramos
g	:	Gramos
ppm	:	Partes por millón
t	:	Toneladas
h	:	Horas
tms	:	Tonelada métrica seca
Ref	:	Solución con bajo contenido de cobre
RPM	:	Revolución por minuto
CuT	:	Cobre total
Cu _{Soluble}	:	Cobre soluble en ácido sulfúrico
Dominio	:	Mineral proveniente de mina Barreal Seco
HDPE	:	polietileno de alta densidad (High density polyethylene)

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la planta de óxidos de la Compañía Minera Las Cenizas procesa minerales oxidados de cobre provenientes del yacimiento Barreal Seco; éste ya está llegando a su tonelaje máximo de extracción, dada esto la planta de óxidos (POX) procesará mineral de un nuevo yacimiento llamado Doña Elba. Es por esto que esta investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento de dicho mineral en la etapa de lixiviación mediante pruebas en columnas y encontrar una alternativa viable de procesarlo.

1.1. Objetivo general

Estudiar y determinar las condiciones operacionales óptimas del proceso de lixiviación del mineral perteneciente al yacimiento Doña Elba, mediante pruebas de lixiviación en columnas.

1.2. Objetivo específico

- Evaluar la dosificación óptima de ácido sulfúrico para la etapa de aglomerado y curado.
- Determinar el consumo de ácido sulfúrico en las pruebas en columnas.
- Determinar la recuperación de cobre alcanzada luego de la lixiviación en columnas.
- Determinar las condiciones operacionales óptimas de tratamiento del mineral.

2. ASPECTOS GENERALES

2.1. Compañía Minera Las Cenizas (CMLC)

El grupo minero Las Cenizas nació el 23 de junio de 1978 con la adquisición de las pertenencias mineras y la planta de beneficio de minerales ubicada en la localidad de Cabildo situada en la provincia de Petorca, V Región de Valparaíso, Chile. En 1995 se dio inicio en Taltal, al proyecto Las Luces conformado por la mina subterránea y la planta concentradora. En 2011 se dio inicio al Proyecto Óxidos Taltal, conformado por la mina Aguilucho hoy en día agotada y la planta de lixiviación.

La producción de cobre fino total de Compañía Minera Las Cenizas (CMLC) supera las 33.000 toneladas al año, para lo cual se emplea sobre 700 personas contratadas directamente y a más de 1200 trabajadores de empresas colaboradoras.

2.2. Planta de Óxidos

Se ubica a 60 kilómetros al sureste de la comuna de Taltal, II Región de Antofagasta.

Procesa 100.000 toneladas por mes de minerales oxidados de cobre, abastecido por la mina Barreal Seco con leyes entre 0,8 a 1,0% de Cobre total. La planta obtiene un producto final de 9.000 a 10.000 toneladas de cátodos por año, mediante operaciones unitarias de chancado, aglomeración y curado, lixiviación en pilas, extracción por solventes y electro obtención.

En la Figura 1 se aprecia la ubicación geográfica de la planta de óxidos.



Figura 1. Ubicación geográfica Planta de Óxidos, Faena Taltal, Compañía Minera Las Cenizas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Aglomeración y curado [1] [2] [6]

La aglomeración desde el punto de vista físico produce la adhesión de finos en torno a las partículas más gruesas, lo que genera un glómero de tamaño relativamente homogéneo y estable, generando así en la pila un volumen importante de huecos lo que se traduce en una mejora en la permeabilidad del lecho mineral.

Desde el punto de vista químico el curado es el responsable de la sulfatación de los óxidos de manera rápida y enérgica, lo que resulta en efluentes líquidos con altos contenidos de cobre, solubiliza el ion de hierro que es la base del ion férrico necesario para la disolución de sulfuros e inhibe la disolución de algunas especies indeseables de la ganga como la alúmina y la sílice.

En la Figura 2 se muestra la diferencia de cómo fluye el líquido a través de un mineral aglomerado y uno no aglomerado.

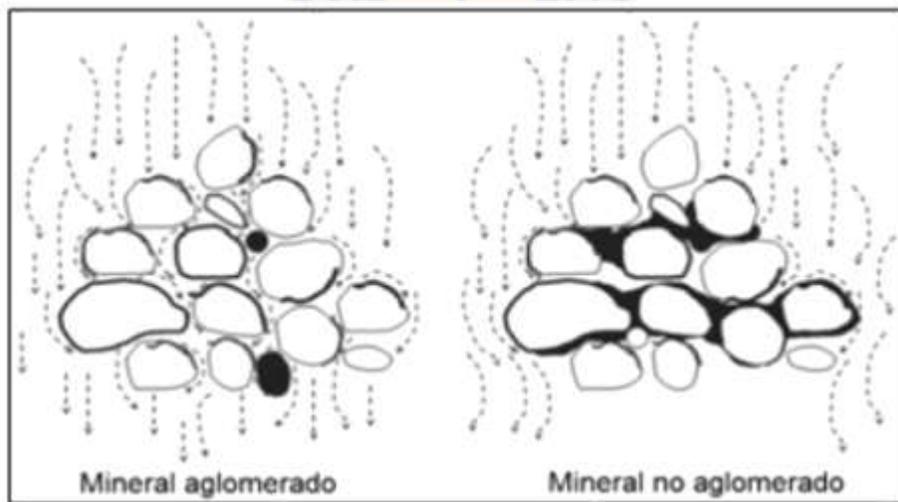


Figura 2. Comparación de la percolación entre mineral aglomerado y sin aglomerar. (Fuente: Dhawan, Safarzadeh, Miller, Moats, & Rajamani, 2013^[6])

3.1.1. Variables del proceso de aglomeración [2]

Dentro de las variables físicas que influyen en la calidad del glómero se pueden encontrar las características del mineral a aglomerar y la humedad de aglomeración. Además, existen variables operacionales como las características del tambor aglomerador y sus condiciones de operación.

- a) Humedad de aglomeración: la variable más importante para producir buenos aglomerados es el contenido de humedad general, debido a los efectos de la tensión superficial que mantiene unidas las partículas de mineral. Muy poca humedad hace imposible el desarrollo de una película de líquido entre las partículas y las partículas finas no se adhieren a las más gruesas, provocando apozamientos y derrumbes. Por otro lado, demasiada humedad separa las partículas pequeñas de las más grandes, teniendo el mismo efecto de apozamientos y derrumbes. La humedad óptima es definida como la máxima humedad antes de llegar al punto adhesivo, en el cual el material se torna pastoso, se pierde esfericidad de los glómeros y además distorsiona significativamente su distribución de tamaño.

En la Figura 3 se puede apreciar como son los enlaces entre las partículas una vez ocurrida la aglomeración.

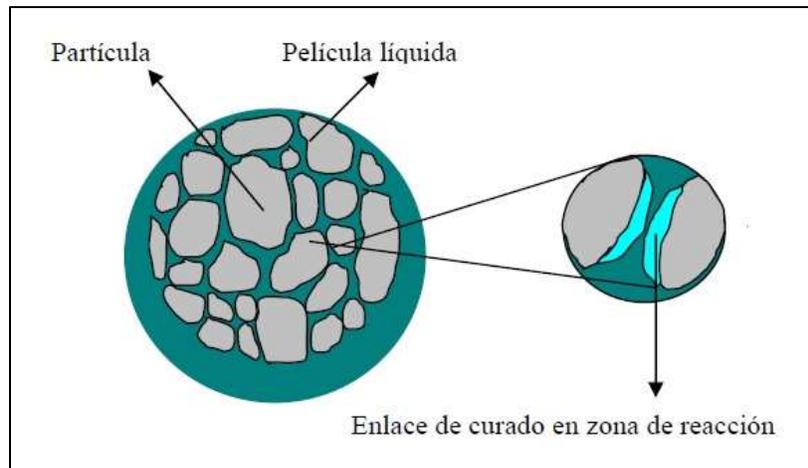


Figura 3. Fuerzas de enlace en un aglomerado. (Fuente: Ipinza, Jorge. 2010. Hidrometalurgia I, Universidad Arturo Prat [2])

b) Principio de aglomeración: como se aprecia en la Figura 3, el principio químico que mantiene unidas las partículas en el aglomerado está explicado por las fuerzas de tensión superficial o más bien conocidas como fuerzas capilares, debido a que un líquido puede subir entre dos paredes sin ayuda externa, como resultado de las fuerzas de atracción entre las moléculas del líquido y las paredes del material capilar. Cuando hay una delgada película de agua entre dos partículas de mineral, estas mismas fuerzas de tensión superficial ayudan a mantener unidas las partículas.

Cabe destacar que actualmente el método comúnmente utilizado para evaluar la calidad del glómero consiste en una inspección visual por parte del operador.

3.1.2. Equipos aglomeradores ^[1]

Existen dos grandes formas de suministrar el ácido en la etapa de aglomeración, el primero consiste en un sistema de regadores dispuesto sobre las correas transportadoras desde el área de chancado hacia el lugar donde se realizarán las pilas y es en este trayecto mediante rociadores donde se adicionan los reactivos, la segunda manera de aglomerar consiste de un cilindro metálico (tambor), revestido interiormente con una goma antiácida, provisto de levantadores (lifters). En la parte central del cilindro se ubican dos tuberías perforadas con el propósito de suministrar agua para humedecer el mineral y hacia el interior del tambor la tubería que adiciona el ácido concentrado para curar el mineral. El tambor gira a baja velocidad y con una inclinación tal, que la carga fluya longitudinalmente. El aglomerado posee una cierta humedad debido a la adición ya antes comentada de ácido y agua, la cual varía entre 8-15%. En la Figura 4 se observa una representación esquemática de un tambor aglomerador.

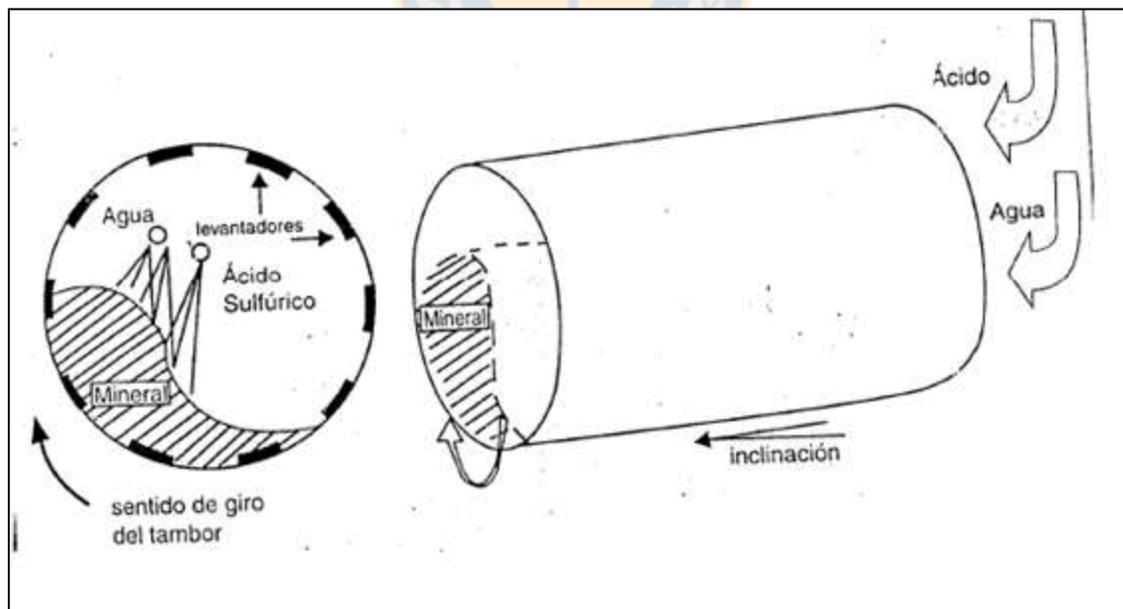


Figura 4. Representación esquemática de la operación de un tambor aglomerador. (Fuente: Ruiz, M. C. 2013. Hidrometalurgia. Universidad de Concepción ^[1])

3.2. Lixiviación ^[1] ^[3]

La lixiviación corresponde a la disolución selectiva de los constituyentes de interés de la mena o concentrado para obtener una solución acuosa conteniendo el metal valioso y un residuo insoluble conteniendo el material sin valor.

Los diferentes métodos disponibles para ejecutar la operación del proceso de lixiviación de minerales, buscan responder a las interrogantes fundamentales de la industria, en términos de obtener el máximo beneficio económico con el mínimo de costos posibles. Los métodos más conocidos para la lixiviación son:

1. Lixiviación in situ: consiste en la aplicación de soluciones directamente sobre el mineral que está ubicado en el yacimiento, sin someterlo a labores de extracción minera. Debido a sus bajos costos de inversión es una técnica factible para la recuperación de metales desde materiales de muy baja ley, no explotables por otros métodos.
2. Lixiviación en bateas: el mineral se dispone en contacto con la solución, de tal forma que inunda la batea, la cual tiene un fondo cubierto con un medio filtrante. Se utiliza para tratar minerales de alta ley y bajo porcentaje de finos. El ciclo de lixiviación es de varios días.
3. Lixiviación en botaderos (o Dump leaching): es el tratamiento de minerales de bajas leyes y/o baja ley de corte de la planta principal, conocidos como "estéril mineralizado". Se caracterizan por ser de cinética lenta (años) y obtener bajas recuperaciones.
4. Lixiviación por agitación: requiere que el mineral esté finamente molido, aumentando el área expuesta con el objetivo de dispersar los sólidos en una emulsión, formando una suspensión homogénea,

dispersar burbujas de gas en la solución y acelerar velocidades de disolución, incrementando la transferencia de masa.

5. Lixiviación en pilas: a diferencia de los botaderos, en este caso el mineral tiene una mayor ley y, por ende, económicamente es sustentable un tratamiento más complejo a través de una planta de chancado al menos de tipo secundario y usualmente terciario. Debido a su granulometría más fina se recomienda aglomerar los finos para restituir la permeabilidad al lecho mineral a lixiviar. Además de adicionar el agua, en el caso de minerales de cobre se adiciona ácido concentrado, para efectuar el curado ácido ya antes mencionado.

3.2.1. Clasificación de tipos de pilas [2]

Las pilas se pueden clasificar dado el uso de la superficie en la cual se encuentra la pila, lo que define los siguientes tipos:

1. Pila renovable o dinámica: su piso es reutilizable, de modo que terminado el ciclo de lixiviación se retira el ripio para reemplazarlo con material fresco.
2. Pila estática o permanente: su piso no es reutilizable, de modo que terminado el ciclo de lixiviación no se retira el ripio, sino que se abandona.
3. Pila modular: es una combinación de ambas, en que sólo se impermeabiliza una vez el piso, el ripio se abandona, pero sobre él se deposita material fresco formando una segunda capa en el sentido vertical. Este tipo de pila se utiliza principalmente en la lixiviación de botaderos.

En general la clasificación dada depende fundamentalmente del espacio disponible en planta, desde el punto de vista operacional, las pilas se pueden clasificar en:

1. Pila unitaria: se impermeabilizan diferentes sectores de la planta. Todo el material depositado en estos sectores pasa simultáneamente por diversas etapas del ciclo de lixiviación.
2. Pila dinámica: se impermeabiliza un sector de la planta y en esta pila coexisten materiales que están en distintas etapas del ciclo de lixiviación. Coexistiendo pilas de "cabeza", "intermedia" y de "cola".

Cabe mencionar la importancia de lixiviar de la manera más selectiva posible los minerales de interés, ya que de esta forma se optimiza el consumo de ácido en el proceso y se minimiza la concentración iónica en la solución lixivante, lo que favorece la etapa de extracción por solventes. Además, es importante obtener una cinética de lixiviación adecuada de modo de recuperar el material de interés lo más rápido posible.

3.3. Ciclo y riego de la pila ^[2]

Se entenderá como ciclo metalúrgico o de lixiviación de una pila, el período de tiempo medido en días o meses, en que un mineral se deposita en una cancha de lixiviación y que se somete a las siguientes operaciones:

1. Lixiviación o regadío con solución lixivante: momento en el cual se adiciona la solución lixivante al mineral, con el fin de solubilizar el cobre presente en éste.
2. Lavado con agua: se realiza con el fin de disminuir la impregnación de solución químicamente activa, ya sea porque contiene un elemento valioso en solución o porque contiene un lixivante contaminante y/o peligroso.
3. Drenaje: antes de retirar el ripio de una pila renovable o de abandonarlo en el caso de una pila permanente, se deja en reposo para que percole la cantidad de solución contenida.

Definido el ciclo, se procede a definir la dimensión de las pilas de lixiviación. Cabe destacar que la carga y descarga del mineral en el caso de las pilas renovables forma parte del ciclo.

3.3.1. Sistema de riego de pilas [2] [4]

El riego de las pilas se puede realizar fundamentalmente por dos procedimientos; por aspersión o por distribución de goteo, siendo este último siendo recomendable en caso de escasez de líquidos, bajas temperaturas y problemas de arrastre de solución por el viento. El riego por aspersión resulta favorable cuando existe agua en abundancia, condiciones climáticas favorables de viento y temperatura, peligro de precipitación de carbonatos evidente y cuando no existen problemas con el arrastre de la solución por el viento.

En la Figura 5 se muestran las diferentes técnicas para regar las pilas de lixiviación.

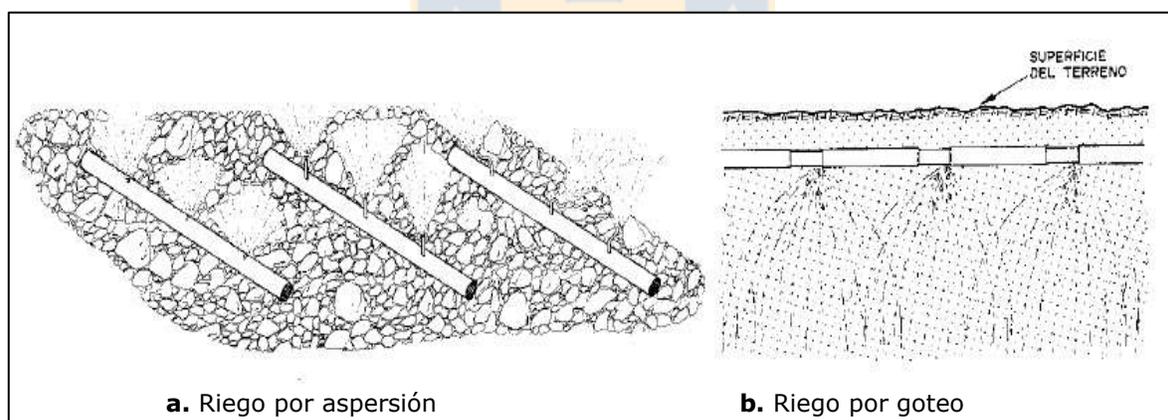


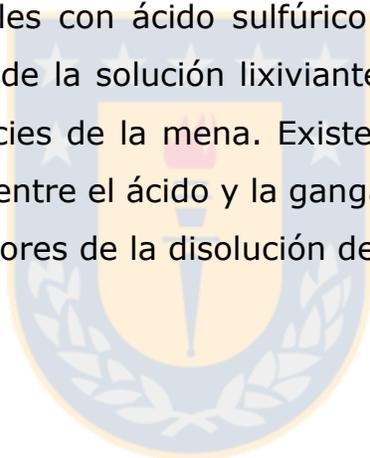
Figura 5. Técnicas de irrigación de las pilas. (Fuente: Ipinza, Jorge. 2010. Hidrometalurgia I, Universidad Arturo Prat [2])

3.3.2. Efecto de la ganga ^[3] ^[5]

La ganga juega un rol importante dentro de la lixiviación ácida y se manifiesta principalmente a través del grado de consumo de ácido, de la cinética de disolución y del grado de penetración de la solución lixivante en las partículas. Esta se encarga de consumir el H_2SO_4 disminuyendo este reactivo para la disolución del cobre. Las gangas más abundantes en los minerales oxidados de cobre son las arcillas y los carbonatos o $CaCO_3$.

Si la velocidad de la reacción de la solución con el mineral y la ganga es mayor a la velocidad de reposición del ácido, entonces se puede llegar a perder la totalidad de los iones férricos y el H_2SO_4 .

La lixiviación de minerales con ácido sulfúrico depende no sólo de las condiciones de Eh y pH de la solución lixivante sino que también de la mineralogía de las especies de la mena. Existe una serie de reacciones adicionales que ocurren entre el ácido y la ganga siendo los productos de estas reacciones pasivadores de la disolución del mineral.



4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE POX

4.1. Chancado

El principal objetivo del chancado es efectuar las reducciones de tamaño necesarias, hasta obtener un producto de una granulometría adecuada que permita el desarrollo de la lixiviación en pilas.

En Planta de Óxidos la etapa consta de tres chancadores. El chancador primario modelo Sandvik CJ - 412 de tipo mandíbula, el cual es alimentado mediante camiones, con un tamaño promedio de rocas de 80 centímetros de diámetro, la descarga de éste se encuentra ajustada a 4 pulgadas (102mm) y se dirige hacia un harnero primario, y luego uno secundario. El sobre tamaño del segundo harnero se dirige como alimentación del chancador secundario modelo Sandvik CH - 440 de tipo cono, cuya descarga debe pasar por el harnero primario y secundario, de esta forma los productos de los chancadores (1º y 2º) se acopian en un silo para luego ser trasladados mediante correas transportadoras a una pila de almacenamiento.

De esta forma el mineral bajo tamaño del segundo harnero previamente chancado se dirige a un tercer y último harnero, cuyo bajo tamaño es trasladado mediante correas transportadoras a la pila de almacenamiento que alimentará a la etapa de aglomerado.

Por otro lado, el sobre tamaño de este harnero alimenta a un chancador terciario modelo Sandvik CH - 440 de tipo cono ajustado a una descarga de 12 milímetros, su producto se dirige al harnero terciario ya comentado, en donde finaliza la etapa de chancado. El P80 final del mineral chancado es de aproximadamente 5/8 de pulgada lo que es equivalente a 15 mm.

En la Figura 6 se puede apreciar el diagrama de flujos del circuito de chancado de POX.

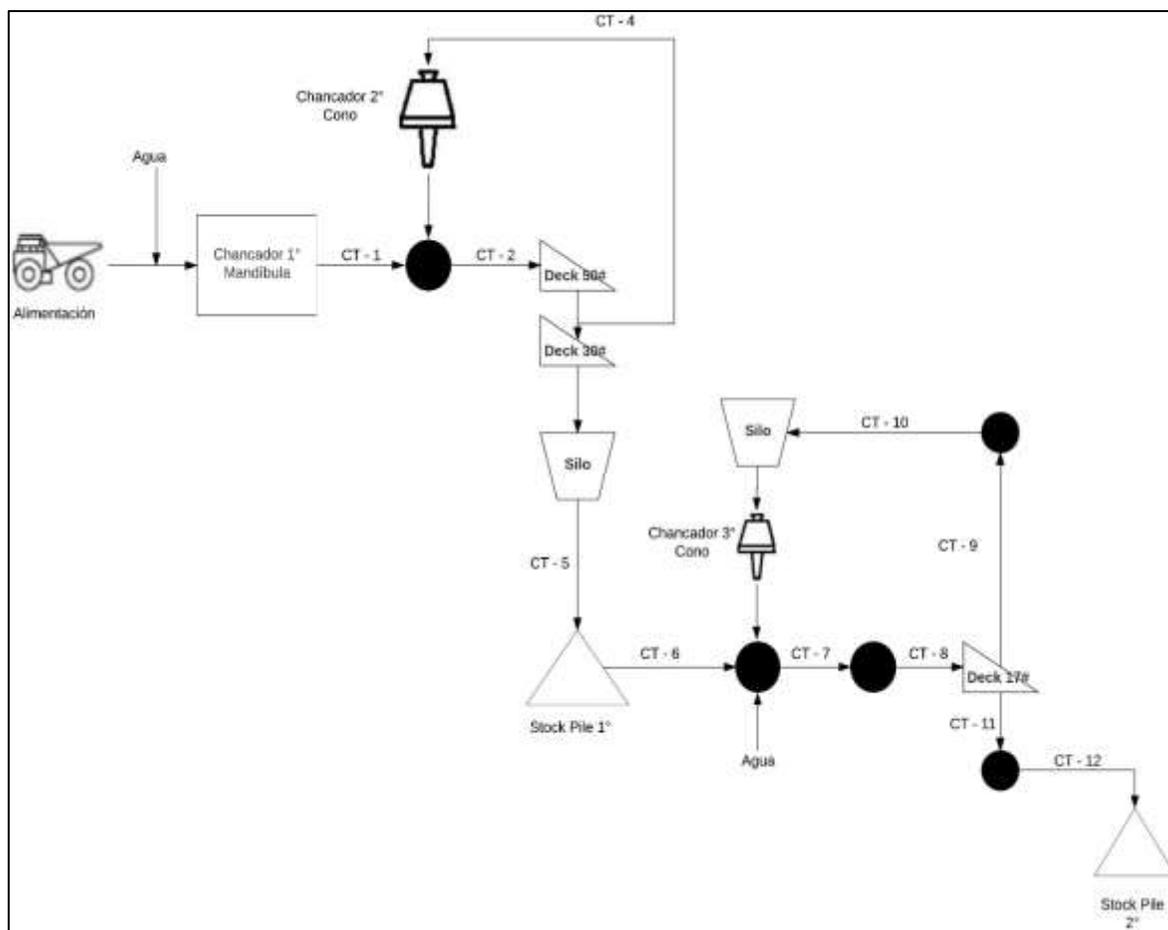


Figura 6. Diagrama de flujo circuito chancado Planta de Óxidos.

4.2. Aglomeración y curado

El proceso de aglomerado y curado se realiza en un tambor aglomerador, que posee una capacidad máxima de 250 t/h y con un diámetro de 2,1m lo que permite un tiempo de residencia promedio de 1 minuto, durante este minuto se adicionan los reactivos para curar el mineral en el orden:

- H_2SO_4 (15 kg/tms), con 95-98% de pureza
- Refino (En función de la calidad del glómero, promedio de 60kg/tms)

La finalidad de esta etapa es obtener un mineral más homogéneo en su composición y con mejor consistencia física, lo que se logra con la adición de solución de refinó y ácido sulfúrico. La concentración de ácido en la solución depende de la ley de cobre de cabeza y de la presencia de impurezas que consuman a éste, como por ejemplo, los carbonatos y arcillas. En la Figura 7 se muestra la diferencia entre el mineral Dominio sin aglomerar y aglomerado.



Figura 7. Comparación mineral "Dominio" sin aglomerar y aglomerado, Planta de Óxidos, Las Cenizas, Taltal.

4.3. Lixiviación

Una vez terminada la etapa de aglomeración, el producto es trasladado mediante camiones, para luego apilarlo en el terreno previamente preparado. Una vez hecho esto se deja reposar por 24 horas. Las pilas formadas tienen una altura de 1,4 metros con un ciclo de riego de 43 días, compuestos por 23 días de riego con solución intermedia de cobre (ILS) y luego los últimos 20 días con refinó, con una tasa de riego de 8 L/hm², regadas por aspersores.

La lixiviación se divide en tres grandes partes, ya que coexisten pilas que se encuentran en diferentes etapas, ya sea iniciando su ciclo, en medio de su ciclo y ya finalizando éste. Es por ello que se generan tres diferentes corrientes de drenaje; rica en cobre (PLS), medianamente cargada de cobre (ILS) y una solución empobrecida en cobre, que es mezclada con el refino. El área de lixiviación se encuentra dividida en 30 pilas y cada una de estas pilas con 9 módulos.

La solución de refino se utiliza para regar las siguientes pilas que estén terminando su ciclo, así también, las soluciones intermedias riegan a las pilas nuevas y las que están en una etapa intermedia del ciclo, en cambio la solución rica en cobre (PLS) se dirige a la siguiente etapa del proceso, la extracción por solventes. En la Figura 8 se muestran las pilas de lixiviación de Planta de Óxidos.

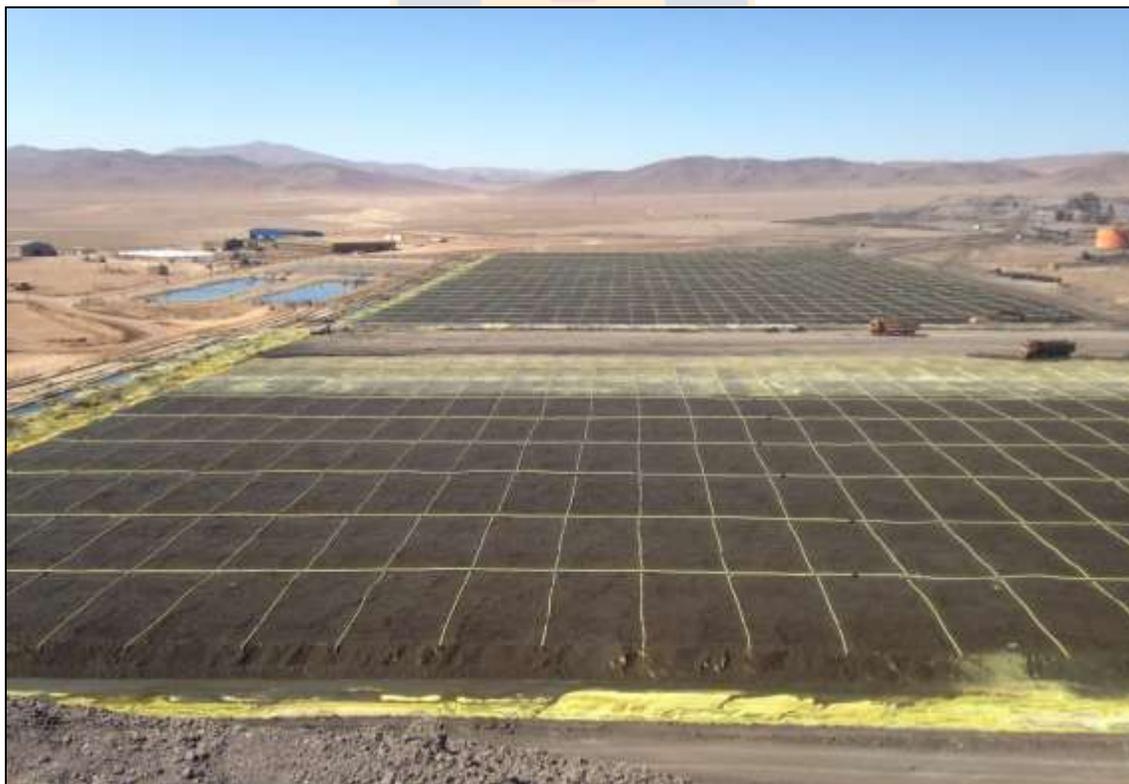


Figura 8. Pilas de lixiviación Planta de Óxidos, Las Cenizas, Taltal.

4.4. Extracción por solventes (SX)

La etapa de extracción por solventes tiene como objetivo purificar, concentrar y separar los metales valiosos que se encuentran en las soluciones enriquecidas en cobre, provenientes del proceso de lixiviación, mediante el uso de agentes orgánicos. La planta de SX de la planta de óxidos consta de tres etapas de extracción, dos etapas de lavado y una etapa de re-extracción.

La solución de PLS proveniente de la etapa de lixiviación entra al sistema en los mezcladores a un flujo de 170 m³/h con una concentración de 6,80g/L de Cu²⁺ y 2g/L de H₂SO₄, es aquí donde ocurre el primer contacto de las fases orgánicas y la acuosa, la fase orgánica entra al mezclador con un flujo de 185 m³/h, ésta posee un contenido de cobre muy bajo y es denominado "orgánico descargado" con 2,0g/L de Cu²⁺.

La fase orgánica está compuesta de un extractante (Acorga NR20) con un porcentaje de 19,5% v/v, y un diluyente de tipo kerosene para disminuir su viscosidad. Luego de la tercera etapa de extracción en contracorriente se genera un flujo llamado refino el cual posee un remanente de 0,15-0,4g/L de Cu²⁺ en solución, que se utiliza para regar las pilas de lixiviación en la etapa final del ciclo. Por el otro lado, el "orgánico cargado" (9,0g/L Cu²⁺) se dirige a las etapas de lavado, en donde se rocía agua permeada proveniente de la planta de osmosis, con el propósito de quitar remanentes de impurezas que pueda tener la fase orgánico-metal como el cloro y el manganeso. Una vez finalizada esta etapa, el "orgánico cargado" ya lavado se dirige hacia la última etapa denominada etapa de re-extracción, en donde se genera el segundo contacto orgánico-acuoso y mediante una concentración elevada de ácido, el metal es re-extraído por la solución acuosa saliendo del sistema con una concentración promedio de cobre de 50g/L llamado electrolito rico, el orgánico descargado vuelve a la etapa de extracción con una concentración de

2,0g/L de Cu^{2+} . El esquema del proceso de extracción por solventes de POX se muestra en la Figura 9.

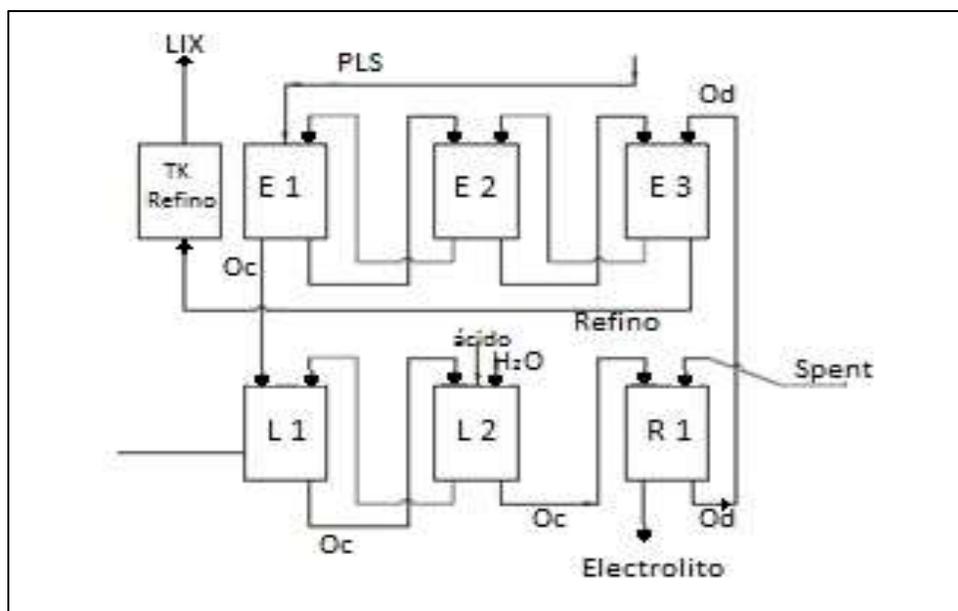


Figura 9. Esquema de la etapa de extracción por solventes, Planta de Óxidos, Las Cenizas, Taltal.

4.5. Electro obtención

La electro obtención es la última etapa metalúrgica de producción antes de obtener el producto final, es decir, los cátodos de cobre de alta pureza (99,99% de Cu) que luego son embalados y despachados para su comercialización.

El lugar físico donde se lleva a cabo este proceso es llamado nave, a la cual ingresa el electrolito rico con un flujo de $70\text{m}^3/\text{h}$ y con una concentración de 50g/L de Cu^{2+} y 170g/L de H_2SO_4 junto al electrolito circulante a un flujo de $490\text{ m}^3/\text{h}$ y con concentraciones de 42g/L de Cu^{2+} y 190g/L de H_2SO_4 , respectivamente.

En la Figura 10 se muestra el interior de la nave de electro obtención de la Planta de Óxidos.



Figura 10. Nave de Electro Obtención, Planta de Óxidos, Las Cenizas, Taltal.

Para depositar el cobre en los cátodos de acero inoxidable se utiliza una densidad de corriente de 364 A/m^2 con una eficiencia de corriente del 92% y luego de 5 días continuos en el cual el cobre se deposita, se realiza la cosecha de los cátodos, con un peso de cada placa entre 35-40 kg y con una previa inspección visual antes de dicho procedimiento.

Para despegar la placa de cobre se utiliza una máquina despegadora, para luego ser empacados y embalados.

Todas las etapas antes descritas forman el circuito completo de la Planta de Óxidos que se muestra en la Figura 11.

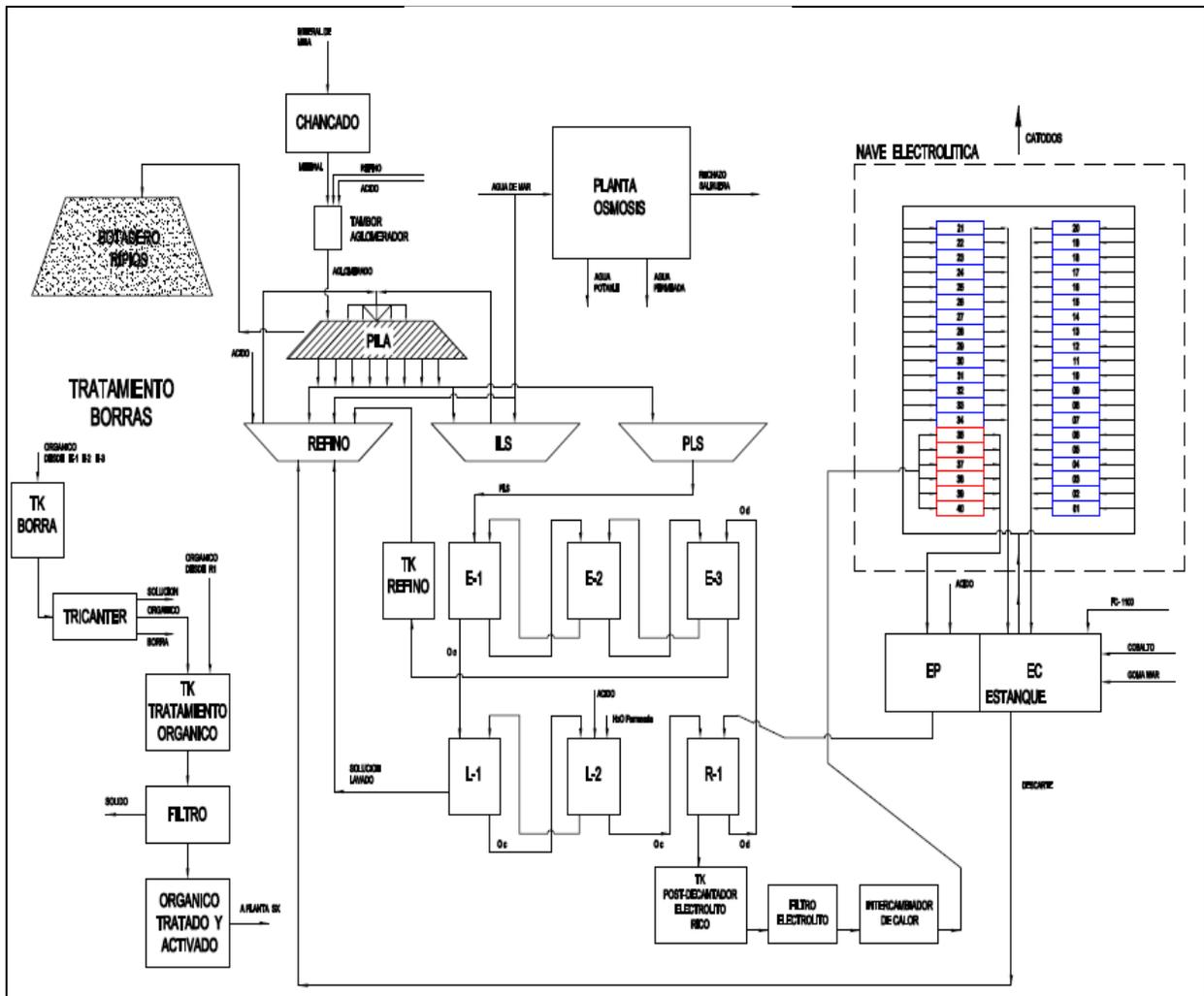


Figura 11. Diagrama de flujos Planta de Óxidos, Las Cenizas, Taltal.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1. Mineral utilizado

El mineral utilizado proviene de la mina Doña Elba del tipo subterránea, ubicada a 35 kilómetros al sureste de la comuna de Taltal, II Región de Antofagasta.



Figura 12. Ubicación geográfica mina Doña Elba.

5.1.1. Análisis mineralógico del mineral Doña Elba

Por medio de una empresa externa (SGS) se realizó un análisis mineralógico de partículas, el cual consiste en un mapeo de una muestra representativa del mineral a la forma de briqueta, el cual permite identificar la composición mineralógica, distribución de fases, ocurrencia del Cu y asociación de los minerales de Óxidos de Cobre. En las siguientes tablas se muestra la composición mineralógica y la ocurrencia del cobre en composición porcentual.

Tabla 1. Composición Mineralógica.

Survey	Name Id	Q1173
		12011 Cenizas-Taltal
Sample	Name	Muestra 1A 18-08-2017
Mineral Mass (%)	Chalcopyrite	0.02
	Atacamite	0.32
	Brochantite	0.01
	Chrysocolla	0.68
	Cu Wad	0.11
	Malachite/Azurite	0.01
	Pseudomalachite	0.02
	Limonite (Cu)	4.17
	Cu-bearing Clays	2.65
	Pyrite	0.03
	Other Sulphides	0.02
	Quartz	6.53
	K-Feldspar	7.72
	Albite	29.75
	Plagioclase	2.41
	Garnet	0.02
	Epidote	0.17
	Tourmaline	5.23
	Sphene	2.23
	Olivine	0.11
	Amphibols	0.16
	Pyroxenes	0.27
	Biotite	5.25
	Chlorite	16.77
	Muscovite	2.15
	Kaolinite	0.55
	Chlorite-Smectite	0.49
	Magnetite-Hematite	9.64
	Rutile	0.37
	Ilmenite	0.61
	Calcite	0.67
	Dolomite-Ankerite	0.37
	Siderite	0.05
Gypsum-Anhydrite	0.35	
Apatite	0.06	
Others	0.02	
	Total	100.00

La composición mineralógica hace referencia al contenido de especies minerales presentes en la muestra en función de la masa de ésta. Por el otro lado, la ocurrencia del cobre corresponde a la distribución del cobre en las distintas especies minerales en que se encuentra contenido, estos valores son entregados en forma de porcentajes.

Tabla 2. Ocurrencia de Cobre.

		% Cu p/p
Mineral	Chalcopyrite	0.61
	Bornite	0.02
	Covellite	0.03
	Chalcocite-Digenite	0.45
	Atacamite	16.01
	Brochantite	0.34
	Chrysocolla	19.49
	Cu Wad	1.07
	Malachite/Azurite	0.37
	Pseudomalachite	1.10
	Limonite (Cu)	10.60
	Cu-bearing Clays	10.51
	Others Cu Oxides Mineral	0.00
	Biotite	16.79
	Chlorite	21.34
	Chlorite-Smectite	0.85
	Others	0.43
	Total	

De esta tabla se puede decir que el cobre se presenta principalmente como óxidos de crisocola (19,49%), atacamita (16,01%) y cloritas (21,34%), biotitas (19,79%), limonitas (10,60%) y arcillas (10,51%).

5.1.2. Leyes de cabeza mineral Doña Elba

Mediante una empresa colaboradora (SGS), se determinó la ley inicial de cabeza, obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Leyes de cabeza.

Especie	Unidad	Límite Detectado	Resultado
CuT	%	0,001	1,206
Fe	%	0,020	7,660
CuSoluble	%	0,001	1,041
CuInsoluble	%	0,001	0,027
CO ₃	%	0,050	0,520

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 2, se puede decir que el mineral presenta una gran proporción de cobre soluble con un 86% del Cobre total, un 0,52% de carbonato y un 0,027% de cobre insoluble como óxido de cobre negro del tipo "copper wad" el cual es muy poco soluble en ácido sulfúrico.

5.2. Test de sulfatación o curado

Se realizaron ocho pruebas de sulfatación en el laboratorio POX con mineral Doña Elba para obtener información acerca de la dosificación de ácido que maximiza la disolución de Cu en la etapa de aglomerado de éste.

La cantidad de mineral utilizado fue de 5 kg por muestra con una granulometría ajustada con un P80 cercano a -3/8". Con respecto a la dosificación de H⁺, se utilizaron 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60 y 80 kg H⁺/t de mineral y con un tiempo de reposo de 24 horas. Las cantidades de agua y ácido agregadas se basaron en tener las mismas condiciones de volumen en todas las pruebas.

En la Tabla 4 se muestran los parámetros experimentales utilizados en las pruebas de sulfatación del mineral Doña Elba.

Tabla 4. Parámetros experimentales para pruebas de sulfatación.

	kg	kg/t	mL	mL
N° Prueba	Mineral	Dosificación de H ⁺	Cantidad H ⁺	Cantidad H ₂ O
1	5	10	29	342
2	5	15	43	328
3	5	20	57	314
4	5	25	72	299
5	5	30	86	285
6	5	40	114	257
7	5	60	172	199
8	5	80	229	142

Para lavar, se preparó 50 litros de agua de mar a una concentración de ácido 0,5 g/L. Cada muestra de mineral aglomerado (5kg) se lavó con 5 litros de agua (Razón de lavado 1:1).

Se procedió a vaciar el mineral aglomerado y el agua en un balde, se mezclaron durante 3 minutos, se dejó reposar para que los finos decanten, luego se extrajo una muestra de la solución y se envió a laboratorio para su análisis químico.

5.3. Test lixiviación iso-pH en botellas agitadas

Se realizaron pruebas de lixiviación iso-pH (se mantiene el pH de la solución drenada constante) en botellas mediante una empresa externa (SGS), con el objetivo de determinar el efecto de la acidez en la solución de lixiviación a través del valor de pH, sobre la extracción de cobre total (CuT) y consumo de ácido sulfúrico, además de cuantificar la disolución de algunas impurezas de interés.

Se ensayaron seis condiciones de iso-pH utilizando como solución lixiviante agua de mar a diferentes pH, de 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8 y 2.0 en duplicado, bajo movimiento giratorio sobre mesa de rodillos con velocidad constante de 20 rpm, el tiempo de lixiviación fue de 72 horas y fueron muestreadas a las 2, 4, 6, 8, 24 y 48 horas de lixiviación.

El mineral con granulometría 100% menor a la malla 10 Tyler, se introdujo en una botella de 10 litros de capacidad entre 1000 y 1010 gramos de mineral, y una solución acidulada en razón sólido - líquido de 1 : 2.

Posterior a las 72 horas de lixiviación el material se filtró, lavó y secó. Obteniéndose tres productos de interés, solución fuerte, solución de lavado y ripio. Las soluciones fueron enviadas a análisis químico por los elementos CuT, FeT, H⁺ y pH. Finalmente, el queque fue retirado, pulverizado y enviado a análisis químico por Cu, Cu_{soluble} y FeT.

5.4. Ensayos de lixiviación en columnas

5.4.1. Descripción del equipo y procedimiento experimental

Las características de las pruebas fueron enfocadas y basadas netamente en las condiciones operacionales de la planta para tener un símil a lo que se tiene hoy en día en la Planta de Óxidos de Las Cenizas, es por esto que los valores de la altura, diámetro de las columnas y ciclo de riego, fueron calculados usando como base la operación diaria.

En la Tabla 5 se muestran las características de las columnas de lixiviación, cabe decir que son diez columnas montadas que poseen las mismas dimensiones.

Tabla 5. Características de columnas de Lixiviación.

Ítem	Unidad	Valor
Altura mineral	m	1,4
Diámetro	m	0,280
Área	m ²	0,062

Se montaron diez columnas de dimensiones idénticas, cargadas con mineral previamente aglomerado y curado, en la parte inferior de ellas se encontraba un recipiente para recolectar el fluido que ésta fuese drenando, cada columna constaba con una bomba de diafragma modelo IWAKI Serie EJ-B la cual succionaba la solución correspondiente y luego regaba por la parte superior de la columna mediante goteo a un flujo determinado por cada prueba, todo esto conectado por mangueras de HDPE. El circuito empleado se muestra en Figura 13 y 14.

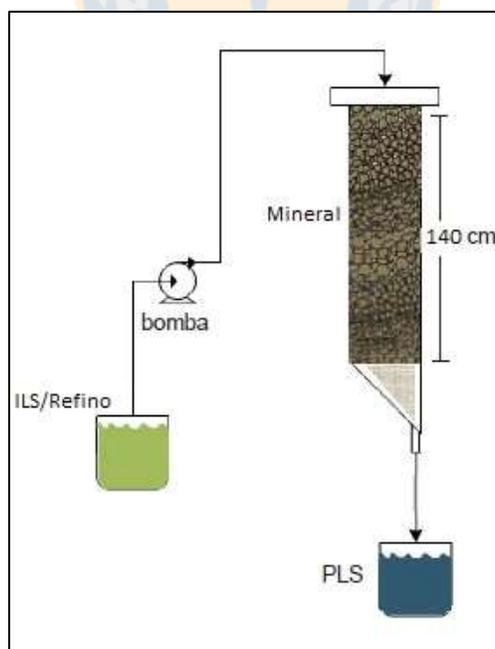


Figura 13. Esquema circuito de lixiviación en columnas.



Figura 14. Columnas de lixiviación. Compañía Minera Las Cenizas, Planta de Óxidos, Taltal.

El ciclo de riego de 43 días en planta consta en 8 días en riego primario con ILS, 15 días de recirculación con ILS y los últimos 20 días de irrigación con refino, (4 y 8 g/L de H^+ respectivamente), con un reposo de 24 horas antes de iniciar el riego.

En las pruebas, el ciclo de 43 días varió dependiendo de la condición de cada columna, pudiendo ser los primeros 23 días tanto con ILS como con refino y luego los últimos 20 días con la otra solución, pero siempre respetando las 24 horas de reposo antes de iniciado el riego.

Cada día se tomó las muestras del drenaje de cada columna las cuales fueron rotuladas con número de columna y fecha, éstas se enviaron a laboratorio para analizar sus componentes y para determinar cómo variaron día a día de acuerdo al ciclo de riego.

Como se aprecia en la Figura 15, los drenajes de cada columna son diferentes en su aspecto (color), esto depende de la disolución de las especies, tales como el Fe el cual le otorga un color más verdoso, sin embargo, esta diferencia de tonalidades se atribuye a la etapa del ciclo en que se encontraban, es decir, las columnas 3 y 9 llevaban menos días en riego, por ende su drenaje tenía una concentración de especies mayor a las restantes.



Figura 15. Ejemplo muestras rotuladas drenaje de columnas a laboratorio.

5.4.2. Pruebas en columnas

Se realizaron doce pruebas en columnas, variando la dosificación de ácido en la etapa de aglomerado, granulometría y solución de riego. Con el fin de tener resultados confiables se implementó un sistema de riego de goteo con bombas de diafragma y el flujo fue constantemente supervisado cada 30 minutos las 24 horas del día.

Se realizaron dos tipos de pruebas:

- Pruebas exploratorias: pruebas realizadas para conocer o comprobar el comportamiento del mineral frente a las variables.

- Pruebas finales: pruebas en las cuales se utilizaron las condiciones que obtuvieron mejores resultados en las pruebas exploratorias y se añadieron unas nuevas variables.

En la Tabla 6 se encuentran resumidas las condiciones experimentales de las pruebas realizadas y la cantidad de ensayos realizados por cada una de ésta.

Tabla 6. Resumen pruebas en columna.

Tipo de prueba	Variable	Condición específica	Cantidad de pruebas
Exploratorias	Ácido en aglomerado	Cantidad de ácido en aglomerado variando desde 20 a 60 kg H ⁺ /t	3
	Duplicados solución inversa	Pruebas en duplicado, variando riego ILS-REF a REF-ILS	4
	Mezcla	Se realizaron mezclas con mineral Dominio (50% y 30% de mineral Elba)	2
Finales	Ajustado	Prueba para analizar efecto de adición de solución alta en ácido (15 g H ⁺ /L)	1
	Granulometría	Prueba para analizar recuperaciones con mayor cantidad de fino, P80 -3/8" y -1/4"	2

Cabe mencionar que las pruebas no se realizaron en forma simultánea y que las soluciones de riego fueron las que se utilizaban en planta, tanto ILS como Refino, sin contar la prueba en la cual se ajustó la solución de riego con ácido.

5.4.3. Granulometría y dosificación de ácido en aglomerado

En hidrometalurgia, más aun en la lixiviación, se necesita un tamaño de partícula de alrededor de 3/4" a 1/4", para que la solución lixivante pueda penetrar de una manera óptima en la pila. Es por esto que normalmente es necesario por lo menos pasar por una etapa de chancado terciario para obtener estos resultados granulométricos.

Para este caso, se efectuó una etapa de chancado ajustado en planta, es decir, las condiciones operacionales de los chancadores primario, secundario y terciario fueron adaptadas para obtener un P80 cercano a los 3/8" y se tomaron muestras de 1kg por mineral cargado a cada columna para enviar a análisis granulométrico.

Se obtuvo como resultado un P80 promedio, calculado mediante interpolación, de 10,28 mm (aproximadamente 2/5").

La etapa de aglomeración y curado se realizó en carpeta de HDPE traspaleando para homogeneizar el mineral y se adicionó una cantidad de ácido calculada para cada prueba. En la Tabla 7 se muestra como resumen el tipo de prueba, su variable, P80 y la dosificación de ácido para cada columna.

Tabla 7. Tabla resumen pruebas de lixiviación en columna.

Tipo de prueba	Variable	Columna	H ⁺ (kg/t) Aglomerado	P80 (mm)
Exploratorias	Ácido en aglomerado	1	20	9,41
		2	40	9,24
		3	60	10,75
	Solución de riego	4	25	11,68
		5	25	11,30
		6	30	10,95
		7	30	10,98
	50% Elba	8	20	10,41
	30% Elba	9	20	10,95
Finales	Solución ajustada	10	15	10,38
	Granulometría	11	22	9,48
		12	22	8,76

5.4.4. Análisis químico de cabeza

Se realizó un análisis químico del mineral de cabeza en el laboratorio POX, por CuT, Cu_{soluble}, FeT, FeS y el porcentaje de humedad. En la Tabla 8 se encuentra el resultado por columnas de cada análisis realizado.

Tabla 8. Análisis químico de cabeza pruebas en columnas de lixiviación.

COLUMNA	Leyes de cabeza pruebas en columnas (%)					
	CuT	Cu _{soluble}	FeT	Fe _{soluble}	RS	Humedad
1	1,26	1,03	10,01	0,44	81%	2,22
2	1,32	1,10	9,79	0,53	83%	2,16
3	1,09	0,95	12,62	0,88	85%	4,14
4	1,32	1,12	9,65	0,63	85%	2,12
5	1,33	1,13	9,56	0,83	85%	1,88

COLUMNA	Leyes de cabeza pruebas en columnas (%)					
	CuT	CuSoluble	FeT	FeSoluble	RS	Humedad
6	1,23	1,10	10,20	2,05	89%	1,26
7	1,27	1,00	9,96	1,11	79%	1,16
8	1,28	1,01	10,38	0,20	79%	1,62
9	1,01	0,88	10,64	0,92	87%	3,30
10	1,25	1,00	10,42	0,19	80%	1,48
11	1,05	0,88	10,03	0,84	84%	2,30
12	1,13	0,93	9,85	0,76	82%	1,52

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que la ley de cabeza promedio del mineral tratado en las pruebas fue de 1,21% CuT, 1,01% CuSoluble y una humedad del 2,3%, con una razón de solubilidad en ácido sulfúrico (RS) de 83%, esto nos dice que teóricamente es posible recuperar un 83% del cobre mediante la adición de ácido sulfúrico.

5.4.5. Análisis químico soluciones de riego

Se realizó un análisis químico de las soluciones entrantes del sistema en el laboratorio POX, como son el ILS, refino y agua de mar, con la cual se lavan las columnas una vez finalizada la lixiviación, éstas fueron analizadas por pH, Cu²⁺, Cl⁻, FeT, Fe²⁺, Al³⁺, Mg²⁺, Mn, SO₄²⁻ y viscosidad.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de los análisis químicos de las soluciones con cual se regaron las columnas la primera semana.

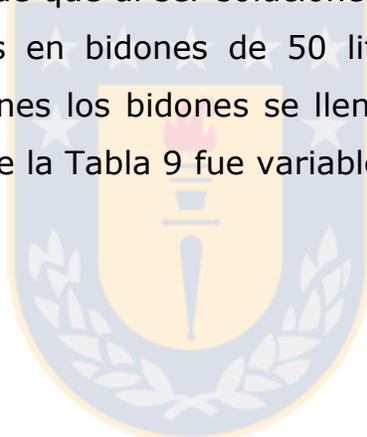
Tabla 9. Análisis químico soluciones de riego.

Alimentación	Unidad	ILS	Ref	Agua de Mar
Cu ²⁺	g/L	1,80	0,84	ND
H ⁺	g/L	4,0	10,2	ND
pH	-	1,29	0,65	7,05

Alimentación	Unidad	ILS	Ref	Agua de Mar
Potencial *	mV	648	661	411
FeT	g/L	7,45	7,12	0,09
Fe²⁺	g/L	2,60	2,20	0,05
Al	g/L	10,30	9,65	ND
Mg	g/L	12,10	11,70	1,10
Mn	g/L	1,11	1,12	0,01
SO₄²⁻	g/L	347	167	80
Cl⁻	g/L	52	52	24
Viscosidad	Pa s	3,76E-3	3,41E-3	1,37E-3

* *Potencial referido a electrodo de hidrógeno*

Cabe destacar el hecho de que al ser soluciones provenientes de planta, estas eran almacenadas en bidones de 50 litros, debido al consumo constante de las soluciones los bidones se llenaban cada 3 días, por lo que el análisis químico de la Tabla 9 fue variable.



6. RESULTADOS

6.4. Prueba de sulfatación o curado

A continuación en la Tabla 10, se detallan los análisis químicos realizados a las soluciones de lavado del mineral curado, enviadas al laboratorio de POX.

Tabla 10. Resultado de análisis químico a muestra de lavado

Análisis químico					
Prueba n°	Dosificación de H ⁺	Cu ⁺²	Acidez	pH	POTENCIAL *
	kg/t	g/L	g/L		mV
1	10	2,31	0,00	2,37	669
2	15	3,05	0,00	2,24	677
3	20	3,73	0,70	2,03	683
4	25	4,35	0,90	1,97	684
5	30	4,43	1,10	1,92	677
6	40	4,47	1,70	1,84	696
7	60	3,54	4,70	1,39	700
8	80	3,20	20,80	0,76	686
H ₂ O			0,5	2,16	718

* Potencial referido a electrodo de hidrógeno.

Para lavar se utilizó de agua de mar a una concentración de ácido 0,5 g/L. Cada muestra de mineral aglomerado (5kg) se lavó con 5 litros de agua (Razón de lavado 1:1).

Graficando las dosificaciones de ácido con las concentraciones de Cu²⁺ de cada muestra se obtiene la Figura 16, la permite conocer el punto óptimo de ácido para la etapa de aglomerado de acuerdo a las concentraciones obtenidas en las pruebas.

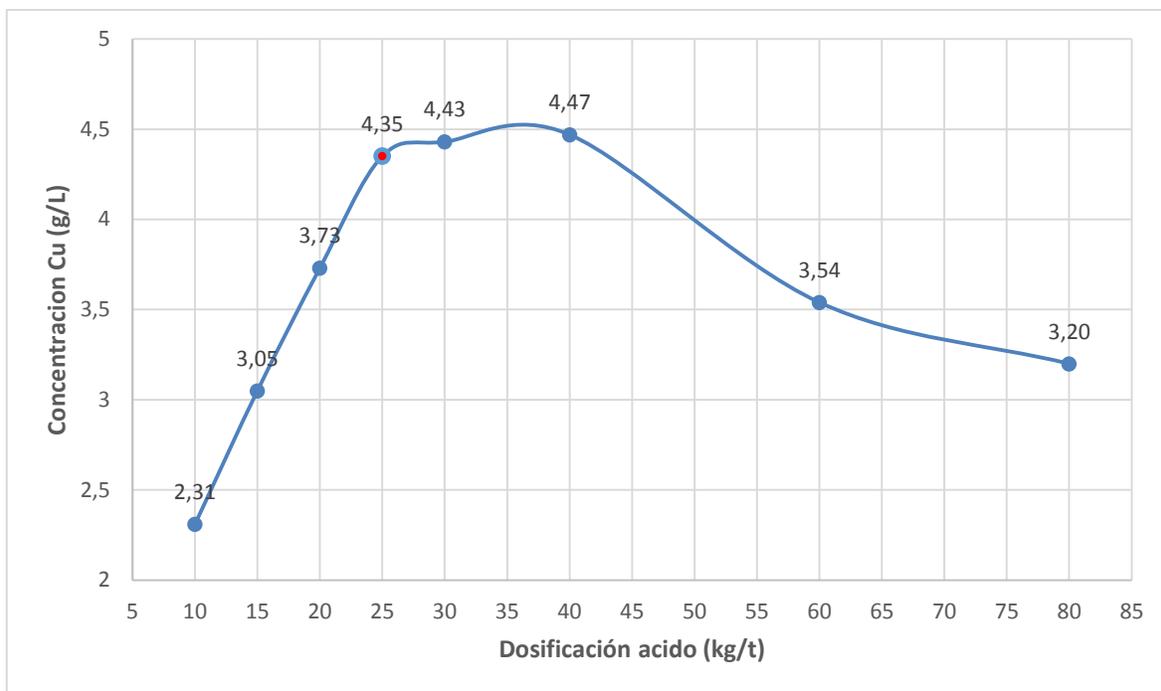


Figura 16. Resultado prueba sulfatación, Dosificación de ácido en aglomerado versus concentración de cobre en solución de lavado.

Como se puede apreciar en la Figura 16, la dosificación de ácido recomendada para la etapa de aglomerado del mineral Doña Elba es de 25kg/t, ya que es en ese punto donde se produce el término del incremento sostenido en la concentración de Cu, pasando a un estancamiento con las dosificaciones entre 30 a 40 (kg/t), con las dosificaciones de 60 y 80(kg/t) se nota una clara baja de la concentración.

En la Figura 17 se puede observar claramente como varía la acidez de la solución de lavado por cada muestra, esto se realiza con el fin de determinar cuánto ácido es el que no reacciona.

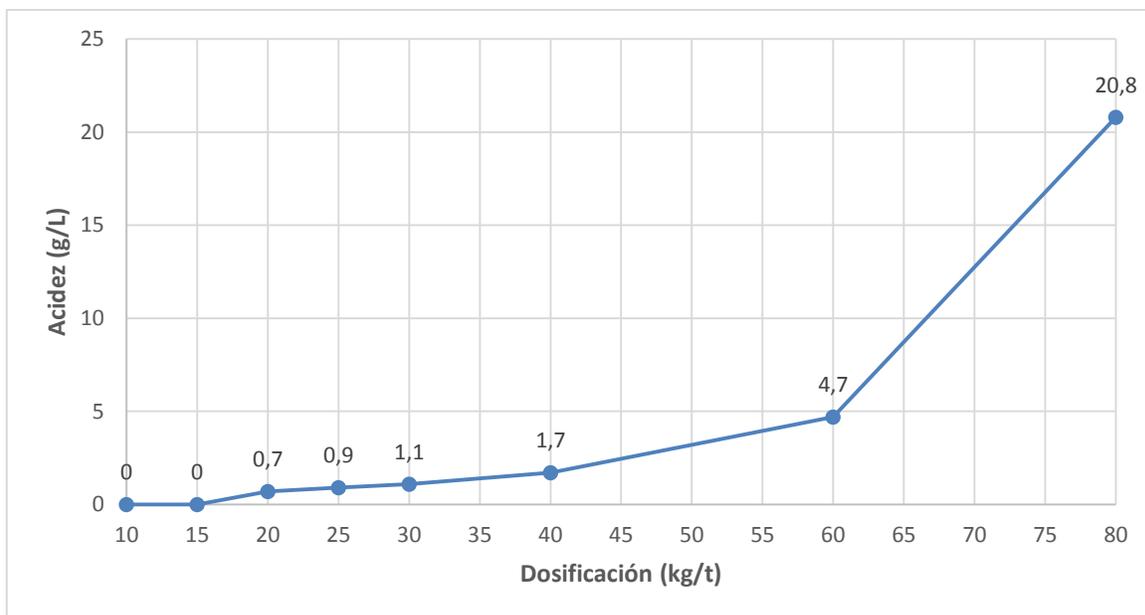


Figura 17. Resultado prueba de sulfatación, dosificación de ácido en aglomerado versus acidez en solución de lavado.

En el punto que se determinó como dosificación óptima (25 kg H⁺/t), se observa que el ácido que no reacciona (ácido libre) presenta un valor de 0,9 g/L.

6.5. Test lixiviación Iso-pH en botellas agitadas

En la Tabla 11 se muestran el promedio de los resultados de las muestras originales y en duplicados de los análisis químicos realizados a la solución fuerte, solución de lavado y ripio.

Tabla 11. Resultado análisis químico solución fuerte, solución de lavado y ripio.

Condición pH	Solución Fuerte		Solución Lavado		Ripio		
	Cu, g/L	Fe, g/L	Cu, g/L	Fe, g/L	CuT, g/L	FeT, g/L	CuSoluble %
1,00	4,37	0,88	1,06	0,14	0,19	7,43	0,10
1,20	4,21	0,59	0,64	0,06	0,27	8,12	0,12

Condición pH	Solución Fuerte		Solución Lavado		Ripio		
	Cu, g/L	Fe, g/L	Cu, g/L	Fe, g/L	CuT, g/L	FeT, g/L	CuSoluble %
1,40	3,53	0,16	0,79	0,02	0,39	8,04	0,19
1,60	2,61	0,07	0,60	0,01	0,65	7,13	0,43
1,80	1,60	0,03	0,20	0,01	0,88	7,93	0,64
2,00	0,96	0,01	0,04	0,01	1,02	8,13	0,79

Ley de Cabeza: 1,2% CuT y 1,04% CuSoluble

Se observa que a condiciones de pH más bajas, existe una mayor disolución de especies tanto en la solución fuerte como en la de lavado. Por otra parte, en el ripio se puede apreciar que a medida que aumenta el pH, éste presenta una mayor concentración de cobre total y soluble.

De acuerdo a los resultados obtenidos se tiene que la cantidad de cobre disuelto fue mayor mientras más ácida fue la solución lixivante.

Con los análisis químicos realizados, se procedió a determinar la extracción de cobre, de acuerdo a tres procedimientos en función del pH: por sólidos, por solución y por solución cabeza calculada, presentes en la Tabla 12.

Tabla 12. Extracción de cobre y consumo de ácido total en función del pH, lixiviación en botellas Iso-pH, SGS.

Condición, pH	Extracción de CuT			Consumo ácido total (kg/t)
	Por sólidos (%)	Por solución (%)	Por solución de cabeza calculada (%)*	
1,0	84,00	83,29	83,88	88,44
1,2	78,91	78,78	78,88	70,10
1,4	69,23	69,95	69,45	45,03
1,6	48,99	48,76	48,87	28,87
1,8	28,10	27,59	27,73	19,74
2,0	16,88	16,44	16,50	12,33

(*) La extracción de CuT por solución se midió de acuerdo al CuT presente en la cabeza y la solución fuerte, en cambio, la extracción por solución de cabeza calculada se midió de acuerdo al cobre presente en el ripio y la solución fuerte.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 12, el consumo total de ácido en kilogramos por tonelada de mineral alimentado dependió del pH de cada prueba. El mayor consumo de ácido fue a pH 1,0 con 88,44 kg/t y el menor se produjo a pH 2,0 con 12,33 kg/t.

Se observa que la extracción de cobre considerando extracción por sólidos, por solución y por solución de cabeza calculada, son similares en magnitud dependiendo del pH de la prueba; por lo tanto, para pH 1.0 las extracciones fueron superiores al 80%, a pH 1,2 fueron superiores al 77%, a pH 1,4 las extracciones fueron en promedio del 69%, a pH 1,6 48%, a pH 1,8 28% a pH 2,0 las extracciones son muy bajas cercanas al 17%.

Se puede observar una clara dependencia entre la extracción del cobre y el consumo de ácido, el que claramente está fuertemente influenciado por el consumo por parte de la ganga, y que es necesario para alcanzar altas extracciones de cobre.

6.6. Pruebas de lixiviación en columnas

6.6.1. Pruebas exploratorias

Consta de nueve pruebas en las cuales se modificó la dosis de ácido en aglomerado, se varió el tipo de solución de riego y mezclas de mineral Doña Elba y Dominio, manteniendo la tasa de riego y granulometría ajustada a un P80 cercano a 3/8". En la Tabla 13 se muestran resumidas las pruebas exploratorias, donde en color rojo se destacan las variables por prueba.

Tabla 13. Resumen pruebas exploratorias en columna.

	N° Columna								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tipo de prueba	Exploratorias								
Mineral	100% Elba							50% Elba*	30% Elba*
H ⁺ Aglomerado (kg/t)	20	40	60	25	25	30	30	20	20
Solución de riego	ILS-Ref	ILS-Ref	ILS-Ref	ILS-Ref	Ref-ILS	ILS-Ref	Ref-ILS	ILS-Ref	ILS-Ref
P80 (mm)	9,41	9,24	10,75	11,68	11,30	10,95	10,98	10,41	10,95
Tasa de riego (L/hm ²)	8	8	8	8	8	8	8	8	8

* Porcentaje restante representa a mineral Dominio perteneciente a mina Barreal Seco.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, se varió la composición del mineral (mezcla) en dos pruebas, la dosis de ácido en la etapa de

aglomerado y el orden de la solución de riego, es decir, se adicionó en algunas pruebas ILS los primeros días luego Refino y en otras pruebas Refino los primeros días y después ILS. La tasa de riego se mantuvo constante en 8 L/hm² al igual que la granulometría ajustada que fue un P80 cercano a -3/8".

La cinética de disolución de cobre permite evaluar el efecto que tuvieron las diferentes variables de operación en las columnas descritas anteriormente. En la Figura 18 se muestran las curvas cinéticas de extracción de cobre calculadas a partir de los análisis químicos diarios de las soluciones de drenaje de cada columna presentes en Tablas 30 a 41 en anexo.

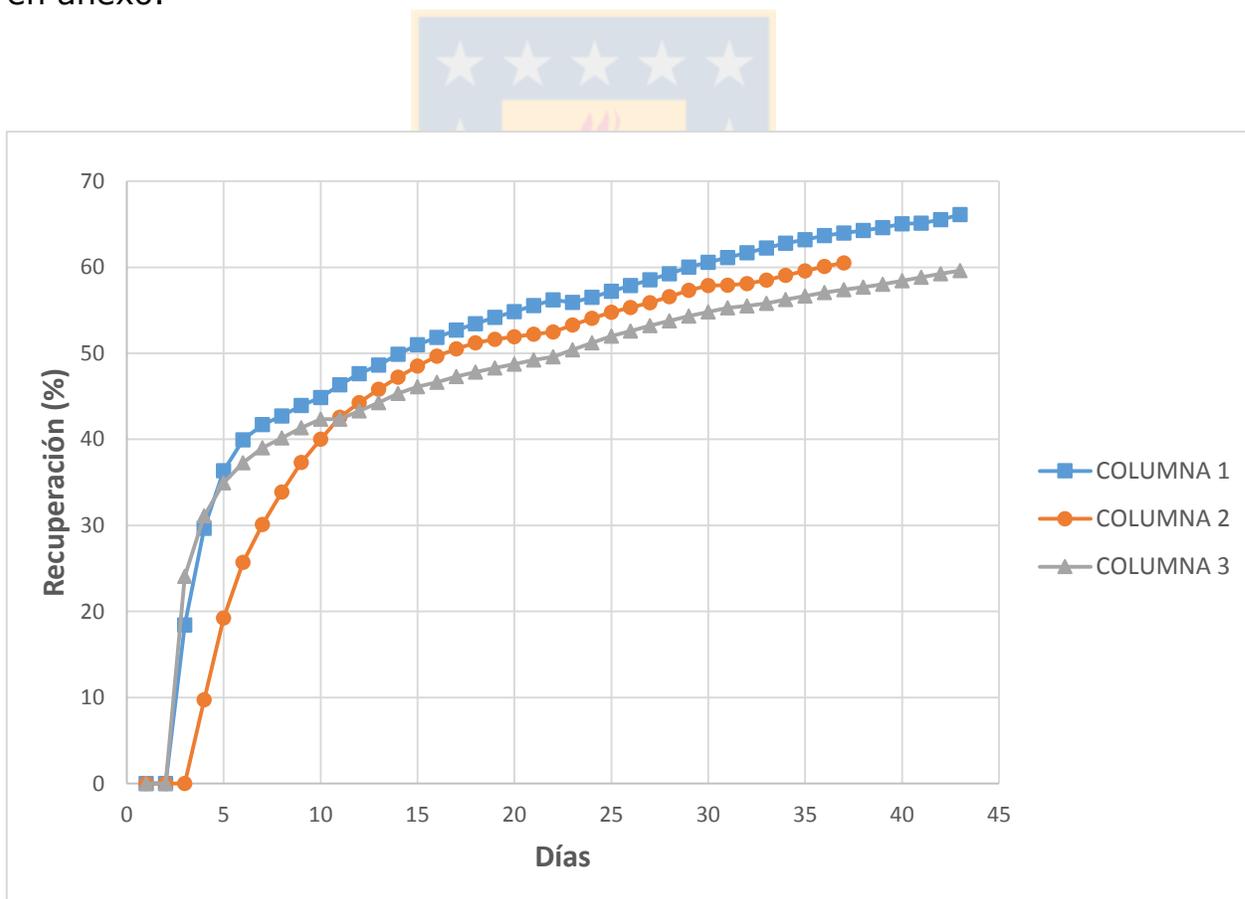


Figura 18. Curva cinética de extracción, pruebas exploratorias.

Los resultados de la Figura 18 muestran una cinética más rápida para la menor dosis de ácido lo cual no era el resultado esperado. El comportamiento observado podría deberse a una falta de homogeneidad en el curado y en las muestras utilizadas en cada columna. Una de estas diferencias se ve reflejada una leve diferencia en el P80 que es un poco mayor para la columna 3 a la que se le agregó la mayor dosis de ácido. Se puede ver que la extracción de Cu se ve desfavorecida en dosis altas de ácido en el curado como se muestra en la Figura 16 para el caso de la columna 3, con 60 kg/t.

En general, se puede apreciar que la extracción de cobre se aproxima al 64% después de 43 días de riego.

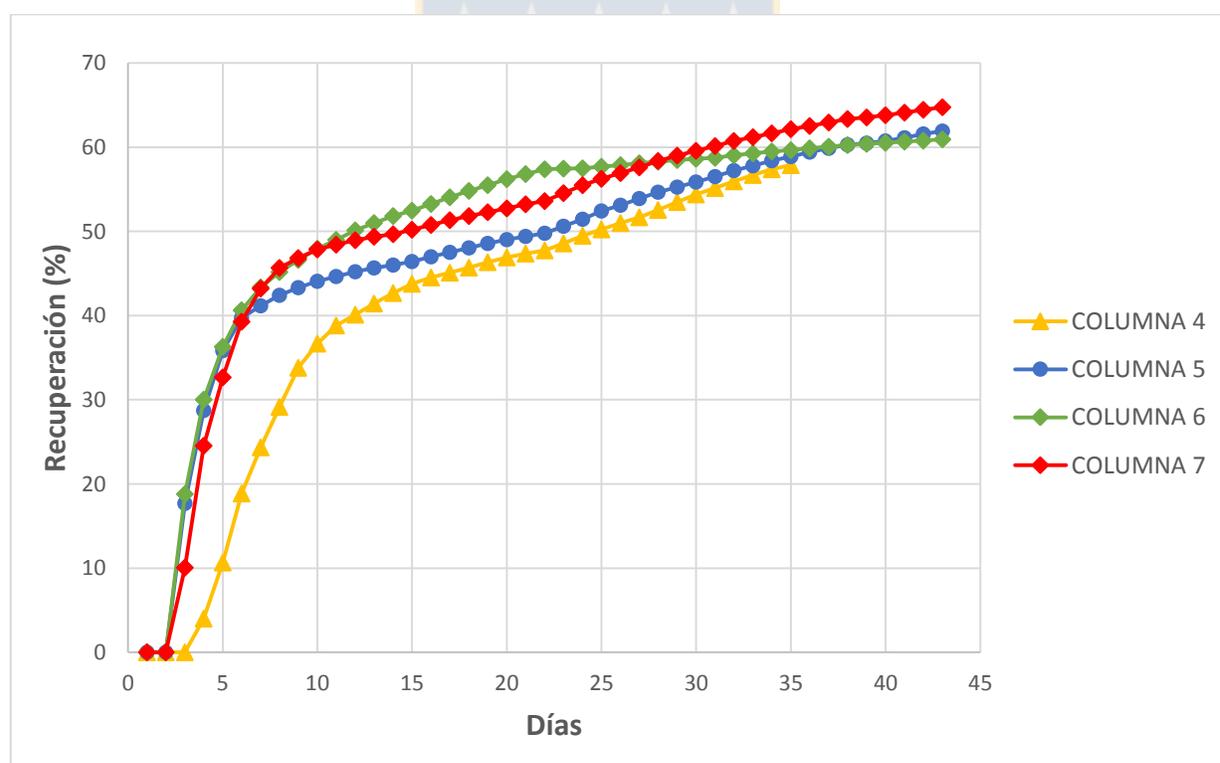


Figura 19. Curva cinética de extracción, pruebas exploratorias.

Los resultados de la Figura 19 muestran que no hay claridad si tiene efecto o no el orden de riego ILS/Ref o Ref/ILS. En el caso de las columnas 4 y 5 con una dosis de ácido de 25 kg/t la extracción de Cu se ve favorecida al inicio del riego Ref/ILS, pero, este efecto no se observa en las columnas 6 y 7 que tuvieron una dosis de curado de 30 kg/t. En general, las pruebas con mayor dosis de curado tienen una cinética un poco más rápida, pero después de 40 días tienden a valores de extracción de cobre similares.

Los resultados de la Figura 20 con distintas proporciones de mineral de Elba muestran una cinética similar con una diferencia hasta los 35 días para luego tender a una eficiencia de extracción de cobre similar, es decir, bajo estas condiciones no hay una diferencia significativa en cuanto recuperación de CuT entre los dos tipos de mineral.

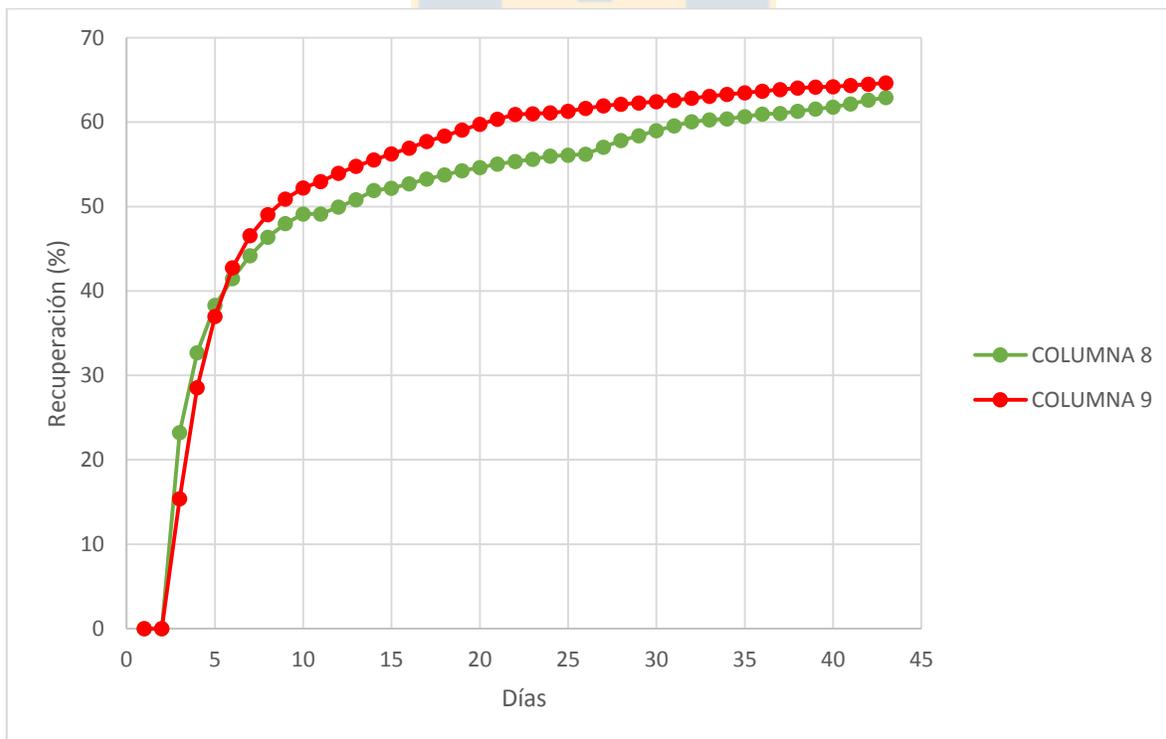


Figura 20. Curva cinética de extracción, pruebas exploratorias.

En la Figura 21 se muestra un resumen con las extracciones de cobre y consumo de ácido alcanzados al término de las pruebas. Si bien la tendencia general de las columnas es muy similar, las columnas que destacaron en cuanto a recuperación de CuT fueron las Columnas 1, 7 y 9, con 66,1%, 64,74% y 64,9%, respectivamente.

De los consumos de ácido en la Figura 21, se puede observar que entre las columnas con mayores extracciones de cobre, son las columnas 1 y 9 las que presentan menor consumo de ácido con 38,18 y 30,85 kg/t, respectivamente y que corresponden a las que tuvieron menor dosis de ácido en curado con 20 kg/t cada una.

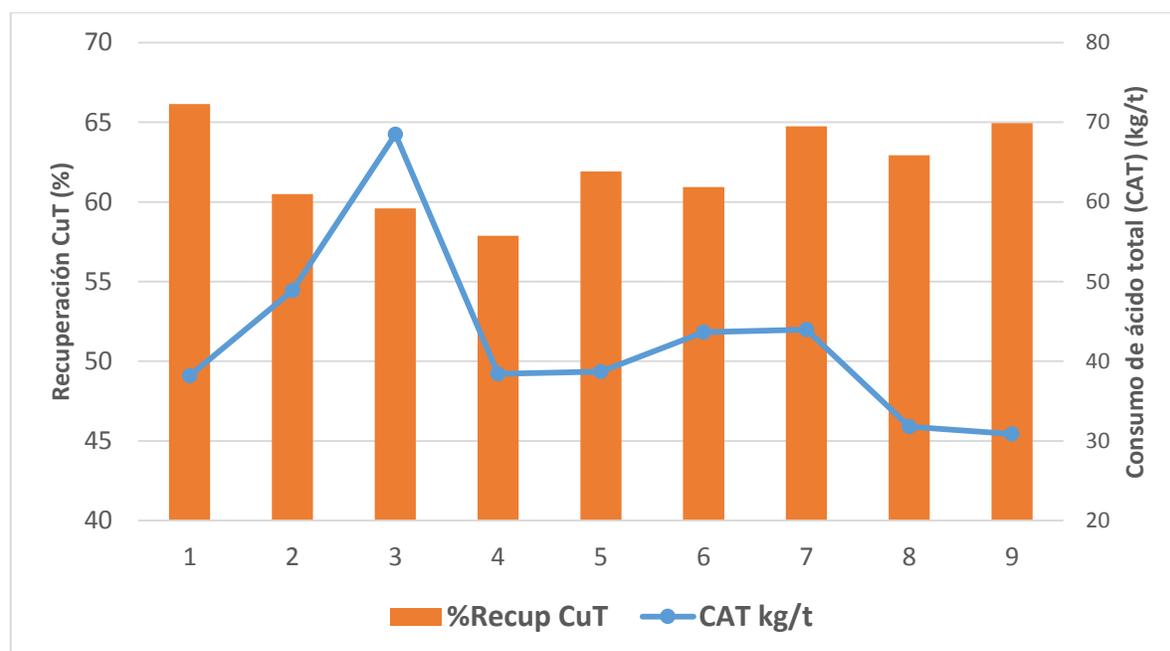


Figura 21. Recuperación CuT y consumo de ácido total, Pruebas Exploratorias.

Cabe destacar que las columnas 8 y 9 son pruebas en mezclas con mineral Dominio el cual tiene un bajo consumo de ácido y alta solubilidad, es por esto que las condiciones de las pruebas en columnas 6 y 7 a pesar de tener un consumo de ácido mayor, no son descartables ya que son pruebas con 100% mineral Elba, el cual de acuerdo a pruebas en botella

se sabe que es un gran consumidor de ácido y a medida que se le suministre más, éste recuperará más cobre.

6.6.2. Análisis químico por tamaño a ripio columna 1

Se realizó un análisis químico por mallas al ripio de la columna 1, la cual obtuvo los mejores resultados dentro de las pruebas exploratorias en cuanto a extracción de cobre con un bajo consumo de ácido.

En las siguientes Tablas se muestran los resultados del análisis químico de CuT y CuSoluble por malla realizado a la cabeza y ripio de la columna 1.

Tabla 14. Análisis químico de cabeza por malla columna 1.

Cabeza columna 1					
Malla	Peso	CuT	CuSoluble	Fino CuT	Fino CuSoluble
Unidad	g	%	%	g	g
3/4	0	0	0	0	0
5/8	0	0	0	0	0
1/2	105	1,32	1,12	1,39	1,18
3/8	100	1,12	1,02	1,12	1,02
1/4	220	1,06	0,97	2,33	2,13
# 6	225	1,15	1,00	2,59	2,25
# 12	130	1,19	1,05	1,55	1,37
# 30	105	1,24	1,08	1,30	1,13
# 50	40	1,33	1,20	0,53	0,48
# 70	15	1,36	1,21	0,20	0,18
# 100	15	1,35	1,23	0,20	0,18
# -100	90	1,33	1,21	1,20	1,09

Tabla 15. Análisis químico de ripio por malla columna 1.

Ripio columna 1							
Malla	Peso	CuT	CuS	Fino CuT	Fino CuSoluble	CuT	CuSoluble
Unidad	g	%	%	g	g	Recuperación %	
3/4	0	0	0	0	0	0	0
5/8	0	0	0	0	0	0	0
1/2	105	0,78	0,56	0,82	0,59	40,91	50,00
3/8	100	0,63	0,51	0,63	0,51	43,75	50,00
1/4	220	0,68	0,54	1,50	1,19	35,85	44,33
# 6	225	0,43	0,31	0,97	0,70	62,61	69,00
# 12	130	0,27	0,15	0,35	0,20	77,31	85,71
# 30	105	0,21	0,09	0,22	0,09	83,06	91,67
# 50	40	0,23	0,10	0,09	0,04	82,71	91,67
# 70	15	0,20	0,10	0,03	0,02	85,29	91,74
# 100	15	0,22	0,11	0,03	0,02	83,70	91,06
# -100	90	0,22	0,09	0,20	0,08	83,46	92,56

*Recuperación calculada de acuerdo a gramos de finos en cabeza

Como se puede apreciar en la Tabla 15, existe un claro efecto negativo del tamaño de partícula en la recuperación de Cu en las mallas sobre ¼ de pulgada, llegando a valores de 35,8% en el peor caso, en cambio, las recuperaciones en las mallas más pequeñas es bastante alto, con valores de hasta 85,3%, teniendo en cuenta que el mineral posee una razón de solubilidad de 83-85%, es decir, se llega a la totalidad de recuperación de cobre soluble.

Las bajas recuperaciones en mallas superiores a 1/4 de pulgada se atribuyen a que el ácido no logró penetrar al mineral de manera eficiente y el cobre no se solubilizó, y por ende, no pudo ser recuperado.

Con esta información se tomó la decisión de realizar pruebas con granulometrías más bajas, donde se obtuvieron mejores resultados en cuanto a recuperación de Cu.

6.6.3. Pruebas finales

Consta de tres pruebas en donde las variables estudiadas fueron, tipos de soluciones de riego, tasa de riego y granulometría. El resumen de las condiciones de estas pruebas se muestra en la Tabla 16, en color rojo se destacan las variaciones por prueba.

Tabla 16. Resumen pruebas finales en columna.

	Columnas		
	10	11	12
Tipo de prueba	Finales		
Mineral	100% Elba		
Variable	Riego ajustado	Granulometría	
H ⁺ Aglomerado (kg/t)	15	22	22
Solución riego	ILS AJUST	Ref	Ref
Tasa de riego (L/hm ²)	6	8	8
P80 (mm)	10,38	9,48	8,76

En la tabla anterior se puede apreciar que la columna 10 se operó variando la dosificación de ácido en aglomerado, tasa de riego, granulometría y la solución lixivante se ajustó a una acidez de 15 g/l de H⁺, con el propósito de analizar el efecto de adicionar más ácido en el riego y menos volumen. En las columnas 11 y 12 se varió la granulometría a una más fina con P80 de -3/8" y -1/4", debido a la información

recopilada del análisis químico por malla realizado al ripio de la columna 1 y se adicionó ácido en la etapa de aglomerado a dosificaciones de 22kg/t, ya que la prueba en la columna 1 con 20kg/t dio un indicio de falta de ácido libre en la solución de drenaje los primeros días de lixiviación. (Ver Tabla 30 en anexo)

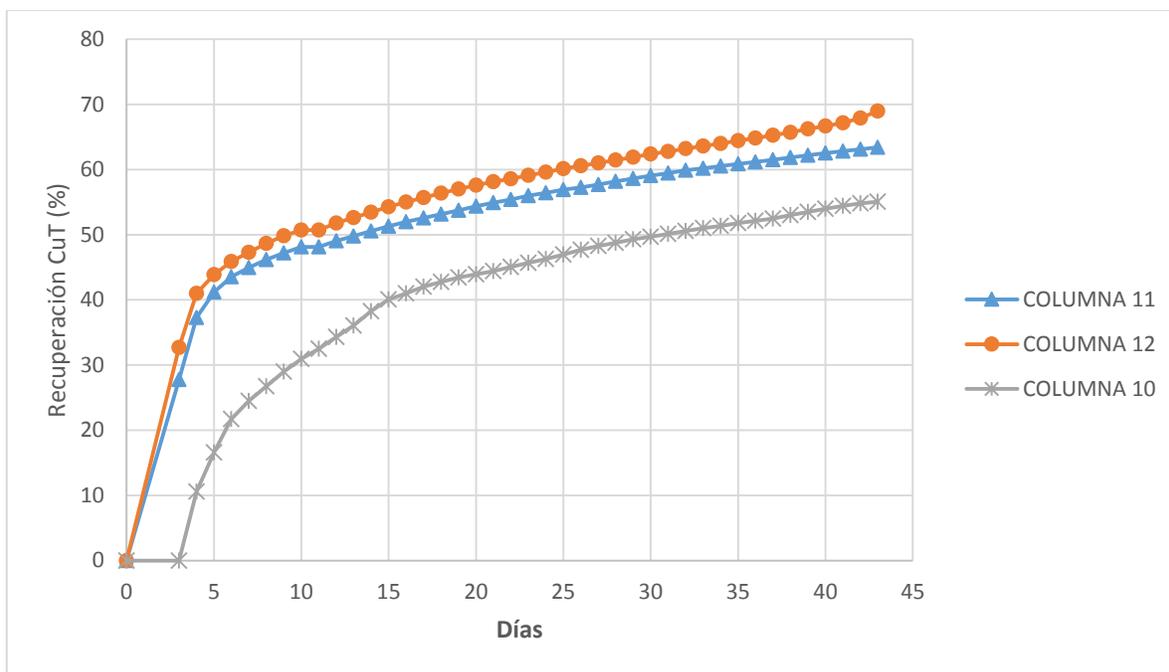


Figura 22. Cinética de extracción, Pruebas Finales.

De la Figura 22, se observa que las columnas 11 y 12 tienen una clara similitud en su tendencia y recuperación, destacando la columna 12 llegando a una recuperación de CuT de 68,97%, sin embargo, en la columna 10 no se obtuvo una buena recuperación. Esto indica que el efecto de la disminución de tasa de riego en 2 L/hm² fue más significativo que el aumento de la acidez en el riego. También, pudo afectar la menor dosis de ácido en el aglomerado con respecto a las otras pruebas.

Al día 43 se puede apreciar que las curvas siguen en ascenso, esto da un indicio de que con las condiciones impuestas en las pruebas sería posible

obtener una mayor recuperación a costa de un ciclo de lixiviación más largo.

Al igual que en las pruebas exploratorias para poder establecer una mejor comparación entre las pruebas, se muestra en la Figura 23 el consumo de ácido total por prueba (CAT) con su respectiva recuperación de Cu total.

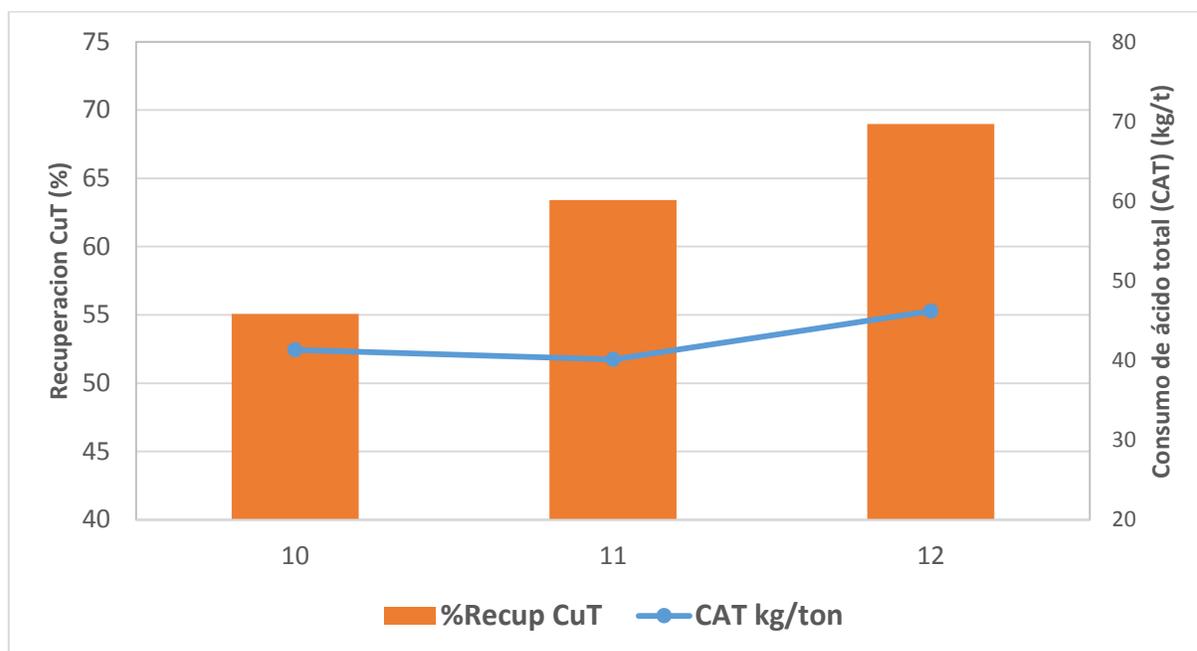


Figura 23. Recuperación de CuT y consumo de ácido total, Pruebas Finales.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Figura 23, se puede decir que las columnas 10 y 11 tienen un consumo de ácido total similar (41,33 y 40,11 kg/t, respectivamente) pero difieren bastante en la recuperación de CuT (55,07 y 63,41%, respectivamente), esto nos permite descartar las condiciones de una tasa de riego de 6 L/hm² y una solución lixivante

ajustada a 15 kg H⁺/t que se refiere a la prueba 10, ya que a un costo de consumo de ácido similar, se obtuvieron recuperaciones deficientes.

La columna 12 obtuvo un buen resultado en cuanto a recuperación de cobre total de 68,97%, sin embargo, su consumo de ácido total fue de 46,17 kg/t, esto valida el comportamiento antes mencionado del mineral de Doña Elba, mientras más ácido se adicione, más cobre se recuperará.



7. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas se concluye lo siguiente:

Se determinó de acuerdo a los resultados de la prueba de sulfatación o curado que la dosificación ideal de ácido en la etapa de aglomerado es de 25 kg/t.

De acuerdo a las pruebas de lixiviación iso-pH

- El consumo de ácido aumentó a medida que la condición de acidez de lixiviación fue más alta. A pH 1,0 el consumo de ácido total fue cercano a 88 kg/t, mientras que a pH 2,0 el consumo disminuyó a 12 kg/t.
- Se determinó una extracción máxima de cobre total de 84% y un consumo de ácido total de 88 kg/t. Este valor representa el máximo que se podría extraer mediante este método.
- Se determinó una clara dependencia directa de la extracción de cobre total y la acidez de la solución de lixiviación. A pH 1,0 se extrajo un 84% de Cu total y para pH cercano a 2,0, la extracción de Cu total sólo fue de un 16-17%.

De acuerdo a los resultados presentados en las pruebas de lixiviación en columnas se puede concluir que:

- Al lixiviar el mineral Doña Elba en mezcla con el mineral Dominio a una razón 3:7, se obtiene una buena recuperación de 64,9% CuT, con un consumo de ácido menor al obtenido con mineral 100% Elba, sin embargo, no responde a la problemática de reemplazar el uso del mineral Dominio proveniente de la mina Barreal Seco.
- Se consiguió una recuperación máxima de CuT de 68,97% en la columna 12 con un consumo de ácido total de 46,17 kg/t, seguido de la columna 1 con 66,14% de CuT con un consumo de ácido total de 38,18 kg/t.

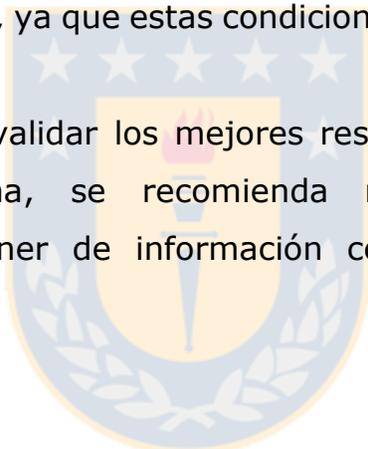
- Las condiciones óptimas para lixiviar el mineral Elba son: dosificación de ácido en aglomerado de 22 kg/t, solución de riego Refino, P80 -1/4" y tasa de riego de 8 L/hm², cumpliendo el ciclo de 43 días.



8. RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas y teniendo en cuenta los posibles beneficios económicos y de operación, se recomienda lo siguiente:

- Realizar un estudio económico con respecto al beneficio o desventaja de utilizar más ácido en las soluciones lixiviantes con el propósito de recuperar más cobre.
- Realizar nuevas pruebas de lixiviación en columnas, con variaciones en las condiciones de operación, ya sea altura de la columna, tasa de riego y/o ciclo de lixiviación, ya que estas condiciones fueron impuestas para el mineral Dominio.
- Con el propósito de validar los mejores resultados obtenidos en las pruebas en columna, se recomienda realizar pruebas semi-industriales, y disponer de información con un mayor grado de escalamiento.



BIBLIOGRAFIA

[1] RUIZ, M. C. *Hidrometalurgia*. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 2013.

[2] IPINZA, Jorge. *Hidrometalurgia I*. Universidad Arturo Prat, Departamento de Metalurgia, 2010.

[3] DOMIC, Esteban. *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*, 2001.

[4] *Introducción a la hidrometalurgia*. Universidad de Atacama, sf.

[5] ESCALONA, Luis. *Aglomerado y curado en el proceso de lixiviación de minerales*, 2007

[6] DHAWAN, N., SAFARZADEH, M., MILLER, J., MOATS, M. and RAJAMANI, R. *Crushed ore agglomeration and its control for heap leach operations*, 2013

Página web <https://www.cenizas.cl/>

Página web <https://www.codelcoeduca.cl/>

ANEXOS

Por medio de una empresa externa (SGS) al mineral se le realizó un Test ICP OES (óptico) para determinar los elementos presentes en la muestra, cuyo resultado se observa en la Tabla 17.

Tabla 17. Resultados Test ICP OES.

Elemento	Unidad	Limite Detectado	Resultado
Ag	ppm	0,50	1,67
Al	%	0,01	6,67
As	ppm	1,00	<1
Ba	ppm	3,00	268,00
Be	ppm	0,50	2,10
Bi	ppm	1,00	<1
Ca	%	0,01	1,25
CaO	%	0,01	1,75
Cd	ppm	1,00	5,00
Co	ppm	1,00	26,00
Cr	ppm	1,00	102,00
Cu	%	0,00	1,22
Fe	%	0,01	12,11
Ga	ppm	1,00	20,00
K	%	0,01	1,12
K ₂ O	%	0,01	1,35
La	ppm	1,00	15,00
Li	ppm	1,00	29,00
Mg	%	0,01	1,99
Mg	ppm	100,00	19943,00
MgO	%	0,01	3,31
Mn	ppm	1,00	931,00

Elemento	Unidad	Limite Detectado	Resultado
Mo	ppm	2,00	<2
Na	%	0,01	3,17
Na ₂ O	%	0,01	4,27
Nb	ppm	1,00	27,00
Ni	ppm	1,00	24,00
P	%	0,01	0,11
Pb	ppm	1,00	6,00
S	%	0,01	0,12
Sb	ppm	2,00	105,00
Sc	ppm	1,00	29,00
Se	ppm	12,00	<12
Sn	ppm	5,00	<5
Sr	ppm	2,00	73,00
Te	ppm	1,00	<1
Ti	%	0,01	0,64
TL	ppm	10,00	<10
V	ppm	1,00	261,00
W	ppm	2,00	<2
Ytrio	ppm	1,00	25,00
Zn	ppm	1,00	90,00
Zr	ppm	0,50	109,10

En Tablas 18 a 29 se muestra el análisis granulométrico del mineral, por columna, con el cual se calculó el P80 mediante interpolación, obteniendo los resultados expuestos en el punto 5.1.3.

Tabla 18. Análisis granulométrico por mallas, columna 1

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 1			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,00	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	54,60	5,48	5,48	94,52
3/8	9500	138,70	13,91	19,38	80,62
1/4	6300	220,90	22,15	41,54	58,46
6	3350	220,40	22,10	63,64	36,36
12	1700	182,60	18,31	81,95	18,05
30	600	15,60	1,56	83,51	16,49
50	300	15,60	1,56	85,08	14,92
70	212	45,20	4,53	89,61	10,39
100	150	21,50	2,16	91,77	8,23
-100	-150	82,10	8,23	100,00	0,00
		997,20	100,00		

Tabla 19. Análisis granulométrico por mallas, columna 2.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 2			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,00	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	60,50	6,07	6,07	93,93
3/8	9500	126,50	12,69	18,76	81,24
1/4	6300	164,10	16,46	35,22	64,78
6	3350	229,60	23,03	58,25	41,75
12	1700	223,30	22,40	80,65	19,35
30	600	29,50	2,96	83,61	16,39
50	300	40,50	4,06	87,67	12,33
70	212	33,50	3,36	91,03	8,97
100	150	25,50	2,56	93,59	6,41
-100	-150	63,90	6,41	100,00	0,00
		996,90	100,00		

Tabla 20. Análisis granulométrico por mallas, columna 3.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 3			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,000	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,000	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	115,500	11,66	11,66	88,34
3/8	9500	179,400	18,11	29,76	70,24
1/4	6300	203,000	20,49	50,25	49,75
6	3350	178,600	18,03	68,28	31,72
12	1700	146,800	14,82	83,09	16,91
30	600	25,300	2,55	85,65	14,35
50	300	0,000	0,00	85,65	14,35
70	212	44,500	4,49	90,14	9,86
100	150	13,800	1,39	91,53	8,47
-100	-150	83,900	8,47	100,00	0,00
		990,800	100,00		

Tabla 21. Análisis granulométrico por mallas, columna 4.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 4			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,000	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,000	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	102,500	10,28	10,28	89,72
3/8	9500	162,100	16,26	26,54	73,46
1/4	6300	224,800	22,55	49,09	50,91
6	3350	225,000	22,57	71,66	28,34
12	1700	137,000	13,74	85,40	14,60
30	600	10,000	1,00	86,41	13,59
50	300	11,200	1,12	87,53	12,47
70	212	39,700	3,98	91,51	8,49
100	150	13,600	1,36	92,88	7,12
-100	-150	71,000	7,12	100,00	0,00
		996,900	100,00		

Tabla 22. Análisis granulométrico por mallas, columna 5.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 5			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,000	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,000	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	123,200	12,32	12,32	87,68
3/8	9500	239,400	23,93	36,25	63,75
1/4	6300	240,000	23,99	60,24	39,76
6	3350	187,700	18,76	79,00	21,00
12	1700	105,900	10,59	89,58	10,42
30	600	18,000	1,80	91,38	8,62
50	300	16,500	1,65	93,03	6,97
70	212	21,600	2,16	95,19	4,81
100	150	5,100	0,51	95,70	4,30
-100	-150	43,000	4,30	100,00	0,00
		1000,400	100,00		

Tabla 23. Análisis granulométrico por mallas, columna 6.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 6			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,000	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,000	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	114,400	11,45	11,45	88,55
3/8	9500	197,200	19,75	31,20	68,80
1/4	6300	244,000	24,43	55,63	44,37
6	3350	180,000	18,02	73,66	26,34
12	1700	104,800	10,49	84,15	15,85
30	600	30,000	3,00	87,15	12,85
50	300	21,300	2,13	89,29	10,71
70	212	36,700	3,67	92,96	7,04
100	150	9,300	0,93	93,89	6,11
-100	-150	61,000	6,11	100,00	0,00
		998,700	100,00		

Tabla 24. Análisis granulométrico por mallas, columna 7.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 7			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,000	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,000	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	116,800	11,69	11,69	88,31
3/8	9500	155,500	15,56	27,25	72,75
1/4	6300	177,500	17,76	45,01	54,99
6	3350	187,700	18,78	63,79	36,21
12	1700	158,700	15,88	79,67	20,33
30	600	34,700	3,47	83,14	16,86
50	300	24,700	2,47	85,61	14,39
70	212	49,700	4,97	90,58	9,42
100	150	12,800	1,28	91,87	8,13
-100	-150	81,300	8,13	100,00	0,00
		999,400	100,00		

Tabla 25. Análisis granulométrico por mallas, columna 8.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 8			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,000	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,000	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	116,800	11,69	11,69	88,31
3/8	9500	155,500	15,56	27,25	72,75
1/4	6300	177,500	17,76	45,01	54,99
6	3350	187,700	18,78	63,79	36,21
12	1700	158,700	15,88	79,67	20,33
30	600	34,700	3,47	83,14	16,86
50	300	24,700	2,47	85,61	14,39
70	212	49,700	4,97	90,58	9,42
100	150	12,800	1,28	91,87	8,13
-100	-150	81,300	8,13	100,00	0,00
		999,400	100,00		

Tabla 26. Análisis granulométrico por mallas, columna 9.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 9			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,000	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,000	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	112,500	11,26	11,26	88,74
3/8	9500	165,200	16,54	27,81	72,19
1/4	6300	189,400	18,96	46,77	53,23
6	3350	177,600	17,78	64,55	35,45
12	1700	205,000	20,53	85,08	14,92
30	600	16,500	1,65	86,73	13,27
50	300	10,200	1,02	87,75	12,25
70	212	22,300	2,23	89,99	10,01
100	150	6,200	0,62	90,61	9,39
-100	-150	93,800	9,39	100,00	0,00
		998,700	100,00		

Tabla 27. Análisis granulométrico por mallas, columna 10.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 10			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,000	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,000	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	64,600	6,46	6,46	93,54
3/8	9500	193,200	19,33	25,79	74,21
1/4	6300	263,000	26,31	52,10	47,90
6	3350	222,900	22,30	74,40	25,60
12	1700	124,200	12,42	86,82	13,18
30	600	37,100	3,71	90,54	9,46
50	300	45,350	4,54	95,07	4,93
70	212	28,900	2,89	97,96	2,04
100	150	14,948	1,50	99,46	0,54
-100	-150	5,402	0,54	100,00	0,00
		999,600	100,00		

Tabla 28. Análisis granulométrico por mallas, columna 11.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 11			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,0	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,0	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	45,7	4,58	4,58	95,42
3/8	9500	152,9	15,31	19,88	80,12
1/4	6300	225,5	22,57	42,46	57,54
6	3350	270,3	27,06	69,52	30,48
12	1700	101,6	10,17	79,69	20,31
30	600	45,0	4,50	84,19	15,81
50	300	34,1	3,41	87,61	12,39
70	212	29,4	2,94	90,55	9,45
100	150	39,8	3,98	94,53	5,47
-100	-150	54,6	5,47	100,00	0,00

Tabla 29. Análisis granulométrico por mallas, columna 12.

Malla [Ty]	Tamaño [μm]	COLUMNA 12			
		PESO	% Ret Parcial	% Ret Acum.	% Pas Acum.
3/4	19050	0,000	0,00	0,00	100,00
5/8	15875	0,000	0,00	0,00	100,00
1/2	12700	28,400	2,84	2,84	97,16
3/8	9500	129,300	12,93	15,77	84,23
1/4	6300	194,100	19,42	35,19	64,81
6	3350	401,900	40,80	75,99	24,01
12	1700	130,980	13,10	89,09	10,91
30	600	30,375	3,04	92,13	7,87
50	300	37,125	3,71	95,85	4,15
70	212	24,000	2,40	98,25	1,75
100	150	18,570	1,26	99,50	0,50
-100	-150	4,950	0,50	100,00	0,00
		999,700	100,00		

En las Tablas 30 a 41 se muestran los análisis químicos realizados diariamente a las soluciones de drenaje de cada columna en el ciclo de riego de 43 días.

Tabla 30. Análisis químico solución de drenaje columna 1.

Día	Solución de riego	SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 1					
		Vol. L	ρ kg/L	Cu g/L	H+ g/L	pH	Eh mV
1	ILS	-	-	-	-	-	-
2	ILS	-	-	-	-	-	-
3	ILS	7,11	1,33	51,75	2,70	1,84	650
4	ILS	7,96	1,25	28,50	1,80	2,01	638
5	ILS	8,57	1,23	16,60	0,00	2,12	637
6	ILS	10,29	1,20	8,20	0,00	2,14	621
7	ILS	8,88	1,20	5,30	0,00	2,27	626
8	ILS	8,17	1,20	4,40	0,00	2,32	624
9	ILS	9,38	1,20	4,00	0,00	2,30	625
10	ILS	9,63	1,20	3,45	0,00	2,12	636
11	REF	9,25	1,20	3,60	0,00	2,13	639
12	REF	8,63	1,20	3,42	0,00	2,24	638
13	REF	8,17	1,18	3,06	0,00	2,14	641
14	REF	10,08	1,20	2,90	0,00	2,25	635
15	REF	10,93	1,20	2,52	0,00	2,22	636
16	REF	9,63	1,20	2,26	0,00	2,16	636
17	REF	9,28	1,20	2,32	1,60	1,99	643
18	REF	8,26	1,20	2,26	1,30	2,10	641
19	REF	9,58	1,20	2,04	0,00	2,14	635
20	REF	9,79	1,20	1,90	0,00	2,10	637
21	REF	10,17	1,20	1,88	1,90	2,07	638
22	REF	9,96	1,20	1,80	1,60	2,03	640
23	REF	10,21	1,20	1,84	1,60	2,02	639
24	REF	10,21	1,20	1,73	1,50	1,87	645
25	REF	10,21	1,20	1,73	2,40	1,81	647
26	REF	10,13	1,20	1,69	1,90	1,84	647
27	REF	10,00	1,20	1,67	2,00	1,88	646
28	REF	10,72	1,20	1,59	2,10	1,88	643
29	REF	10,17	1,20	1,86	2,00	1,88	644
30	REF	8,96	1,20	1,45	2,50	1,81	645
31	REF	9,63	1,20	1,39	2,50	1,76	648
32	REF	11,25	1,20	1,18	2,50	1,76	651
33	REF	11,04	1,20	1,19	2,70	1,61	650
34	REF	11,92	1,20	1,11	2,60	1,63	649
35	REF	9,83	1,20	1,01	2,50	1,78	651
36	REF	11,29	1,20	1,03	2,60	1,75	652
37	REF	9,33	1,20	1,09	2,60	1,73	653
38	REF	9,38	1,20	1,05	2,70	1,78	653
39	REF	10,00	1,20	1,14	2,80	1,76	650
40	REF	11,17	1,20	1,21	3,10	1,63	653
41	REF	10,83	1,20	1,28	3,00	1,64	649
42	REF	10,22	1,20	0,91	2,40	1,75	651
43	REF	10,78	1,20	0,88	2,00	1,63	642

Tabla 31. Análisis químico solución de drenaje columna 2.

Día	SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 2						
	Solución de riego	Vol. L	g kg/L	Cu g/L	H+ g/L	pH	Eh mV
1	ILS	-	-	-	-	-	-
2	ILS	-	-	-	-	-	-
3	ILS	-	-	-	-	-	-
4	ILS	7,81	1,35	29,75	4,30	1,43	645
5	ILS	8,58	1,30	22,90	3,00	1,64	646
6	ILS	7,53	1,28	18,70	2,60	1,78	636
7	ILS	7,64	1,25	13,50	1,90	1,94	640
8	ILS	8,53	1,23	10,70	1,80	2,03	636
9	ILS	9,31	1,23	8,90	1,70	2,03	636
10	ILS	9,35	1,23	7,50	1,60	1,92	641
11	REF	10,16	1,23	6,70	2,00	1,94	645
12	REF	9,71	1,23	5,36	1,70	2,04	645
13	REF	9,88	1,20	4,62	2,10	1,92	647
14	REF	10,08	1,20	4,54	1,50	2,01	642
15	REF	10,46	1,20	4,10	1,70	2,02	642
16	REF	9,58	1,20	4,08	1,70	1,99	643
17	REF	9,50	1,20	3,56	2,10	1,86	647
18	REF	10,59	1,20	2,94	1,70	1,94	648
19	REF	11,48	1,20	2,41	1,70	2,00	643
20	REF	10,47	1,20	2,27	1,80	1,97	645
21	REF	9,92	1,20	2,23	1,80	1,95	645
22	REF	10,17	1,20	2,17	1,90	1,95	646
23	REF	10,08	1,20	2,19	1,80	1,94	646
24	REF	10,00	1,20	2,14	1,90	1,81	651
25	REF	10,55	1,20	1,90	3,20	1,67	655
26	REF	10,00	1,20	1,82	2,60	1,69	654
27	REF	9,49	1,20	1,81	2,50	1,74	653
28	REF	10,21	1,20	1,74	2,60	1,75	650
29	REF	9,50	1,20	2,01	2,20	1,76	645
30	REF	8,00	1,20	1,66	2,40	1,70	648
31	REF	9,92	1,20	1,56	2,50	1,68	650
32	REF	10,67	1,20	1,26	2,80	1,67	653
33	REF	11,67	1,20	1,16	3,30	1,44	654
34	REF	12,17	1,20	1,10	3,20	1,38	654
35	REF	9,46	1,20	1,03	3,00	1,63	655

Tabla 32. Análisis químico solución de drenaje columna 4.

SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 4							
Día	Solución de riego	Vol.	9	Cu	H+	pH	Eh
		L	kg/L	g/L	g/L		mV
1	ILS	-	-	-	-	-	-
2	ILS	-	-	-	-	-	-
3	ILS	-	-	-	-	-	-
4	ILS	7,07	1,40	16,75	10,30	0,74	661
5	ILS	7,93	1,38	18,63	5,20	1,10	632
6	ILS	10,08	1,33	17,80	2,10	1,38	620
7	ILS	8,96	1,30	14,10	2,30	1,60	628
8	ILS	8,46	1,20	12,80	2,18	1,80	624
9	ILS	9,49	1,28	11,30	2,00	1,75	627
10	ILS	9,48	1,25	7,70	1,80	1,77	632
11	ILS	9,11	1,23	6,35	2,10	1,80	642
12	ILS	8,46	1,20	4,82	1,80	1,97	644
13	ILS	8,63	1,20	4,58	2,20	1,82	645
14	ILS	9,17	1,20	4,40	1,70	1,98	640
15	ILS	9,54	1,20	3,84	1,60	2,00	640
16	ILS	9,04	1,20	3,32	1,80	1,99	643
17	ILS	10,00	1,20	2,86	2,30	1,84	651
18	ILS	9,66	1,18	2,86	1,90	1,93	649
19	ILS	10,67	1,20	2,78	1,70	2,00	645
20	ILS	9,71	1,20	3,00	1,80	1,98	646
21	ILS	9,92	1,20	2,61	1,60	1,98	647
22	ILS	10,25	1,20	2,38	1,60	1,98	648
23	REF	9,75	1,20	2,33	1,90	1,95	649
24	REF	10,13	1,20	2,31	2,00	1,82	653
25	REF	10,21	1,20	2,14	2,80	1,74	656
26	REF	10,55	1,20	2,02	2,40	1,78	659
27	REF	10,00	1,20	2,02	2,30	1,79	659
28	REF	10,30	1,20	2,04	2,50	1,78	656
29	REF	9,53	1,20	2,42	2,20	1,79	651
30	REF	10,21	1,20	2,05	2,40	1,68	653
31	REF	9,54	1,20	1,89	2,50	1,65	656
32	REF	10,75	1,20	1,71	2,80	1,68	656
33	REF	11,42	1,20	1,56	2,90	1,51	655
34	REF	11,58	1,20	1,40	3,00	1,48	656
35	REF	9,33	1,20	1,26	2,40	1,73	657

Tabla 33. Análisis químico solución de drenaje columna 3.

SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 3							
Día	Solución de riego	Vol.	ϑ	Cu	H+	pH	Eh
		L	kg/L	g/L	g/L		mV
1	ILS	-	-	-	-	-	-
2	ILS	-	-	-	-	-	-
3	ILS	9,88	1,30	36,50	3,30	1,73	646
4	ILS	9,68	1,25	23,00	2,80	1,96	643
5	ILS	10,46	1,20	14,50	2,20	1,98	648
6	ILS	10,50	1,20	8,60	1,90	2,00	645
7	ILS	9,21	1,20	4,85	1,80	2,06	644
8	ILS	10,21	1,20	3,80	1,90	2,12	643
9	ILS	11,50	1,20	3,10	1,90	1,97	643
10	ILS	10,42	1,20	2,88	2,00	1,93	644
11	ILS	8,63	1,20	2,71	1,80	2,09	645
12	ILS	11,54	1,20	2,60	1,80	2,05	647
13	ILS	8,88	1,20	2,58	1,60	2,09	648
14	ILS	8,67	1,20	2,37	1,80	2,07	649
15	ILS	9,13	1,20	2,39	2,30	2,02	646
16	ILS	11,29	1,20	2,35	2,00	1,90	649
17	ILS	10,83	1,20	2,37	2,40	1,87	647
18	ILS	11,04	1,20	2,34	2,40	1,86	648
19	ILS	10,88	1,20	2,24	2,40	1,86	644
20	ILS	11,33	1,20	2,20	2,10	1,87	646
21	ILS	10,96	1,20	2,07	1,70	1,90	645
22	ILS	9,25	1,20	2,02	2,00	1,90	648
23	REF	10,00	1,20	2,03	2,30	1,90	644
24	REF	9,79	1,20	2,05	2,50	1,78	648
25	REF	11,54	1,20	1,98	2,60	1,76	648
26	REF	11,04	1,20	1,63	2,00	1,82	648
27	REF	11,46	1,20	1,70	2,50	1,77	652
28	REF	12,88	1,20	1,55	2,00	1,82	654
29	REF	11,00	1,20	1,51	2,20	1,77	653
30	REF	11,42	1,20	1,60	2,10	1,74	65
31	REF	11,13	1,20	1,66	2,30	1,71	651
32	REF	10,42	1,20	1,58	1,90	1,75	648
33	REF	11,29	1,20	1,27	2,00	1,65	655
34	REF	11,88	1,20	1,25	2,50	1,75	653
35	REF	10,67	1,20	1,22	2,90	1,68	650
36	REF	11,25	1,20	1,19	2,50	1,80	651
37	REF	11,38	1,20	1,02	2,40	1,80	649
38	REF	11,67	1,20	1,01	2,70	1,82	646
39	REF	11,63	1,20	0,89	2,50	1,77	650
40	REF	11,75	1,20	1,00	2,30	1,89	652
41	REF	11,29	1,20	1,20	2,70	1,79	654
42	REF	11,17	1,20	1,33	2,30	1,77	648
43	REF	10,04	1,20	1,24	2,30	1,76	648

Tabla 34. Análisis químico solución de drenaje columna 5.

Día	Solución de riego	SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 5					
		Vol. L	g kg/L	Cu g/L	H+ g/L	pH	Eh mV
1	REF	-	-	-	-	-	-
2	REF	-	-	-	-	-	-
3	REF	10,19	1,30	35,25	4,20	1,66	647
4	REF	10,00	1,25	21,50	3,00	1,83	647
5	REF	9,76	1,23	12,50	2,80	1,79	651
6	REF	9,83	1,20	8,70	2,70	1,74	653
7	REF	9,58	1,20	5,75	2,50	1,81	650
8	REF	10,83	1,20	3,55	2,60	1,81	653
9	REF	10,71	1,20	2,76	2,90	1,59	653
10	REF	11,96	1,20	2,34	1,80	1,99	642
11	REF	9,67	1,20	2,27	2,60	1,75	655
12	REF	11,38	1,20	2,10	2,50	1,73	655
13	REF	9,38	1,20	2,01	2,60	1,73	656
14	REF	10,21	1,20	1,84	2,60	1,76	658
15	REF	9,79	1,20	1,69	3,40	1,66	655
16	REF	11,33	1,20	1,79	3,60	1,55	654
17	REF	11,29	1,20	1,80	3,30	1,57	653
18	REF	10,88	1,20	1,79	3,10	1,59	654
19	REF	10,63	1,20	1,70	3,10	1,58	652
20	REF	11,25	1,20	1,65	3,30	1,64	652
21	REF	11,38	1,20	1,50	2,50	1,61	652
22	REF	10,92	1,20	1,42	3,20	1,55	657
23	ILS	11,04	1,20	1,44	3,60	1,53	654
24	ILS	11,38	1,20	1,37	3,50	1,55	652
25	ILS	11,54	1,20	1,70	3,20	1,60	649
26	ILS	11,46	1,20	1,75	2,30	1,76	648
27	ILS	11,29	1,20	1,76	2,30	1,70	652
28	ILS	12,04	1,20	1,64	2,40	1,76	651
29	ILS	11,83	1,20	1,63	2,20	1,72	650
30	ILS	9,79	1,20	1,70	2,60	1,76	648
31	ILS	10,54	1,20	1,70	2,40	1,72	648
32	ILS	10,17	1,20	1,69	2,00	1,79	646
33	ILS	10,83	1,20	1,54	2,10	1,84	646
34	ILS	10,29	1,20	1,51	2,40	1,81	648
35	ILS	10,71	1,20	1,52	2,60	1,77	646
36	ILS	11,00	1,20	1,46	2,20	1,87	649
37	ILS	11,25	1,20	1,43	2,30	1,85	649
38	ILS	11,25	1,20	1,48	2,70	1,83	647
39	ILS	11,38	1,20	1,33	2,20	1,84	648
40	ILS	11,42	1,20	1,28	2,10	1,85	650
41	ILS	11,13	1,20	1,37	2,10	1,90	652
42	ILS	10,38	1,20	1,36	2,10	1,86	648
43	ILS	9,83	1,20	1,36	2,30	1,83	649

Tabla 35. Análisis químico solución de drenaje columna 6.

Día	SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 6						
	Solución de riego	Vol.	ρ	Cu	H+	pH	Eh
		L	kg/L	g/L	g/L		mV
1	ILS	-	-	-	-	-	-
2	ILS	-	-	-	-	-	-
3	ILS	-	-	-	-	-	-
4	ILS	15,75	1,33	32,20	2,40	1,81	662
5	ILS	11,18	1,23	11,56	0,50	2,39	633
6	ILS	9,02	1,22	5,33	0,50	2,44	622
7	ILS	10,42	1,20	3,31	0,50	2,54	619
8	ILS	9,42	1,20	2,72	0,45	2,57	617
9	ILS	11,21	1,20	2,20	0,50	2,52	619
10	ILS	11,38	1,20	1,91	0,42	2,49	623
11	ILS	8,75	1,20	1,90	0,45	2,55	620
12	ILS	10,75	1,20	1,80	0,38	2,48	621
13	ILS	10,38	1,20	1,67	0,41	2,44	620
14	ILS	10,83	1,20	1,52	0,39	2,44	624
15	ILS	10,71	1,20	1,54	0,39	2,42	619
16	ILS	11,08	1,20	1,40	0,35	2,41	620
17	ILS	11,00	1,20	1,33	0,35	2,45	620
18	ILS	10,71	1,20	1,35	0,35	2,36	622
19	ILS	10,96	1,20	1,25	0,40	2,42	619
20	ILS	10,00	1,20	1,26	0,35	2,41	618
21	ILS	11,33	1,20	1,14	0,20	2,40	618
22	ILS	10,04	1,20	1,06	0,35	2,39	620
23	ILS	10,29	1,20	1,14	0,45	2,36	623
24	REF	10,33	1,20	1,10	0,30	2,33	624
25	REF	9,67	1,20	1,26	0,20	2,35	618
26	REF	9,88	1,20	1,09	0,30	2,31	615
27	REF	10,96	1,20	1,00	0,25	2,32	621
28	REF	10,79	1,20	1,07	0,25	2,31	620
29	REF	10,75	1,20	1,08	0,40	2,28	618
30	REF	11,29	1,20	1,03	0,20	2,24	619
31	REF	10,46	1,20	0,98	0,10	2,29	616
32	REF	11,71	1,20	0,97	0,10	2,23	619
33	REF	10,47	1,20	0,93	0,10	2,26	620
34	REF	10,83	1,20	0,97	0,60	2,27	621
35	REF	10,71	1,20	0,95	0,95	2,23	620
36	REF	10,21	1,20	1,03	1,40	2,20	619
37	REF	9,90	1,20	1,12	1,40	2,17	617
38	REF	9,82	1,20	1,15	1,40	2,15	615
39	REF	10,83	1,20	1,11	1,40	2,17	615
40	REF	10,45	1,20	1,07	1,40	2,07	615
41	REF	10,16	1,20	1,04	1,10	2,02	614
42	REF	10,27	1,20	1,02	1,20	2,11	612
43	REF	10,45	1,20	1,01	1,25	2,09	610

Tabla 36. Análisis químico solución de drenaje columna 7.

Día	SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 7						
	Solución de riego	Vol.	ϑ	Cu	H+	pH	Eh
		L	kg/L	g/L	g/L		mV
1	REF	-	-	-	-	-	-
2	REF	-	-	-	-	-	-
3	REF	4,04	1,33	40,25	7,40	1,14	676
4	REF	9,58	1,25	30,75	3,70	1,43	664
5	REF	10,75	1,22	16,80	2,60	1,71	652
6	REF	10,16	1,22	9,50	2,20	1,88	644
7	REF	9,96	1,22	6,25	2,50	1,84	642
8	REF	11,50	1,20	4,13	1,80	2,00	638
9	REF	8,21	1,20	3,50	1,60	1,99	637
10	REF	10,50	1,20	3,02	1,05	2,09	634
11	REF	9,04	1,20	2,45	1,60	2,10	633
12	REF	9,96	1,20	2,25	1,60	2,08	634
13	REF	10,00	1,20	2,08	1,60	2,06	635
14	REF	8,29	1,20	2,10	1,50	2,13	635
15	REF	10,54	1,20	2,01	1,70	2,04	636
16	REF	10,08	1,20	2,03	1,70	1,99	637
17	REF	10,88	1,20	1,95	1,90	1,99	637
18	REF	10,79	1,20	1,96	1,80	1,94	635
19	REF	10,96	1,20	1,92	1,70	1,96	636
20	REF	11,29	1,20	1,83	1,80	2,00	634
21	REF	10,92	1,20	1,80	1,90	1,96	635
22	REF	11,21	1,20	1,80	1,70	1,98	635
23	REF	10,50	1,20	1,88	1,70	2,02	635
24	ILS	9,42	1,20	1,79	1,80	2,01	635
25	ILS	9,25	1,20	1,83	1,80	2,02	634
26	ILS	10,33	1,20	1,65	1,80	1,98	637
27	ILS	9,92	1,20	1,25	2,00	1,94	641
28	ILS	9,54	1,20	1,13	2,00	1,94	639
29	ILS	11,21	1,20	1,06	1,70	1,87	635
30	ILS	10,58	1,20	0,92	2,20	1,91	641
31	ILS	10,58	1,20	0,91	2,00	1,81	639
32	ILS	10,96	1,20	0,88	2,30	1,77	638
33	ILS	11,21	1,20	0,85	2,40	1,72	639
34	ILS	10,75	1,20	0,80	2,20	1,79	636
35	ILS	11,33	1,20	0,77	2,20	1,76	638
36	ILS	10,22	1,20	0,74	2,30	1,78	638
37	ILS	11,33	1,20	0,76	2,30	1,78	638
38	ILS	10,92	1,20	0,76	2,00	1,81	636
39	ILS	10,83	1,20	0,76	2,20	1,81	636
40	ILS	10,11	1,20	0,77	2,30	1,80	636
41	ILS	10,58	1,20	0,79	2,00	1,81	636
42	ILS	11,06	1,20	0,82	2,00	1,85	634
43	ILS	10,44	1,20	0,76	1,90	1,80	634

Tabla 37. Análisis químico solución de drenaje columna 8.

Día	SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 8						
	Solución de riego	Vol. L	g kg/L	Cu g/L	H+ g/L	pH	Eh mV
1	ILS	-	-	-	-	-	-
2	ILS	-	-	-	-	-	-
3	ILS	-	-	-	-	-	-
4	ILS	12,80	1,34	33,00	2,90	1,62	651
5	ILS	10,98	1,28	14,20	2,40	1,84	649
6	ILS	8,90	1,23	8,80	1,90	1,90	652
7	ILS	9,18	1,20	5,88	2,00	1,93	653
8	ILS	10,54	1,20	4,14	2,50	1,90	646
9	ILS	9,08	1,20	3,48	2,10	1,77	653
10	ILS	11,00	1,20	3,14	2,10	1,76	651
11	ILS	10,58	1,20	2,90	2,70	1,75	651
12	ILS	9,83	1,20	3,06	2,60	1,74	650
13	ILS	11,25	1,20	2,84	2,70	1,80	651
14	ILS	11,46	1,20	2,86	1,90	1,84	647
15	ILS	10,67	1,20	2,46	2,10	1,83	651
16	ILS	10,79	1,20	2,19	2,50	1,79	649
17	ILS	12,04	1,20	2,05	2,50	1,78	648
18	ILS	11,67	1,20	1,98	2,60	1,76	648
19	ILS	11,54	1,20	1,95	2,00	1,86	648
20	ILS	11,08	1,20	1,92	2,30	1,74	652
21	ILS	12,00	1,20	1,86	2,00	1,81	651
22	ILS	10,88	1,20	1,83	2,20	1,75	652
23	REF	10,71	1,20	1,84	2,10	1,74	651
24	REF	11,13	1,20	1,82	2,30	1,71	651
25	REF	10,63	1,20	1,52	2,20	1,70	652
26	REF	10,96	1,20	1,16	2,80	1,65	655
27	REF	11,13	1,20	1,24	2,80	1,66	656
28	REF	10,58	1,20	1,23	3,20	1,61	653
29	REF	11,04	1,20	1,12	2,70	1,71	660
30	REF	11,17	1,20	0,98	3,00	1,67	654
31	REF	11,13	1,20	1,02	2,80	1,68	651
32	REF	10,79	1,20	0,97	2,90	1,64	653
33	REF	11,50	1,20	0,99	2,70	1,73	654
34	REF	10,83	1,20	1,20	2,60	1,72	656
35	REF	10,83	1,20	1,23	2,60	1,66	652
36	REF	10,58	1,20	1,18	2,80	1,64	653
37	REF	10,67	1,20	1,14	3,10	1,54	652
38	REF	10,71	1,20	1,22	3,40	1,47	654
39	REF	8,58	1,20	1,44	2,90	1,57	649
40	REF	10,00	1,20	1,42	2,60	1,60	648
41	REF	10,08	1,20	1,40	2,50	1,65	648
42	REF	10,42	1,20	1,28	2,80	1,59	650
43	REF	9,96	1,20	1,24	2,60	1,65	650

Tabla 38. Análisis químico solución de drenaje columna 9.

SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 9							
Día	Solución de riego	Vol.	g	Cu	H+	pH	Eh
		L	kg/L	g/L	g/L		mV
1	ILS	-	-	-	-	-	-
2	ILS	-	-	-	-	-	-
3	ILS	-	-	-	-	-	-
4	ILS	12,11	1,34	31,30	3,50	1,54	656
5	ILS	10,08	1,28	16,00	2,50	1,80	652
6	ILS	9,15	1,23	11,00	2,00	1,88	652
7	ILS	8,67	1,20	7,25	2,00	1,90	654
8	ILS	9,50	1,20	5,75	2,40	1,87	651
9	ILS	11,33	1,20	4,32	2,70	1,75	653
10	ILS	11,42	1,20	3,58	2,70	1,74	651
11	ILS	10,63	1,20	3,04	3,10	1,71	653
12	ILS	10,38	1,20	2,62	2,90	1,70	650
13	ILS	11,38	1,20	2,56	3,00	1,73	651
14	ILS	12,75	1,20	2,48	2,00	1,79	649
15	ILS	9,01	1,20	2,08	2,70	1,82	646
16	ILS	11,21	1,20	1,99	2,70	1,72	650
17	ILS	11,58	1,20	1,98	2,60	1,73	650
18	ILS	11,71	1,20	1,90	2,70	1,71	650
19	ILS	11,83	1,20	1,82	2,00	1,81	650
20	ILS	11,38	1,20	1,82	2,30	1,70	653
21	ILS	12,58	1,20	1,75	2,30	1,77	650
22	ILS	11,92	1,20	1,70	2,30	1,70	652
23	REF	10,13	1,20	1,79	2,10	1,72	650
24	REF	11,04	1,20	1,74	2,70	1,67	653
25	REF	10,79	1,20	1,41	2,20	1,70	651
26	REF	10,71	1,20	1,10	2,90	1,64	655
27	REF	10,58	1,20	1,16	3,40	1,59	655
28	REF	10,54	1,20	1,15	3,20	1,61	652
29	REF	10,58	1,20	0,95	2,80	1,70	655
30	REF	11,08	1,20	0,93	3,00	1,66	652
31	REF	10,92	1,20	1,01	3,10	1,66	651
32	REF	11,50	1,20	0,92	2,90	1,65	652
33	REF	10,83	1,20	0,95	3,20	1,76	657
34	REF	10,79	1,20	1,11	3,40	1,64	656
35	REF	10,21	1,20	1,12	2,90	1,62	652
36	REF	9,67	1,20	1,06	3,50	1,61	653
37	REF	9,67	1,20	1,04	3,50	1,57	653
38	REF	10,75	1,20	1,13	3,70	1,43	655
39	REF	9,83	1,20	1,28	3,10	1,52	652
40	REF	10,21	1,20	1,34	2,70	1,60	650
41	REF	9,83	1,20	1,34	2,90	1,63	648
42	REF	9,79	1,20	1,27	2,80	1,58	650
43	REF	10,00	1,20	1,16	2,60	1,65	649

Tabla 39. Análisis químico solución de drenaje columna 10.

Día	Solución de riego	SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 10					
		Vol. L	g kg/L	Cu g/L	H+ g/L	pH	Eh mV
1	ILS. Ajust	-	-	-	-	-	-
2	ILS. Ajust	-	-	-	-	-	-
3	ILS. Ajust	-	-	-	-	-	-
4	ILS. Ajust	5,37	1,35	33,00	2,50	1,88	672
5	ILS. Ajust	6,29	1,28	16,76	1,70	2,22	646
6	ILS. Ajust	8,72	1,25	10,80	1,70	2,16	641
7	ILS. Ajust	6,56	1,22	8,20	1,80	2,12	640
8	ILS. Ajust	6,23	1,22	7,25	1,50	2,14	637
9	ILS. Ajust	7,34	1,22	6,35	1,70	2,10	636
10	ILS. Ajust	8,48	1,22	5,25	1,60	2,21	632
11	ILS. Ajust	7,30	1,22	5,00	1,60	2,17	632
12	ILS. Ajust	8,73	1,22	4,85	1,50	2,10	634
13	ILS. Ajust	7,99	1,22	5,10	1,50	2,11	631
14	ILS. Ajust	8,61	1,22	5,50	2,10	1,93	634
15	ILS. Ajust	9,22	1,22	4,42	1,60	2,14	631
16	ILS. Ajust	6,15	1,22	3,98	1,70	2,12	625
17	ILS. Ajust	6,76	1,22	3,80	1,40	2,22	623
18	ILS. Ajust	6,07	1,22	3,43	1,40	2,21	622
19	ILS. Ajust	6,27	1,22	3,30	1,50	2,17	624
20	ILS. Ajust	5,90	1,22	2,92	1,50	2,14	627
21	ILS. Ajust	5,29	1,22	3,00	1,60	2,22	625
22	ILS. Ajust	7,00	1,20	2,84	1,40	2,15	627
23	ILS. Ajust	7,83	1,20	2,82	1,70	2,09	624
24	ILS. Ajust	9,50	1,20	2,50	1,30	2,01	635
25	ILS. Ajust	8,58	1,20	2,71	1,30	2,01	627
26	ILS. Ajust	9,21	1,20	2,76	1,90	2,09	629
27	ILS. Ajust	9,33	1,20	2,48	1,90	2,08	626
28	ILS. Ajust	9,13	1,20	2,36	1,70	2,06	628
29	ILS. Ajust	9,42	1,20	2,41	1,70	2,08	629
30	ILS. Ajust	8,88	1,20	2,46	1,60	2,06	629
31	ILS. Ajust	8,38	1,20	2,31	1,60	2,09	623
32	ILS. Ajust	7,96	1,20	2,29	1,50	2,09	623
33	ILS. Ajust	7,46	1,20	2,34	1,80	2,03	625
34	ILS. Ajust	6,96	1,20	2,29	1,60	2,09	625
35	ILS. Ajust	6,63	1,20	2,40	1,60	2,07	626
36	ILS. Ajust	7,92	1,20	2,38	1,50	2,04	620
37	ILS. Ajust	8,29	1,20	2,30	1,60	2,06	625
38	ILS. Ajust	8,29	1,20	2,34	1,70	2,04	630
39	ILS. Ajust	8,50	1,20	2,30	1,70	2,02	621
40	ILS. Ajust	9,00	1,20	2,24	1,70	1,97	626
41	ILS. Ajust	8,63	1,20	2,18	1,50	2,04	620
42	ILS. Ajust	8,04	1,20	2,20	1,50	2,00	623
43	ILS. Ajust	8,12	1,20	2,08	1,50	2,06	622

Tabla 40. Análisis químico solución de drenaje columna 11.

Día	SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 11						
	Solución de riego	Vol.	g	Cu	H+	pH	Eh
		L	kg/L	g/L	g/L		mV
1	REF	-	-	-	-	-	-
2	REF	-	-	-	-	-	-
3	REF	-	-	-	-	-	-
4	REF	15,90	1,33	27,00	2,70	1,74	660
5	REF	12,01	1,23	12,28	1,60	2,24	638
6	REF	9,22	1,22	6,87	1,60	2,29	629
7	REF	11,04	1,20	3,67	1,30	2,36	627
8	REF	10,00	1,20	2,49	1,60	2,36	625
9	REF	11,29	1,20	2,04	1,60	2,27	627
10	REF	11,00	1,20	1,75	1,50	2,15	633
11	REF	10,50	1,20	1,72	1,50	2,27	629
12	REF	10,88	1,20	1,58	1,60	2,22	631
13	REF	10,33	1,20	1,51	1,50	2,15	629
14	REF	10,88	1,20	1,43	1,60	2,10	633
15	REF	10,75	1,20	1,40	1,60	2,10	628
16	REF	11,00	1,20	1,30	1,40	2,17	630
17	REF	10,96	1,20	1,23	1,40	2,16	628
18	REF	10,63	1,20	1,21	1,60	2,13	630
19	REF	11,46	1,20	1,16	1,60	2,16	628
20	REF	10,63	1,20	1,20	1,60	2,17	628
21	REF	11,58	1,20	1,11	1,60	2,15	630
22	REF	10,38	1,20	1,10	1,60	2,16	629
23	REF	11,88	1,20	1,09	1,80	2,03	634
24	REF	10,08	1,20	1,09	1,60	2,05	632
25	REF	9,04	1,20	1,19	1,40	2,14	627
26	REF	10,13	1,20	1,03	1,40	2,07	625
27	REF	10,50	1,20	1,00	1,50	2,09	630
28	REF	10,75	1,20	1,05	1,50	2,06	628
29	REF	10,67	1,20	1,01	1,50	2,06	625
30	REF	10,96	1,20	1,02	1,40	2,03	626
31	REF	10,38	1,20	0,96	1,50	2,10	623
32	REF	11,67	1,20	0,93	1,40	2,05	627
33	REF	10,96	1,20	0,90	1,40	2,08	627
34	REF	11,25	1,20	0,90	1,70	2,05	629
35	REF	10,88	1,20	0,91	1,70	2,05	627
36	REF	10,68	1,20	0,95	1,50	2,06	626
37	REF	10,00	1,20	0,96	1,60	2,09	623
38	REF	9,83	1,20	0,96	1,40	2,09	623
39	REF	10,95	1,20	0,96	1,30	2,12	622
40	REF	9,95	1,20	0,97	1,30	2,02	622
41	REF	9,73	1,20	0,96	1,30	2,09	621
42	REF	10,22	1,20	0,91	1,40	2,15	619
43	REF	10,78	1,20	0,88	1,30	2,15	619

Tabla 41. Análisis químico solución de drenaje columna 12.

Día	SOLUCION DE DRENAJE COLUMNA 12						
	Solución de riego	Vol. L	g kg/L	Cu g/L	H+ g/L	pH	Eh mV
1	REF	-	-	-	-	-	-
2	REF	-	-	-	-	-	-
3	REF	-	-	-	-	-	-
4	REF	15,75	1,33	32,20	2,40	1,81	662
5	REF	11,18	1,23	11,56	0,50	2,39	633
6	REF	9,02	1,22	5,33	0,50	2,44	622
7	REF	10,42	1,20	3,31	0,50	2,54	619
8	REF	9,42	1,20	2,72	0,45	2,57	617
9	REF	11,21	1,20	2,20	0,50	2,52	619
10	REF	11,38	1,20	1,91	0,42	2,49	623
11	REF	8,75	1,20	1,90	0,45	2,55	620
12	REF	10,75	1,20	1,80	0,38	2,48	621
13	REF	10,38	1,20	1,67	0,41	2,44	620
14	REF	10,83	1,20	1,52	0,39	2,44	624
15	REF	10,71	1,20	1,54	0,39	2,42	619
16	REF	11,08	1,20	1,40	0,35	2,41	620
17	REF	11,00	1,20	1,33	0,35	2,45	620
18	REF	10,71	1,20	1,35	0,35	2,36	622
19	REF	10,96	1,20	1,25	0,40	2,42	619
20	REF	10,00	1,20	1,26	0,35	2,41	618
21	REF	11,33	1,20	1,14	0,20	2,40	618
22	REF	10,04	1,20	1,06	0,35	2,39	620
23	REF	10,29	1,20	1,14	0,45	2,36	623
24	REF	10,33	1,20	1,10	0,30	2,33	624
25	REF	9,67	1,20	1,26	0,20	2,35	618
26	REF	9,88	1,20	1,09	0,30	2,31	615
27	REF	10,96	1,20	1,00	0,25	2,32	621
28	REF	10,79	1,20	1,07	0,25	2,31	620
29	REF	10,75	1,20	1,08	0,40	2,28	618
30	REF	11,29	1,20	1,03	0,20	2,24	619
31	REF	10,46	1,20	0,98	0,10	2,29	616
32	REF	11,71	1,20	0,97	0,10	2,23	619
33	REF	10,47	1,20	0,93	0,10	2,26	620
34	REF	10,83	1,20	0,97	0,60	2,27	621
35	REF	10,71	1,20	0,95	0,95	2,23	620
36	REF	10,21	1,20	1,03	1,40	2,20	619
37	REF	9,90	1,20	1,12	1,40	2,17	617
38	REF	9,82	1,20	1,15	1,40	2,15	615
39	REF	10,83	1,20	1,11	1,40	2,17	615
40	REF	10,45	1,20	1,07	1,40	2,07	615
41	REF	10,16	1,20	1,04	1,10	2,02	614
42	REF	10,27	1,20	1,02	1,20	2,11	612
43	REF	10,45	1,20	1,01	1,25	2,09	610

Tabla 42. Extracción diaria de cobre, columna 1.

Columna 1		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	18,41	23,48
4	29,65	37,82
5	36,36	46,38
6	39,95	50,96
7	41,71	53,21
8	42,73	54,50
9	43,94	56,05
10	44,85	57,20
11	46,33	59,09
12	47,63	60,75
13	48,64	62,05
14	49,88	63,62
15	51,01	65,06
16	51,84	66,13
17	52,70	67,22
18	53,44	68,16
19	54,17	69,09
20	54,85	69,96
21	55,56	70,86
22	56,22	71,71
23	55,91	71,32
24	56,52	72,09
25	57,23	73,00
26	57,88	73,82
27	58,55	74,69
28	59,26	75,59
29	60,03	76,56
30	60,59	77,28
31	61,15	78,00
32	61,70	78,70
33	62,25	79,40
34	62,81	80,11
35	63,21	80,63
36	63,68	81,22
37	63,98	81,60
38	64,26	81,97
39	64,62	82,42
40	65,05	82,55
41	65,12	82,81
42	65,52	82,97
43	66,14	83,82

Tabla 43. Extracción diaria de cobre, columna 2.

Columna 2		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	9,72	11,44
5	19,25	22,65
6	25,69	30,24
7	30,11	35,44
8	33,88	39,87
9	37,32	43,93
10	40,03	47,12
11	42,59	50,13
12	44,28	52,12
13	45,81	53,92
14	47,24	55,61
15	48,51	57,10
16	49,65	58,44
17	50,53	59,47
18	51,21	60,27
19	51,64	60,78
20	51,94	61,13
21	52,22	61,46
22	52,48	61,76
23	53,29	62,73
24	54,09	63,66
25	54,76	64,45
26	55,34	65,14
27	55,88	65,77
28	56,59	66,61
29	57,32	67,47
30	57,88	68,12
31	57,91	68,23
32	58,09	68,59
33	58,51	68,86
34	59,05	69,50
35	59,57	70,12
36	60,10	70,74
37	60,50	71,21

Tabla 44. Extracción diaria de cobre, columna 3.

Columna 3		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	24,09	30,90
4	31,12	39,91
5	34,97	44,84
6	37,27	47,79
7	39,04	50,06
8	40,18	51,53
9	41,36	53,04
10	42,33	54,29
11	42,33	54,29
12	43,30	55,53
13	44,28	56,78
14	45,34	58,14
15	46,10	59,12
16	46,64	59,81
17	47,29	60,64
18	47,81	61,31
19	48,32	61,96
20	48,75	62,51
21	49,21	63,11
22	49,60	63,61
23	50,42	64,65
24	51,23	65,69
25	52,01	66,69
26	52,57	67,42
27	53,21	68,23
28	53,78	68,97
29	54,34	69,68
30	54,80	70,27
31	55,28	70,89
32	55,53	71,21
33	55,82	71,58
34	56,24	72,12
35	56,67	72,67
36	57,06	73,17
37	57,41	73,62
38	57,71	74,00
39	58,05	74,44
40	58,44	74,93
41	58,82	75,43
42	59,23	75,96
43	59,60	76,43

Tabla 45. Extracción diaria de cobre, columna 4.

Columna 4		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,00	0,00
4	4,03	4,74
5	10,66	12,54
6	18,85	22,19
7	24,35	28,67
8	29,15	34,31
9	33,78	39,76
10	36,66	43,15
11	38,82	45,69
12	40,11	47,20
13	41,43	48,77
14	42,69	50,24
15	43,78	51,53
16	44,52	52,40
17	45,10	53,08
18	45,70	53,79
19	46,33	54,53
20	46,93	55,23
21	47,38	55,77
22	47,73	56,18
23	48,58	57,18
24	49,47	58,23
25	50,24	59,13
26	50,98	60,00
27	51,67	60,82
28	52,54	61,84
29	53,48	62,95
30	54,39	64,02
31	55,15	64,91
32	55,94	65,84
33	56,69	66,72
34	57,37	67,52
35	57,87	68,11

Tabla 46. Extracción diaria de cobre, columna 5.

Columna 5		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	17,71	22,59
4	28,72	36,63
5	35,85	45,73
6	39,74	50,69
7	41,16	52,50
8	42,40	54,08
9	43,31	55,24
10	44,07	56,21
11	44,63	56,92
12	45,21	57,67
13	45,67	58,25
14	46,01	58,68
15	46,44	59,23
16	46,99	59,94
17	47,52	60,62
18	48,06	61,30
19	48,55	61,93
20	49,02	62,53
21	49,42	63,03
22	49,77	63,48
23	50,62	64,56
24	51,46	65,64
25	52,41	66,85
26	53,11	67,74
27	53,89	68,73
28	54,64	69,70
29	55,26	70,49
30	55,87	71,26
31	56,51	72,08
32	57,21	72,97
33	57,79	73,71
34	58,40	74,48
35	58,90	75,12
36	59,43	75,80
37	59,86	76,36
38	60,29	76,90
39	60,48	77,14
40	60,75	77,48
41	61,12	77,96
42	61,57	78,53
43	61,91	78,96

Tabla 47. Extracción diaria de cobre, columna 6.

Columna 6		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	18,79	23,96
4	30,02	38,30
5	36,31	46,31
6	40,64	51,84
7	43,35	55,29
8	45,17	57,62
9	46,59	59,43
10	47,94	61,15
11	48,99	62,49
12	50,11	63,91
13	50,98	65,02
14	51,84	66,12
15	52,46	66,91
16	53,25	67,92
17	54,05	68,94
18	54,81	69,91
19	55,50	70,79
20	56,20	71,68
21	56,81	72,46
22	57,37	73,17
23	57,47	73,30
24	57,47	73,31
25	57,67	73,55
26	57,88	73,82
27	58,11	74,11
28	58,28	74,33
29	58,48	74,59
30	58,61	74,76
31	58,75	74,93
32	59,04	75,31
33	59,27	75,60
34	59,48	75,86
35	59,66	76,09
36	59,85	76,35
37	60,05	76,59
38	60,26	76,86
39	60,40	77,04
40	60,51	77,18
41	60,65	77,36
42	60,79	77,54
43	60,92	77,70

Tabla 48. Extracción diaria de cobre, columna 7.

Columna 7		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	10,06	12,84
4	24,54	31,30
5	32,65	41,64
6	39,27	50,09
7	43,21	55,12
8	45,65	58,22
9	46,83	59,73
10	47,84	61,01
11	48,44	61,79
12	48,94	62,42
13	49,36	62,97
14	49,68	63,36
15	50,22	64,05
16	50,76	64,75
17	51,34	65,48
18	51,83	66,11
19	52,27	66,67
20	52,74	67,27
21	53,23	67,90
22	53,61	68,38
23	54,53	69,56
24	55,47	70,75
25	56,23	71,72
26	56,91	72,58
27	57,61	73,48
28	58,37	74,45
29	59,00	75,25
30	59,57	75,98
31	60,13	76,70
32	60,75	77,49
33	61,20	78,06
34	61,67	78,65
35	62,13	79,25
36	62,53	79,76
37	62,92	80,25
38	63,34	80,79
39	63,54	81,04
40	63,79	81,37
41	64,10	81,77
42	64,44	82,20
43	64,74	82,58

Tabla 49. Extracción diaria de cobre, columna 8.

Columna 8		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	23,21	28,93
4	32,69	40,77
5	38,29	47,75
6	41,48	51,72
7	44,18	55,09
8	46,35	57,79
9	48,00	59,85
10	49,11	61,23
11	49,11	61,23
12	49,95	62,28
13	50,80	63,35
14	51,90	64,71
15	52,18	65,07
16	52,69	65,70
17	53,26	66,41
18	53,77	67,04
19	54,23	67,62
20	54,63	68,12
21	55,04	68,64
22	55,32	69,09
23	55,60	69,60
24	55,98	69,80
25	56,10	70,04
26	56,22	70,10
27	57,05	71,14
28	57,83	72,11
29	58,39	72,81
30	58,99	73,56
31	59,56	74,27
32	60,05	76,59
33	60,26	76,86
34	60,40	77,04
35	60,67	77,18
36	60,95	77,36
37	61,04	77,89
38	61,28	77,99
39	61,56	78,00
40	61,79	77,54
41	62,17	77,70
42	62,60	78,20
43	62,93	79,00

Tabla 50. Extracción diaria de cobre, columna 9.

Columna 9		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	23,21	28,93
4	32,69	40,77
5	38,29	47,75
6	41,48	51,72
7	44,18	55,09
8	46,35	57,79
9	48,00	59,85
10	49,11	61,23
11	49,11	61,23
12	49,95	62,28
13	50,80	63,35
14	51,90	64,71
15	52,18	65,07
16	52,69	65,70
17	53,26	66,41
18	53,77	67,04
19	54,23	67,62
20	54,63	68,12
21	55,04	68,64
22	55,42	69,11
23	56,22	70,10
24	57,05	71,14
25	57,83	72,11
26	58,39	72,81
27	58,99	73,56
28	59,56	74,27
29	60,02	74,83
30	60,47	75,41
31	60,97	76,03
32	61,24	76,36
33	61,50	76,69
34	61,88	77,16
35	62,25	77,62
36	62,56	78,00
37	62,85	78,36
38	63,09	78,66
39	63,41	79,07
40	63,79	79,54
41	64,17	80,01
42	64,59	80,54
43	64,93	80,97

Tabla 51. Extracción diaria de cobre, columna 10.

Columna 10		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	10,57	13,27
4	16,58	20,82
5	21,70	27,25
6	24,50	30,77
7	26,75	33,59
8	29,00	36,42
9	30,95	38,86
10	32,51	40,83
11	34,33	43,11
12	36,08	45,31
13	38,26	48,04
14	40,06	50,30
15	41,01	51,50
16	42,00	52,74
17	42,76	53,70
18	43,43	54,54
19	43,95	55,19
20	44,42	55,78
21	45,07	56,59
22	45,68	57,36
23	46,28	58,12
24	46,94	58,95
25	47,67	59,86
26	48,25	60,59
27	48,74	61,21
28	49,28	61,89
29	49,70	62,42
30	50,14	62,97
31	50,55	63,48
32	51,02	64,07
33	51,37	64,51
34	51,77	65,01
35	52,14	65,48
36	52,49	65,92
37	53,00	66,55
38	53,50	67,19
39	53,98	67,79
40	54,44	68,37
41	54,83	68,85
42	55,07	69,15
43	64,93	80,97

Tabla 52. Extracción diaria de cobre, columna 11.

Columna 11		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	27,76	33,12
4	37,26	44,46
5	41,17	49,13
6	43,55	51,97
7	44,93	53,61
8	46,15	55,07
9	47,18	56,30
10	48,14	57,44
11	48,14	57,44
12	49,03	58,51
13	49,80	59,42
14	50,56	60,33
15	51,29	61,20
16	51,97	62,01
17	52,59	62,75
18	53,17	63,45
19	53,76	64,15
20	54,36	64,86
21	54,92	65,53
22	55,41	66,12
23	55,97	66,79
24	56,44	67,34
25	56,92	67,91
26	57,28	68,35
27	57,69	68,83
28	58,16	69,40
29	58,61	69,94
30	59,07	70,49
31	59,46	70,95
32	59,88	71,45
33	60,19	71,82
34	60,53	72,23
35	60,86	72,61
36	61,18	73,00
37	61,51	73,39
38	61,82	73,77
39	62,19	74,20
40	62,51	74,58
41	62,83	74,96
42	63,12	75,31
43	63,40	75,66

Tabla 53. Extracción diaria de cobre, columna 12.

Columna 12		
Día	Extraccion (%)	
	Cu total	Cu soluble
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	32,68	38,99
4	40,98	48,90
5	43,88	52,36
6	45,88	54,74
7	47,31	56,45
8	48,64	58,04
9	49,82	59,44
10	50,72	60,52
11	50,72	60,52
12	51,77	61,77
13	52,64	62,80
14	53,43	63,76
15	54,26	64,74
16	55,01	65,64
17	55,69	66,45
18	56,38	67,27
19	57,00	68,01
20	57,58	68,70
21	58,14	69,37
22	58,58	69,90
23	59,10	70,52
24	59,59	71,11
25	60,15	71,77
26	60,57	72,27
27	61,00	72,78
28	61,45	73,33
29	61,91	73,87
30	62,39	74,45
31	62,79	74,92
32	63,22	75,44
33	63,60	75,89
34	64,01	76,38
35	64,44	76,89
36	64,83	77,35
37	65,28	77,89
38	65,73	78,42
39	66,22	79,02
40	66,66	79,54
41	67,16	80,01
42	67,89	80,48
43	68,97	81,30

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

Título: Pruebas de lixiviación en columnas de mineral oxidado Doña Elba, Compañía Minera las Cenizas, Taltal.
Nombre Memorista: Julio Antonio Bertoni Jara

Modalidad		Profesor(es) Patrocinante(s)
Concepto		
Calificación		
Fecha		
Prof.ª Eugenia Araneda H.		Prof. Fernando Parada Luna
		Ingeniero Supervisor: Jorge Vargas Ordenes
		Institución: Compañía Minera las Cenizas, Taltal

Comisión (Nombre y Firma)	
Prof.ª Eugenia Araneda H.	Prof.ª María Cristina Ruiz P.

Resumen
<p>La Planta de óxidos de Compañía Minera Las Cenizas procesa minerales oxidados de cobre provenientes de la mina Barreal Seco; éste ya está llegando a su tonelaje máximo de extracción, es por esto que procesará mineral del yacimiento Doña Elba. Esta investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento de dicho mineral en la etapa de lixiviación mediante pruebas en columnas y encontrar una alternativa viable de procesarlo.</p> <p>El trabajo consideró la realización de pruebas de curado y de lixiviación iso-pH en botellas. Luego de esto se realizaron ensayos de lixiviación en columnas con diferentes dosificaciones de ácido en la etapa de aglomerado, pruebas con mezcla de mineral, variando el orden de las soluciones lixiviantes (ILS-Refino), solución de riego con mayor acidez y ensayos con diferentes granulometrías.</p> <p>La prueba de sulfatación o curado tuvo como objetivo determinar la dosificación ideal de ácido en la etapa de aglomerado para el mineral Elba. Los resultados obtenidos indican que la dosificación ideal de 25 kg/t. La prueba de lixiviación iso-pH se realizó con el objetivo de determinar el máximo consumo de ácido y la máxima recuperación de cobre para el mineral Elba. Los resultados obtenidos fueron una recuperación de 84,0% y un consumo de ácido total de 88,8 kg/ton.</p> <p>Se realizaron 12 pruebas en columnas, de las cuales el mejor resultado en cuanto a recuperación de CuT se obtuvo en la columna 12 con 68,97% y un consumo de ácido de 46,17 kg/ton, con condiciones de granulometría ajustada a un P80 -1/4 de pulgada, 22 kg/ton de ácido en aglomerado y riego con refino. En cuanto a consumo de ácido total, la columna 9 destacó con 30,85 kg/ton y una recuperación de CuT de 64,93% siendo la prueba con 30% mineral Elba y 70% mineral Dominio proveniente de la mina Barreal Seco.</p> <p>Si bien se logró obtener resultados interesantes relacionados a la recuperación de cobre y el consumo de ácido, no se llegó a una condición operacional óptima y es por esto que en el presente proyecto se insta a seguir con pruebas de este tipo, con nuevas configuraciones.</p>

