

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO EN EL
PAD DE LIXIVIACIÓN DE LA UNIDAD
CUAJONE – SOUTHERN PERÚ**

TESIS

Presentada por:

Bach. Elvis Rolando Laura Quispe

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

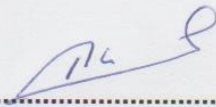
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales


**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO EN
EL PAD DE LIXIVIACIÓN DE LA UNIDAD
CUAJONE – SOUTHERN PERÚ**

Tesis sustentada y aprobada el 26 de octubre de 2018, estando
integrado el Jurado Calificador por:

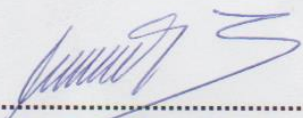
PRESIDENTE


:.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

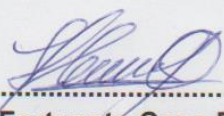
SECRETARIO


:.....
MSc. Matías Carlos Vivar Colquicocha

VOCAL


:.....
Mgr. Raúl Del Pozo Tello

ASESOR


:.....
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar a este momento. Por cuidarme y estar a mi lado en todos los momentos, por su infinita bondad, amor.

A mi familia, por todo su amor, sacrificio y apoyo que ofrecen por ser mi motivación para vencer todos los obstáculos y seguir adelante, aun en los peores momentos.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi reconocimiento y gratitud a Dios y a mi asesor Dr. Luis Fortunato Caso Palpa, por su valiosa orientación y colaboración en el presente trabajo de tesis.

A mis padres, que sin su apoyo no hubiese logrado mis metas.

A todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por sus enseñanzas los que contribuyeron a mi formación académica. Un reconocimiento especial al ingeniero Walter Salas Alarcón por sus valiosas sugerencias las que contribuyeron para culminar exitosamente el presente trabajo.

CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE FIGURA	iv
ÍNDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 Descripción del problema	3
1.1.1 Antecedentes del problema	3
1.1.2 Problemática de la investigación	5
1.2 Formulación del problema	6
1.3 Justificación e importancia	6
1.4 Alcances y limitaciones	7
1.5 Objetivos	8
1.5.1 Objetivo general	8
1.5.2 Objetivos específicos	8
1.6 Hipótesis	8
1.6.1 Hipótesis general	8

1.6.2 Hipótesis específicos	9
CAPÍTULO II	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1 Antecedentes del estudio	10
2.2 Bases teóricas	12
2.2.1 Conceptos de lixiviación	12
2.2.2 Métodos de lixiviación	13
2.2.2.1 Lixiviación in situ	13
2.2.2.2 Lixiviación en bateas	14
2.2.2.3 Lixiviación en botaderos	16
2.2.2.4 Lixiviación en pilas	17
2.2.3 Condiciones óptimas para la lixiviación de cobre	18
2.2.4 Ganga de minerales	20
2.2.5 La escala de pH	21
2.2.6 Proceso químico de la lixiviación	22
2.2.6.1 Cinética de lixiviación: Modelo del núcleo sin reaccionar	25
2.2.7 Etapas del proceso de lixiviación en pilas	28
2.2.7.1 Chancado	28
2.2.7.2 Aglomeración y curado	30
2.2.7.3 Lixiviación	32
2.2.7.4 Extracción por solventes SX	33
2.2.7.5 Electrodeposición EW	34

2.2.8 Factores que afectan al proceso de lixiviación en pilas	34
2.2.8.1 Granulometría y permeabilidad del mineral	35
2.2.8.2 Tasa de riego	37
2.2.8.3 Sistema de apilamiento del mineral aglomerado	40
2.2.8.4 Altura de la pila	41
2.2.8.5 Tiempo de lixiviación	42
2.2.8.6 Concentración de ácido en solución de riego	44
2.2.8.7 Hierro presente en el mineral	45
2.2.9 Sistemas de riego	46
2.2.9.1 Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU)	46
2.2.9.2 Distribución de uniformidad (DU)	48
2.2.9.3 Por goteo	48
2.2.9.4 Por aspersión	50
2.2.9.5 Tuberías de colección y drenaje	51
2.2.9.6 Consecuencias de un mal drenaje	52
2.3 Definición de términos	52
CAPÍTULO III	53
MARCO METODOLÓGICO	53
3.1 Tipo y diseño de la investigación	53
3.2 Operacionalización de variables	53
3.3 Procesamiento y análisis de datos	55
3.3.1 Proceso de chancado, aglomeración y transporte	55
3.3.1.1 Proceso de chancado	55

3.3.1.2	Proceso de aglomeración y carguío	58
3.3.2	Proceso de lixiviación y manejo de PLS	60
3.3.2.1	Proceso de lixiviación	60
3.3.3	Ciclo de lixiviación de cobre en Cuajone	61
3.3.3.1	Construcción del módulo	63
3.3.2.4	Instalación del sistema de riego	67
3.3.2.5	Manejo del PLS	68
3.3.2.6	Equipos asociados a la lixiviación y manejo de PLS	70
CAPÍTULO IV		72
RESULTADOS		72
4.1	Resultados	72
4.1.1	Optimización del sistema de riego.	72
4.1.1.1	Diferencias entre sistemas de riego por goteo y por aspersión	72
4.1.1.2	Sistema de riego por goteros	73
4.1.1.3	Sistema de riego por aspersión	74
4.1.1.4	Comparación del diseño de riego por goteo y aspersión	75
4.1.1.5	Selección del diseño de riego	76
4.1.1.6	Calculo de área de riego por cada aspersor	82
4.1.1.7	Sistema de drenaje para el PLS	85
CONCLUSIONES		86
RECOMENDACIONES		87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		88

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Exportaciones mineras metálicas	12
Figura 2. Lixiviación en bateas	16
Figura 3. Lixiviación en pilas	18
Figura 4. Condiciones necesarias para la lixiviación de cobre	20
Figura 5. Esquematización de las etapas de lixiviación de una partícula de mineral oxidada y sulfurada de cobre	24
Figura 6. Procesos fisicoquímicos que ocurren en la superficie de una partícula	25
Figura 7. Tiempo de lixiviación	27
Figura 8. Diagrama de ingresos y salidas en un tambor aglomerador	32
Figura 9. Variación de la granulometría del material apilado por acción de la lixiviación para dos distribuciones granulométricas	37
Figura 10. Esquema de segregación de partículas gruesas y finas debido	39
Figura 11. Estudio sobre el efecto de la tasa de riego en medio parcialmente saturado. La figura a la derecha se muestra que la succión del material fino es mayor para flujos menores a la conductividad hidráulica	40
Figura 12. Compactación del mineral apilado para una altura de (a) 3 metros baja la superficie y (b) 9 metros bajo la superficie	42
Figura 13. Ingresos y costos marginales en función del tiempo de lixiviación	44
Figura 14. Módulos de riego por goteo	49
Figura 15. Riego por aspersión	51

Figura 16. Planta de chancado	57
Figura 17. Tambor aglomerador	59
Figura 18. Lixiviación de cobre por aspersion	61
Figura 19. Tiempo de lixiviación	62
Figura 20. Preparación del PAD	64
Figura 21. Apilamiento del mineral	65
Figura 22. Instalación de líneas de riego	67
Figura 23. Poza de PLS	69
Figura 24. Aspersores	71
Figura 25. Cono sin riego según permeabilidad	73
Figura 26. Obstrucción de goteros en lixiviación	74
Figura 27. Comparación del diseño de riego por goteo y aspersion	75
Figura 28. Comparación gotero y aspersion	75
Figura 29. Diseño de riego rectangular	77
Figura 30. Diseño de sistema de riego rómbica	78
Figura 31. Áreas de riego en forma rómbica y cuadrada	79
Figura 32. Esquema de cantidad de solución aplicada a varios intervalos, así como el radio de alcance	79
Figura 33. Aplicación de riego en 3D	80
Figura 34. Diseño de aspersores para ordenar mejor los parámetros	81
Figura 35. Diseño de riego para mejorar los parámetros	82
Figura 36. Distancia entre cada aspersor	84
Figura 37. Recolección de PLS	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. pH de algunas soluciones	22
Tabla 2. Identificación de variables	53
Tabla 3. Factores en la construcción de módulos	66
Tabla 4. Factores en el sistema de riego	68
Tabla 5. Características del aspersor	71
Tabla 6. Caudales	82

RESUMEN

El propósito de este trabajo es optimizar el sistema de riego en lixiviación en pilas, evaluando las principales variables o parámetros de operación como la tasa de riego y concentración de ácido sulfúrico; así como el diseño de riego por aspersión, para una recuperación eficaz del PLS. La investigación se efectuó en la unidad minera Cuajone de Southern Perú, ubicado en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, en el departamento de Moquegua. La lixiviación en pilas comprende la operación de chancado del mineral extraído de la mina, para que el tamaño de partícula del mineral esté expuesto en toda su superficie a la solución lixivante; así como el proceso de aglomerado-curado que consiste básicamente en mejorar las condiciones de flujo dentro de la pila, ya que la aglomeración contribuye en contener los finos dentro de los glómeros, ayudando a evitar que éstos afecten el drenaje de la pila. En este proceso comienza la reacción química entre el mineral y el ácido sulfúrico con la sulfatación de cobre, aumentando la velocidad de lixiviación.

La instalación del sistema de riego en pilas de lixiviación, es un punto clave para el éxito de éste proceso, ya que, debe tenerse en cuenta la

necesidad de que la solución se distribuya uniformemente sobre toda la superficie de la pila.

La optimización del sistema de riego en lixiviación en pilas está relacionado con factores como: irrigación, estabilidad de la pila y drenaje. Y por lo tanto es necesario seleccionar un buen diseño de riego para lograr un mojado uniforme y completo del mineral a través de la percolación continua de la solución lixivante entre las partículas del mineral.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los procesos hidrometalúrgicos desempeñan un papel importante en la metalurgia extractiva en forma creciente. Su aplicación ofrece ventajas considerables frente a los métodos tradicionales de flotación y procesos pirometalúrgicos, entre los que podemos mencionar la ausencia de contaminación ambiental, es aplicable a menas pobres, tiene un bajo costo de operación, no exige transportes complicados de mineral, se requiere menor costo de inversión y fácil control en los procesos y operaciones.

Los procesos hidrometalúrgicos han sufrido un gran desarrollo con la incorporación de tecnologías de lixiviación en botaderos, en pilas e in situ para minerales de cobre. Además se prevé el desarrollo de la lixiviación de concentrados de cobre como la próxima etapa a consolidar. Esto se ha debido principalmente al desarrollo comercial del proceso SX EW desde el año 1968. Los procesos hidrometalúrgicos involucran soluciones acuosas en las cuales los valores metálicos son lixiviados a partir de minerales, y luego precipitados como metales, después que las soluciones hayan sido purificadas.

Las etapas directamente concernientes a la separación del metal valioso de los otros metales y de las impurezas del mineral tienen que ver además con procesos de óxido-reducción. La físico-química está relacionada a la interacción entre soluciones y los sólidos. Las reacciones químicas que se efectúan en los procesos hidrometalúrgicos están gobernadas por dos factores:

- Factores termodinámicos, donde se consideran las condiciones de equilibrio y marcha del equilibrio a partir de las condiciones del proceso. Los factores termodinámicos son utilizados para predecir cómo va a cambiar el equilibrio de un sistema cuando se varía la temperatura, presión, pH, concentración, etc.
- Factores cinéticos, donde se considera la velocidad de reacción y los mecanismos de la reacción, mediante los cuales la solución y los sólidos se acercan al equilibrio. Son los que determinan, si se puede efectuar, las reacciones, particularmente de la lixiviación, aun cuando sean posibles o favorables desde el punto de vista termodinámico. La lixiviación y precipitación involucran reacciones heterogéneas, las cuales ocurren en la fase sólido-líquido. La velocidad de reacción depende del tamaño de las partículas, concentración, temperatura y grado de agitación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

La lixiviación en pilas es ampliamente utilizada en la gran minería para la recuperación de cobre desde minerales oxidados, se sabe que un incremento en la tasa de riego, la concentración de ácido en las soluciones y tamaño de partícula, impulsa una mayor recuperación de cobre y también mejora la cinética de lixiviación. Sin embargo produce un elevado consumo de la solución lixiviante. Al momento de diseñar un proceso de lixiviación en pilas se deben realizar diversos estudios, ya sea mediante simulaciones y/o pruebas de laboratorio que permiten determinar factores de operación para optimización del proceso.

1.1.1 Antecedentes del problema

La presente investigación, se enfoca principalmente en la línea productiva correspondiente a los minerales oxidados de cobre, donde el

principal proceso realizado es la lixiviación. En esta sección se describen los antecedentes del proceso de lixiviación en pilas, los cuales permitirán estudiar los posibles efectos que producirían las modificaciones a implementar, en los circuitos y ciclos de lixiviación, sobre la velocidad de lixiviación y recuperación de cobre.

El proceso de lixiviación está dentro de los procesos hidrometalúrgicos, que representan cerca del 20 % de la producción mundial de cobre. (King, Davenport, Schlesinger, & Biswas, 2011). La mayor parte de los avances en el campo de la lixiviación de minerales han ocurrido en los últimos 40 años, siendo fundamental el desarrollo de las tecnologías de extracción por solvente y electro-obtención (SX-EW por sus siglas en inglés), tecnologías que permitieron generar nuevas expectativas para la recuperación del cobre a nivel comercial.

Debido al agotamiento natural de los yacimientos de óxidos de cobre, uno de los principales desafíos que enfrentan hoy en día los procesos hidrometalúrgicos está en hacer económicamente viable su utilización para sulfuros de cobre, en particular para la calcopirita donde la cinética de disolución del cobre es mucho más lenta que para los minerales oxidados. La lixiviación en pila es uno de los métodos más utilizados dentro

de la hidrometalurgia, siendo los bajos costos de operación una de las principales razones de su masivo uso, teniendo el consumo de ácido entre los costos de operación más relevante.

En orden de optimizar la recuperación de cobre en pilas de lixiviación, el diseño de éstas debe lidiar con la compatibilización de tres aspectos esenciales, estos son: irrigación, estabilidad de pila y drenaje, a fin de tener una irrigación capaz de abarcar la mayor superficie posible sin que con ellos afecte la estabilidad de la pila y con un drenaje tal que evite que la solución se estanque en la base de la pila.

1.1.2 Problemática de la investigación

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua. Este proceso se basa en que los minerales oxidados son sensibles al ataque de soluciones ácidas. Los minerales de cobre en sus diferentes menas, se encuentran en la naturaleza asociados entre sí y con otras especies mineralógicas, más o menos diseminadas dentro de una roca matriz con la ganga correspondiente. Para el desarrollo de un proyecto de lixiviación es necesario un conocimiento de las

características del yacimiento y de la mena, y los factores que influyen en la lixiviación. Como tamaño de partícula, altura de la pila, tasa de riego, concentración de ácido y el tiempo de lixiviación.

1.2 Formulación del problema

¿En qué medida se puede optimizar el sistema de riego de los Pad de lixiviación en la recuperación del PLS de la UP Cuajone?

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico y tal fundamento básico, es usar soluciones para disolver el mineral valioso deseado, este se caracteriza por ser un sistema sólido-líquido. Para aplicar los procesos hidrometalúrgicos, el metal valioso debe ser soluble en el disolvente, las gangas deben ser insolubles y el metal valioso que ha pasado a solución debe ser económicamente recuperable.

1.3 Justificación e importancia

El proceso de LIX/SX/EW ha permitido explotar yacimientos que hace un tiempo atrás eran económicamente marginales. Los más grandes productores de cobre electro obtenido (EW) en el Perú son las compañías mineras, Southern Peru Cooper y la Sociedad Minera Cerro Verde, a partir

de sulfuros secundarios de cobre y minerales mixtos de cobre. Sin embargo aún hay pocas plantas de extracción por solventes (SX) y electro obtención (EW) en el Perú, considerando el gran potencial cuprífero y los altos precios de los metales.

Por tal motivo, el presente trabajo pretende incentivar el empleo de estos procesos para recuperar cobre y dar mayor valor agregado a nuestros minerales y desarrollar nuestra industria minero-metalúrgica. Asimismo motivar el cambio de las políticas encaminadas al desarrollo de la industria minera-metalúrgica para la producción de cátodos de cobre y dejar de ser solo comercializadores de concentrados de cobre como hasta ahora.

1.4 Alcances y limitaciones

Para el presente trabajo se ha recopilado información de estudios de investigación así como textos, la investigación se ha desarrollado en la planta de chancado, aglomeración y lixiviación en pilas, en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, en la región Moquegua, empleando programa de simulación de flujos para aspersores.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Optimizar el procedimiento del sistema de riego en el Pad de lixiviación de la unidad minera CUAJONE – SOUTHERN PERÚ.

1.5.2 Objetivos específicos

- Estudiar mejores condiciones operacionales del proceso de lixiviación en pilas.
- Evaluar los métodos de irrigación en lixiviación en pilas e instalación del sistema de riego por aspersión y por goteo.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

Optimizando el sistema de riego en el Pad de lixiviación mejorará la recuperación de cobre en el PLS.

1.6.2 Hipótesis específicos

- El estudio de las mejores condiciones operacionales del proceso de lixiviación en pilas permitirá mayor eficiencia de riego.
- La evaluación de métodos de riego en lixiviación en pilas, permitirá optimizar el sistema de riego.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio

El proceso de lixiviación en pilas se empleó por primera vez en la extracción del cobre a mediados del siglo XVIII a partir de los minerales oxidados de yacimientos pórfidos. La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que corresponde a una etapa de disolución selectiva de los metales, presentes en las especies mineralógicas de cualquier naturaleza, desde los sólidos que los contienen mediante una solución disolvente acuosa, esto significa que, con la ayuda del agua como medio de transporte, se usan químicos específicos para separar los minerales valiosos (y solubles en dichos líquidos) de los no valiosos. (Domic, 2001).

2.1.1 Ubicación

La unidad productiva de Cuajone se ubica en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua Perú, cuyas

instalaciones se distribuyen en plataformas que van desde 2 600 a 3 500 m de altitud.

La UP de Cuajone tiene una vía asfaltada de 33 km que une con la ciudad de Moquegua y a 25 km de UP Toquepala. Y la distancia total que separa con el Puerto de Ilo es de 135 km de tránsito carretero por la vía binacional.

2.1.2 Producción de cobre en el Perú

El Perú es el segundo productor del cobre a nivel mundial con 2,44 millones de toneladas métricas en el año 2017. La minería es muy importante en el desarrollo económico de nuestro país. En la figura 1, se muestra las exportaciones mineras.

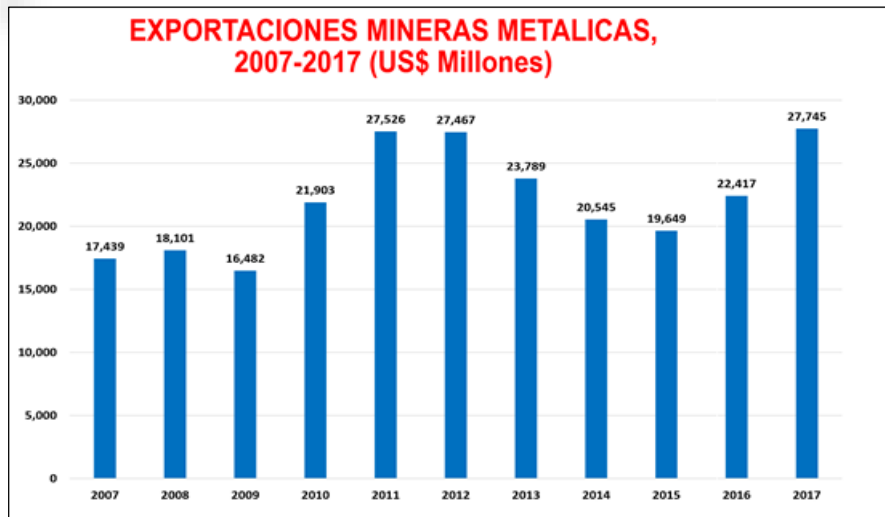


Figura 1. Exportaciones mineras metálicas
Fuente: BCRP

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Conceptos de lixiviación

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua. Este proceso se basa en que los minerales oxidados son sensibles al ataque de soluciones ácidas. Para realizar el proceso de lixiviación se requiere disponer de un patio, o superficie de apoyo de la pila, en la que se coloca la impermeabilización. Cuando el patio es recuperado para reutilizarlo con nuevo material se trata de lixiviación de pilas dinámicas. Si el patio no es recuperado y el mineral agotado queda

en la pila como vertedero que se restaura, se trata de lixiviación de pilas permanentes. Una vez preparado el mineral, se coloca en montones de sección trapezoidal y altura calculada (pilas) para proceder a su riego con una solución preparada. Tras percolar la solución a través de toda la pila, se recolectan los líquidos enriquecidos que se llevan a la planta de SX – EW (Schmidt, 2001).

2.2.2 Métodos de lixiviación

2.2.2.1 Lixiviación in situ

La lixiviación in situ se refiere a la aplicación de soluciones directamente a un cuerpo mineralizado, dependiendo de la zona a lixiviar, que puede ser subterránea o superficial.

Hay algunas operaciones donde se está lixiviando materiales residuales en minas ya trabajadas por el método de hundimiento por bloques. El material ya fragmentado, producto de la explotación de la mina presenta buenas características de percolación. La aplicación de solución es similar a la usada en botaderos por aspersores o goteros en la superficie de la zona hundida. La colección de la solución emplea el sistema de

drenaje subterráneo existente, dirigiéndolo hacia un pozo apropiado, desde donde se bombea a la superficie para su tratamiento. Una variación de este método se presenta en aquellas minas donde el contenido de cobre de las aguas de mina naturales es suficientemente significativo para su recuperación económica. Para aumentar la recuperación y/o velocidad de extracción se riega solución ácida adicional sobre la superficie de la mina.

2.2.2.2 Lixiviación en bateas

Esta técnica consiste en contactar un lecho de mineral con una solución acuosa que percola e inunda la batea o estanque. Los minerales a tratar por este método deben presentar contenidos metálicos altos o muy altos, debiendo ser posible lixiviar el mineral en un período razonable (3 a 14 días) y en trozos de tamaño medio con tonelajes suficientes de mineral percolable en el yacimiento que permitan amortizar la mayor inversión inicial que requiere este tipo de proceso (Bustamante, 2015).

Fue uno de los primeros procesos de lixiviación desarrollados para suministrar soluciones para electro obtención directa, en la mayoría de los casos, a partir de minerales de alta ley de cobre. Las plantas actuales son antiguas y es poco probable su aplicación en nuevos proyectos, ahora que

la SX es una práctica estándar. Las bateas se cargan normalmente con mineral chancado a una granulometría fina. En la figura 2, se muestra la lixiviación en bateas.

Ventajas y desventajas:

- Operación flexible
- Soluciones ricas de alta concentración
- Presenta alta eficiencia de lavado
- Requiere menor volumen de agua que la agitación por toneladas de mena.
- Existencias de reacciones laterales no deseables
- Mayores dificultades de automatización
- Costos apreciables de manejo de mena y rípios
- Mayor mano de obra para mantención, reparación e inspecciones
- Requiere de mayor superficie e infraestructura



Figura 2. Lixiviación en bateas
Fuente: Bustamante, 2015

2.2.2.3 Lixiviación en botaderos

Esta técnica consiste en lixiviar lastres, desmontes o sobrecarga de minas de tajo abierto, los que debido a sus bajas leyes (por ejm. $< 0,4 \%$ Cu) no pueden ser tratados por métodos convencionales. Este material, generalmente al tamaño "*run of mine*" es depositado sobre superficies poco permeables y las soluciones percolan a través del lecho por gravedad. Normalmente, son de grandes dimensiones, se requiere de poca inversión

y es económico de operar, pero la recuperación es baja (por ejm. 40-60 % Cu) y necesita tiempos excesivos para extraer todo el metal.

La lixiviación en botaderos, es el tratamiento de minerales de bajas leyes, conocidos como "estéril mineralizado" y/o ripios de lixiviación. Normalmente la lixiviación en botaderos es una operación de bajo rendimiento (pero también de bajo costo).

2.2.2.4 Lixiviación en pilas

Se basa en la percolación de la solución lixivante a través de un mineral chancado y apilado, el que está formando una pila sobre un terreno previamente impermeabilizado. La pila se riega por aspersion o goteo. Se aplica a minerales de alta ley debido a los costos de operación y transporte. Existen dos tipos de pila según su operación.

- Pila permanente (capas múltiples)
- Pila renovable o reutilizable

Las pilas renovables y permanentes pueden adoptar la configuración de:

Pila unitaria: todo el material depositado pasa por todas las etapas del ciclo de lixiviación, permitiendo una operación más simple y flexible.

Pila dinámica: coexisten materiales que están en diversas etapas del ciclo de tratamiento.



Figura 3. Lixiviación en pilas
Fuente: SPC - Cuajone

2.2.3 Condiciones óptimas para la lixiviación de cobre

Dentro de las principales zonas marcadas en el diagrama mostrado en la figura 4, los diferentes estados químicos del cobre son mostrados como estables. Esto simplemente significa que la forma dada del cobre puede existir en las condiciones de pH y Eh, mostrados en los ejes del

diagrama. Por ejemplo, en un pH de 8,0 el cobre puede existir ya sea como CuO o como Cu(OH)₂ para cualquier Eh entre 0,2 voltios y 0,75 voltios. En un Eh de -0,2 voltios el CuFeS₂ puede existir entre valores de pH de 0,0 y aproximadamente 8,25. El Eh es una medida (en voltios) de la fuerza de oxidación de una reacción particular. El pH es una medida de acidez y está explicada en un posterior principio de operación. En los dos principales minerales de cobre en Cuajone, el cobre existe como CuO y Cu(OH)₂. Para obtener el cobre en un estado en donde se disuelva en la solución de lixiviación, es necesario formar Cu⁺⁺. Del diagrama, el CuO y el Cu(OH)₂ se convierten en Cu⁺⁺ si el pH es disminuido por debajo de 5,4 (encima de un Eh de 0,4). En efecto, esto es exactamente lo que ocurre cuando la adicción de solución de lixiviación disminuye en pH. Cuanto menor sea el valor de pH de 5,4 el CuO y el Cu(OH)₂ llegan a ser menos estables y mayor es el porcentaje de CuO y Cu(OH)₂ que se convierte a Cu⁺⁺. El porcentaje de conversión es el porcentaje de cobre recuperado. El CuCO₃ sigue el mismo proceso general, no mostrado en este diagrama. (Silva, 1999).

En lenguaje práctico, el pH efectivo para la pila de lixiviación está en el rango de 0,5 a 3,0. Y con un Eh por encima de 0,6 voltios para conseguir una lixiviación homogénea sin la formación de acanalamientos.

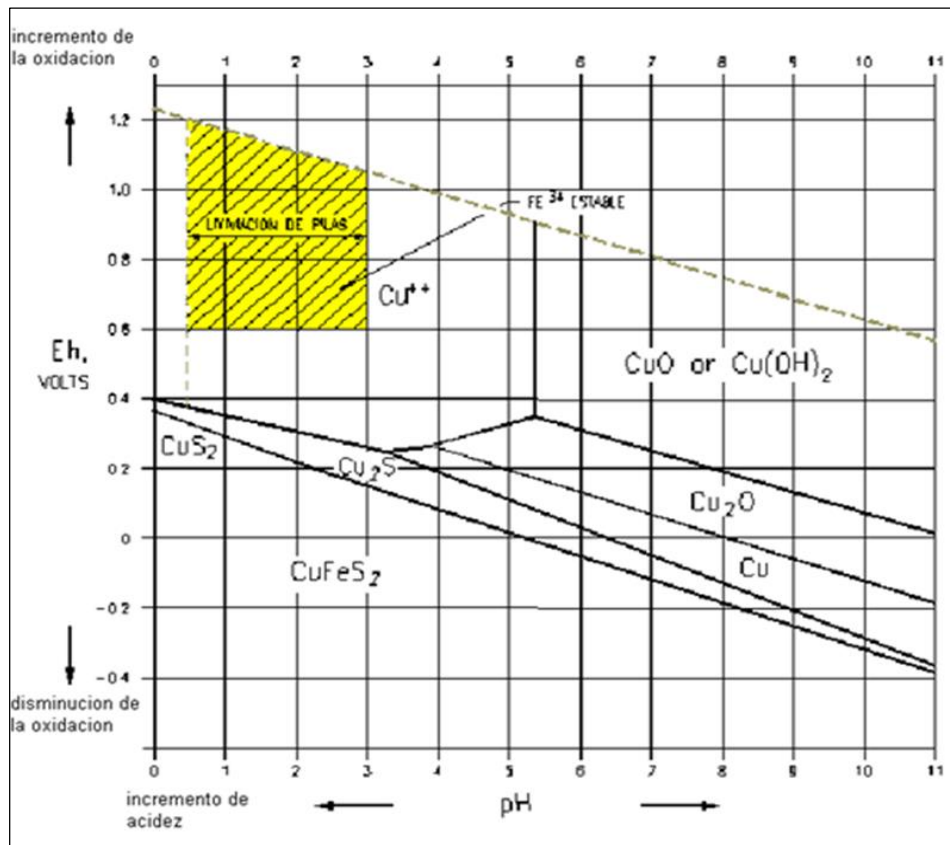


Figura 4. Condiciones necesarias para la lixiviación de cobre
Fuente: Bustamante, 2015

2.2.4 Ganga de minerales

Los minerales de cobre ocupan una pequeña porción del total de volumen de roca en Toquepala y Cuajone. La mayor porción de la roca contiene varios complejos de aluminio – silicatos, que es el desmonte o ganga del mineral. En algunos minerales de cobre, la ganga incluye substanciales cantidades de uno o más minerales de calcio, tales como la

calcita (CaCO_3), que reacciona y consume ácido sulfúrico. Afortunadamente, la mayoría de la ganga de los minerales de Toquepala y Cuajone, son relativamente inertes al ácido sulfúrico, así que la totalidad del consumo de ácido es favorable.

2.2.5 La escala de pH

El pH de una solución expresa su acidez o alcalinidad relativa en una escala de 0 a 14 (ver figura 4). El pH expresa la concentración del ion hidrógeno (H^+). El agua destilada pura tiene un valor de pH de 7, y es considerado como neutral (ni ácido ni alcalino). Los valores de pH que disminuyen de 7 a 0 indican el aumento de acidez, y los valores de pH que aumentan de 7 a 14 indican aumento de alcalinidad. Cada unidad en la escala de pH representa un cambio de 10 por gradiente en la concentración. Por ejemplo, una solución de pH en 1 es 10 veces más ácida que una solución de pH 2. Sin la escala de pH, expresar la concentración de los iones hidrógeno requiere números tales como 0,0 a 0,00000000001 gramos por litro. El conteo de ceros o el uso de una notación científica hacen que el valor de dichos números llegue a ser rápidamente inmanejable. Mientras que la definición de pH parece innecesariamente compleja, usar el pH es bastante simple. Cuando es usado como medida

de acidez sin pensar en su definición formal, el valor del pH llega a ser bastante útil, observe los valores de pH de algunas soluciones y materiales más comunes están listadas a continuación

Tabla 1
pH de algunas soluciones

Soluciones	pH
5 gpl ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) para la lixiviación de cobre	1,0
Jugo gástrico humano (estómago)	1,0 - 3,0
Gaseosas	1,0 - 4,0
Naranjas	2,0 - 4,0
Cerveza	4,0 - 5,0
Plátanos	4,5 - 4,7
Harina de cereales	5,5 - 6,5
Leche de vaca	6,3 - 6,6
Agua potable	6,5 - 8,0
Sangre humana	7,3 - 7,5
Huevos de gallina	7,6 - 8,0
0,1 N bicarbonato de sodio (NaHCO ₃)	8,4
0,1 N cianuro de sodio (NaCN) para lixiviación de oro	11,0
0,1 N hidróxido de sodio (NaOH)	13,0

Fuente: Elaboración propia

2.2.6 Proceso químico de la lixiviación

El proceso de lixiviación en minerales oxidados se basa en que estos son sensibles al ataque de soluciones ácidas, es decir, al tener contacto con la solución ácida, el cobre oxidado presente en la partícula de mineral se disuelve en la solución y sale de la partícula.

En el caso particular del cobre, el agente lixivante mayormente utilizado corresponde al ácido sulfúrico. La ecuación (1) muestra una reacción química que puede presentarse en lixiviación, donde se observa que el cobre es disuelto en la solución como ion Cu^{+2} en un ambiente ácido con pH menor a 5, evitando así que éste precipite.



Las etapas que ocurren en este proceso de solubilización y de acuerdo a la teoría del núcleo sin reaccionar, se pueden enumerar de la siguiente forma y que también puede observarse en la figura 5.

1: Difusión en capa límite: Reactivo lixivante (H^+ , Fe^{+3}) difunde a través de capa límite hacia superficie de la partícula.

2: Difusión interna: Reactivo lixivante difunde en el interior de la partícula hacia la zona de reacción.

3: Reacción Química: Ocurre la reacción química, se forman productos de la reacción.

4: Difusión Interna: Productos solubles de la reacción (Cu^{+2} , Fe^{+2}) difunden en el interior de la partícula hacia la superficie de ésta.

5: Difusión en capa límite: Productos solubles difunden a través de la capa límite hacia el seno de la solución.

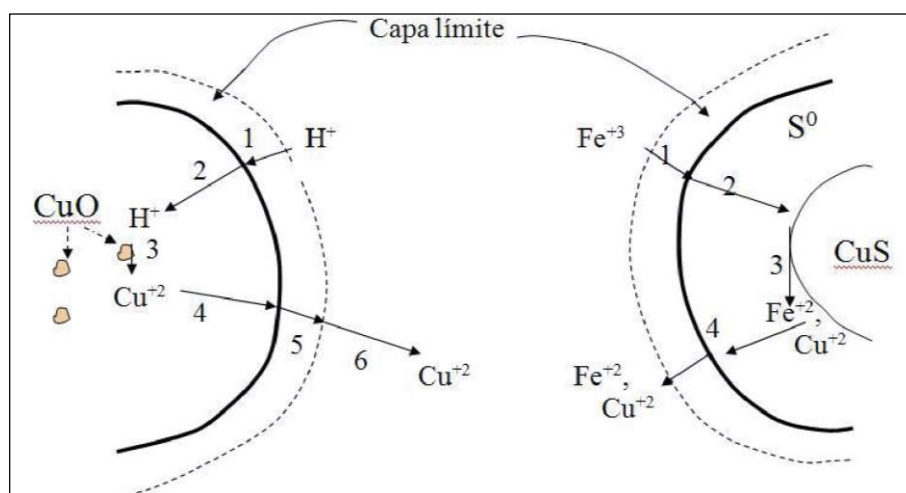


Figura 5. Esquematación de las etapas de lixiviación de una partícula de mineral oxidada y sulfurada de cobre
Fuente: Olivares, 2013

La velocidad de lixiviación es inicialmente alta ya que el reactivo reacciona directamente a las especies de cobre presentes en la superficie de la partícula. Con el tiempo, la velocidad de lixiviación decae porque la superficie de reacción está cada vez más alejada de la superficie de la partícula y entonces los reactivos y productos toman más tiempo en desplazarse al interior de la partícula.

La cinética de las reacciones están fundamentalmente en función de la concentración del agente lixivante y de la temperatura (caracterizadas

por la energía de activación). La figura 6, muestra los procesos de solubilización antes mencionados y que ocurren en la superficie de una partícula.

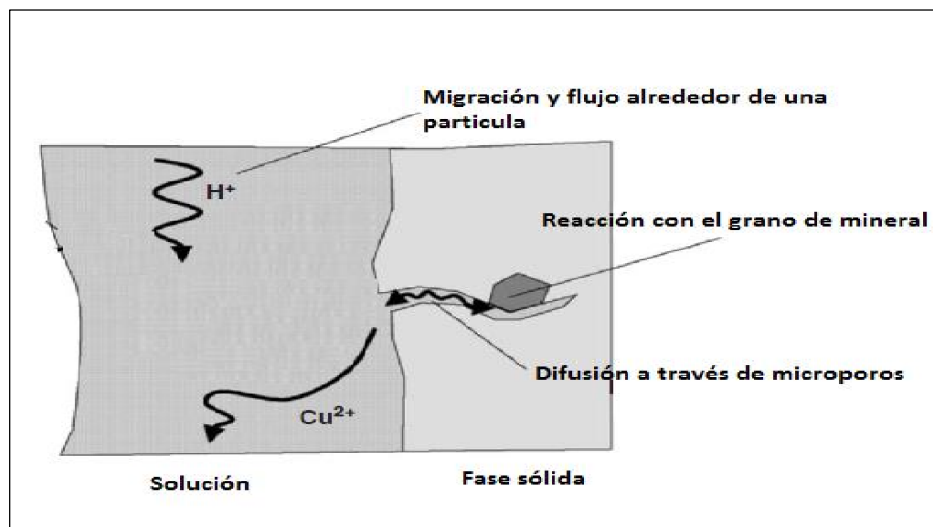


Figura 6. Procesos fisicoquímicos que ocurren en la superficie de una partícula
Fuente: Peterson & Dixon, 2007

2.2.6.1 Cinética de lixiviación: Modelo del núcleo sin reaccionar

Uno de las herramientas más útiles en procesos hidrometalurgicos es el análisis de la cinética de lixiviación, el cual permite dilucidar los posibles mecanismos de disolución de los compuestos que contiene el metal de interés y cuantificar su velocidad a partir de modelos. El estudio de la cinética permite, entre otras cosas, conocer los principales fenómenos que están ocurriendo al interior de una pila, lo cual es útil para realizar

escalamientos del proceso a partir de pruebas piloto, como la determinación de los ciclos de riego en base a pruebas de columna de lixiviación y/o proponer acciones que mejoren la producción y recuperación del metal valioso, o estudiar los parámetros de operación (Lidell, 2005).

Entre los distintos modelos desarrollados para presentar la cinética de disolución de minerales oxidados de cobre en una pila, el más utilizado es el modelo del núcleo sin reaccionar, en este modelo se considera que la reacción ocurre inicialmente en la superficie externa de la partícula, formándose una zona superficial de reacción, la cual avanza hacia el interior del sólido. Producto de este avance, se forma una zona reaccionada porosa de conversión completa (denominada capa porosa) y una zona interna sin reaccionar con un radio crítico que disminuye a medida que avanza la lixiviación del mineral, se puede observar en la figura 7.

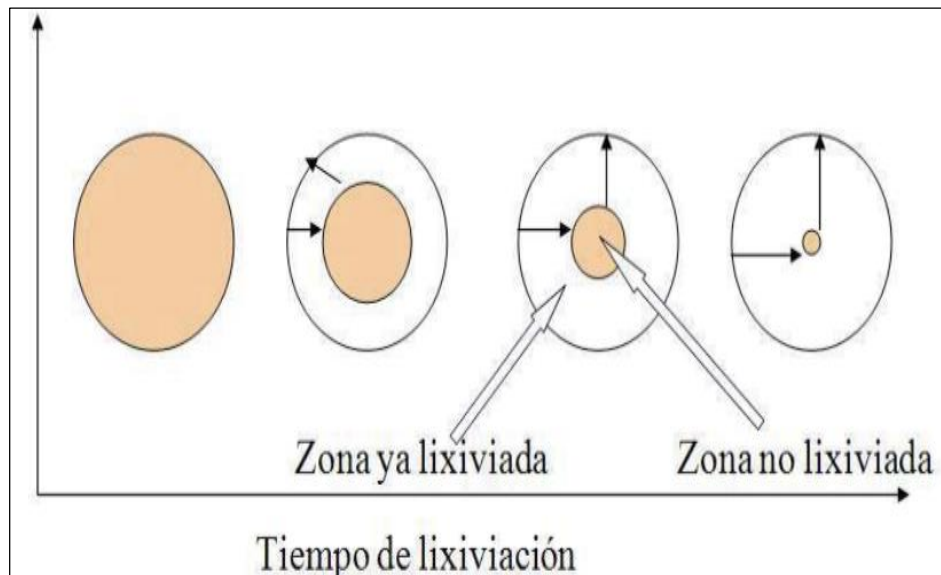


Figura 7. Tiempo de lixiviación
Fuente: Olivares, 2013

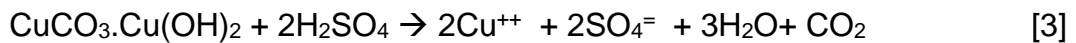
Los principales minerales de cobre de Cuajone son la crisocola ($\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la malaquita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$). La crisocola, un hidroxisilicato con una estructura cristalina abierta, se lixivia relativamente rápido en ácido sulfúrico (H_2SO_4) de acuerdo a la siguiente reacción:



Cu^{++} es el símbolo para el ion cúprico, el principal estado del cobre, cuando este se disuelve en solución. Los iones en solución pueden tener cargas

positivas, tales como el ion cúprico (Cu^{++}), o cargas negativas, tales como el ion sulfato (SO_4^-).

Al igual que la crisocola, la malaquita se lixivia bastante rápido en ácido sulfúrico. La reacción química para este proceso de lixiviación es:



2.2.7 Etapas del proceso de lixiviación en pilas

2.2.7.1 Chancado

Una vez extraído el material con minerales de cobre, la primera etapa de proceso a la que es sometido, es el chancado, esto con el objeto de llevarlo a una granulometría previamente estudiada que maximice la extracción. La decisión de realizar una pila de mineral chancado o ROM se toma desde un punto de vista económico, y radica principalmente en si la ley del mineral es lo suficientemente alta para que sea conveniente realizar el proceso de chancado.

El chancado consiste en un proceso de fragmentación del mineral y se realiza, en general, en varias etapas: chancado primario, secundario, y

en algunos casos terciarios, con el objeto de obtener un material mineralizado de un tamaño máximo entre 19,05 mm y 50,8 mm ($\frac{3}{4}$ " y 2"). Este tamaño es suficiente para dejar expuesta la superficie de las partículas de mineral a la infiltración de la solución ácida. Es importante notar que desde el punto de vista hidrometalúrgico, la reducción de tamaño es favorable, ya que aumenta la recuperación de cobre, no obstante, disminuye la permeabilidad del mineral, afectando el drenaje de la pila y la recuperación de las soluciones (Schmidt, 2001).

En casi todas las plantas de chancado se pueden distinguir dos etapas: chancado grueso y chancado fino. El chancado grueso corresponde a las instalaciones donde llega el mineral desde el yacimiento, y es reducido para pasar a la etapa de chancado fino. El chancado grueso tiene como equipos principales un chancador primario, con sus respectivas tolvas de recepción de camiones y productos, correas que extraen el mineral chancado y un acopio conocido como acopio de gruesos, donde se almacena el mineral que ya ha pasado por el chancador primario.

El chancado fino comienza con la alimentación del mineral desde el acopio de gruesos, el cual va a una primera etapa de clasificación y donde siempre es conveniente extraer el mineral bajo el tamaño máximo definido

en el proceso, con el fin de no generar chancado excesivo que influya negativamente en la permeabilidad del mineral. El mineral sobre el tamaño máximo especificado, pasa a una etapa de chancado secundario, donde se hace una nueva reducción de tamaño. En general, el tamaño máximo que se puede lograr con los chancadores.

Actualmente, la selección y configuración de la planta de chancado se realiza a partir de los resultados de las pruebas metalúrgicas. A partir de éstas, se define el tamaño máximo de partícula de mineral que requiere el proceso para alcanzar los rendimientos metalúrgicos adecuados para el éxito del proyecto, dependiendo de la granulometría que se haya definido en el proceso metalúrgico

2.2.7.2 Aglomeración y curado

El proceso de aglomeración consiste en mezclar el material chancado con agua y ácido sulfúrico, de tal manera que las partículas finas se adhieran entre ellas y con las partículas más gruesas, formando lo que se conoce como glómeros. La cantidad de agua y ácido que se utiliza en el proceso de aglomerado son factores que influyen en conseguir un proceso óptimo. El agua agregada en el proceso de aglomeración provee al material

de una cohesión aparente, la cual ayudará a ligar el material fino con el grueso, formando un glómero, que si bien no tiene una gran consistencia mecánica, sí es adecuado para el proceso productivo.

La cantidad de agua que se debe agregar depende fuertemente de las características del mineral: contenido de finos, plasticidad de los finos, tamaño máximo de partículas, etc. (Schmidt, 2001) ha enumerado las consideraciones que deben tenerse en cuenta para establecer la cantidad de agua y ácido en esta etapa.

- Un exceso de agua produce glómeros muy plásticos y muy poco estables que se destruyen, al cargarlos en una pila se deforman y producen una compactación del mineral antes de iniciar el regado, afectando el drenaje de la pila. Por otra parte, una falta de agua produce glómeros muy débiles mecánicamente y muy esponjosos, lo que hace llegar a las pilas, el mineral quede con una muy baja densidad.
- El ácido sulfúrico agregado en el proceso de aglomeración cumple la función de comenzar a solubilizar el cobre soluble en ácido.
- La cantidad de ácido requerida en esta etapa depende directamente del análisis químico del mineral.

En resumen, la etapa de aglomeración y curado ácido cumple los siguientes objetivos:

- Mejora las condiciones de flujo dentro de la pila, ya que la aglomeración contribuye en contener los finos dentro de los glómeros, ayudando a evitar que éstos afecten el drenaje de la pila.
- Comienza la sulfatación del cobre, aumentando la velocidad de lixiviación.

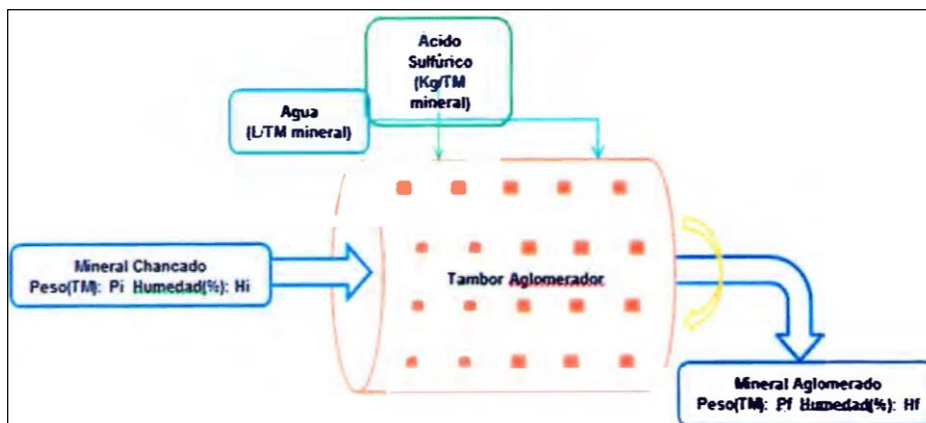


Figura 8. Diagrama de ingresos y salidas en un tambor aglomerador
Fuente: Surco, 2012

2.2.7.3 Lixiviación

Es un proceso de extracción sólido-líquido a través del cual, para el caso de la hidrometalurgia del cobre, se extrae el cobre contenido en el mineral procesado mediante la disolución de los compuestos que lo contienen, generando una solución rica en cobre denominada PLS.

Una vez formada la pila, se vierte lentamente una solución ácida en su superficie a través del sistema de riego. Esta solución se infiltra en la pila hasta su base, produciéndose la extracción del cobre y otras impurezas del mineral. En la base, la solución es recogida por el sistema de drenaje y llevada fuera del sector de las pilas mediante el sistema de evacuación.

2.2.7.4 Extracción por solventes SX

Las soluciones producidas en la etapa de lixiviación tienen bajo contenido de cobre y muchas impurezas. Éstas son tratadas en una planta de extracción por solventes, que mediante un reactivo selectivo al cobre, concentra y purifica el cobre, dejándolo apto para la siguiente etapa del proceso.

Para realizar el regado de las pilas, normalmente se tienen dos modalidades, una que es conocida como un ciclo de lixiviación, que consiste en que la solución lixivante es una sola, que es la solución de refino proveniente de SX, y que al pasar por el mineral da origen a la solución rica en cobre directamente. Otra modalidad de operar, es emplear lo que se conoce como dos ciclos de lixiviación, que consiste en que la solución de refino proveniente de SX se emplea en lixiviar las pilas más

antiguas del proceso, generando una solución intermedia; de tal manera que, esta con una concentración de cobre relativamente baja, sea aplicada para regar las pilas más nuevas que están en proceso, generando de esta manera una solución, por lo general, más concentrada de cobre que al emplear sólo un ciclo (Mimica, 2002).

2.2.7.5 Electrodeposición EW

Las soluciones ricas en cobre y con impurezas controladas, conocidas como electrolitos, pasan a lo que se conoce como nave electrolítica, donde mediante el empleo de electrodos de plomo y acero inoxidable, y aplicación de corriente continua, se logra depositar el cobre de grado electrolito, obteniendo de esta manera los cátodos con una pureza sobre 99,99 %.

2.2.8 Factores que afectan al proceso de lixiviación en pilas

El proceso de lixiviación es un proceso químico complejo, donde intervienen diversos factores. El éxito de este depende en gran medida, de realizar un diseño que permita obtener la solución rica de manera eficaz y eficiente, ya que para que la lixiviación sea económicamente factible, se

debe obtener una gran cantidad de cobre en un limitado periodo de tiempo. En lo relativo a la geotecnia, un drenaje pobre de la pila es uno de las causas más comunes de fracaso de proyectos de lixiviación en pilas (Schmidt, 2001).

2.2.8.1 Granulometría y permeabilidad del mineral

Normalmente la granulometría es “seleccionada” por las distintas pruebas metalúrgicas que se realizan. Su elección comienza con una selección basada en la experiencia del metalurgista, quien toma en cuenta las características físico-químicas del mineral. Cabe notar que siempre un menor tamaño de partículas dará mejores resultados en la recuperación de cobre, sin embargo, la disminución de tamaño tiene como consecuencia una disminución de la permeabilidad, lo que puede causar problemas operacionales debido a inundaciones, problemas de estabilidad mecánica estática y sísmica, e incluso la imposibilidad de que la solución se infiltre a través de la pila. Además, al disminuir el tamaño, si bien se mejora la recuperación de cobre, también se aumentan los costos por chancado.

Un menor tamaño de las partículas aumenta la velocidad de lixiviación y recuperación de cobre, ya que aumenta la exposición de los

minerales del metal de interés a la solución lixiviante. Sin embargo, mientras más pequeñas sean las partículas que conforman la pila, la permeabilidad de ésta será menor, pudiendo provocar canalizaciones y empozamientos de la solución, lo cual disminuye la recuperación y estabilidad de la pila. Por otra parte, una alta permeabilidad genera un tiempo de contacto partícula-solución muy corto promoviendo una lixiviación lenta (Kane, 2000). El tamaño óptimo de las partículas comprometerá todos los aspectos mencionados junto con el costo de chancado, el cual aumenta a mayor reducción de tamaño (Milzarek, Banerjee, Yao, & Keller, 2013), en la figura 9, se puede ver los tamaños de partícula.

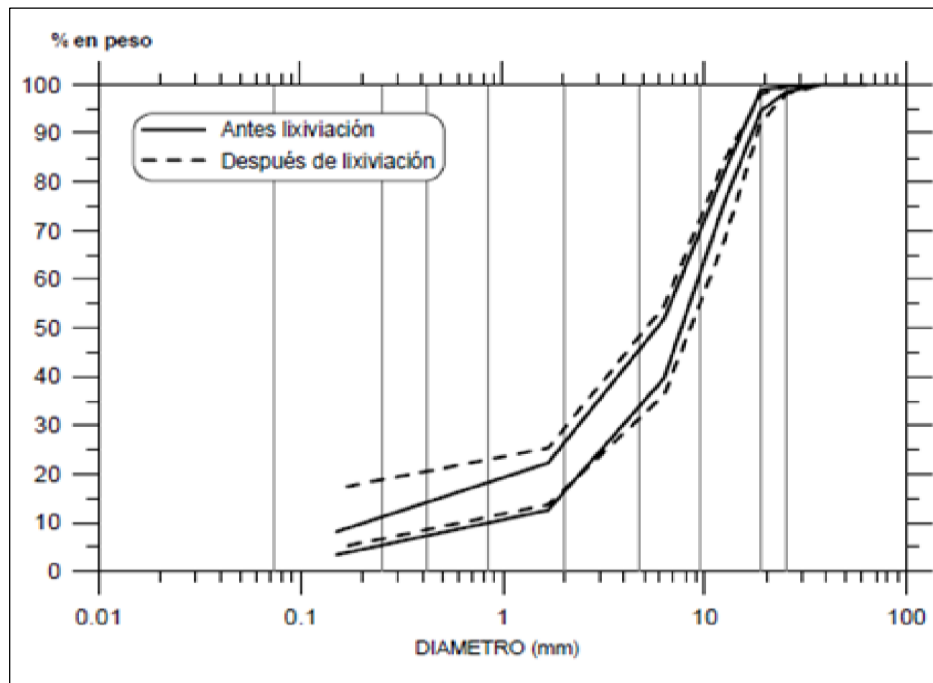


Figura 9. Variación de la granulometría del material apilado por acción de la lixiviación para dos distribuciones granulométricas
Fuente: Milzarek, et al., 2013

2.2.8.2 Tasa de riego

Este parámetro es fundamental, ya que determina, en gran medida, el tiempo de lixiviación. Debido a su importancia, siempre se estudia en laboratorios y en plantas piloto y es afectado directamente por la permeabilidad del mineral. En un mineral con alto contenido de finos, normalmente se aplica una tasa de riego entre 6 L/m²h ($1,7 \times 10^{-4}$ cm/s) y 10 L/m²h ($2,8 \times 10^{-4}$ cm/s), mientras que uno más grueso puede tener tasas de hasta 40 L/m²h ($1,1 \times 10^{-3}$ cm/s) (Schmidt, 2001).

El volumen de solución de riego adicionado por unidad de tiempo debe ser suficiente como para suministrar la cantidad de ácido requerida para disolver las especies de interés, más el consumo por parte de la ganga. La cota superior de la tasa de riego en un proceso de lixiviación en pilas viene dada por la permeabilidad de la pila, ya que es necesario evitar la generación de empozamientos y, en casos extremos, pérdida de la estabilidad de la pila y derrumbes, los cuales afectan de forma negativa tanto a la producción como a la seguridad de la operación y al medioambiente (Mimica, 2002). Disminuir la tasa de riego implica procesar el mineral apilado durante un mayor tiempo para alcanzar los niveles de recuperación deseada.

Otro punto a considerar en este parámetro, es la generación de flujos preferenciales. En una pila de lixiviación, existe inevitablemente la segregación del mineral de acuerdo a su tamaño, la cual se puede potenciar por malas prácticas de apilamiento (figura 10), generando sectores en la pila, de material grueso y material fino, con distinta permeabilidad.

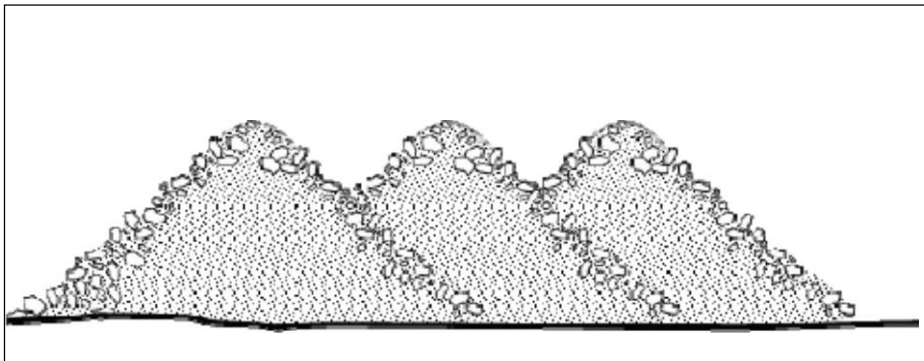


Figura 10. Esquema de segregación de partículas gruesas y finas debido a malas prácticas de apilamiento
Fuente: Dhawan, et al., 2012

(Kane, 2000) demostró que al aplicar una tasa de riego mayor a la conductividad hidráulica saturada (facilidad con que puede fluir el agua por unidad de área transversal al flujo para el caso en el que el medio esté saturado en agua) de la fracción fina (sección que posee las partículas más pequeñas), la mayor parte de la solución circula a través de la sección más gruesa, debido a que posee una mayor succión. Por el contrario, a tasas de riego menores a esta permeabilidad saturada, el material fino posee mayor succión, circulando la mayor parte del flujo a través de esta zona (figura 11). Para determinar la tasa de riego óptima se debe conocer una medida de la segregación de material y la permeabilidad de los distintos sectores de la pila.

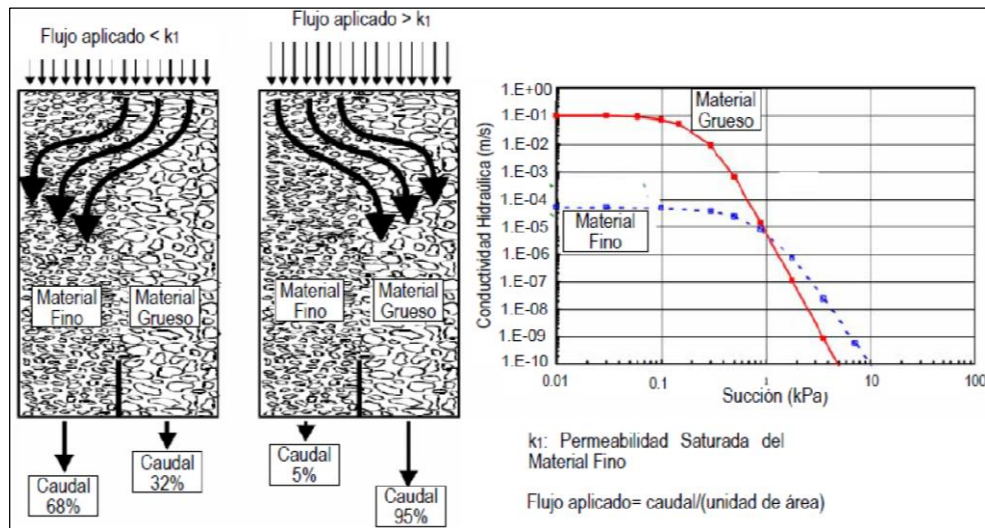


Figura 11. Estudio sobre el efecto de la tasa de riego en medio parcialmente saturado. La figura a la derecha se muestra que la succión del material fino es mayor para flujos menores a la conductividad hidráulica
Fuente: Kane, 2000

2.2.8.3 Sistema de apilamiento del mineral aglomerado

El sistema de apilamiento del mineral juega un rol crucial para asegurar un buen drenaje. Se deben realizar todos los esfuerzos necesarios para construir una pila homogénea y con una capacidad de drenaje adecuada, es decir, pilas con minerales que no se encuentren compactados y libres de estratos de material segregado o cualquier otro problema que pudiera causar flujos preferenciales (E. Bard, 2004).

2.2.8.4 Altura de la pila

Un aumento en la altura de la pila permite disminuir los costos de operación asociados al apilamiento e irrigación, para un mismo tonelaje de mineral a tratar, al disminuir la superficie de riego (Miller & Newton, 1999). Además, la conservación del calor dentro de la pila es mejor al minimizar las pérdidas al ambiente. Sin embargo, una mayor altura de la pila promueve una disminución de su permeabilidad, ya que la presión que ejercen las capas superiores del mineral apilado, producen la compactación del mineral de las capas inferiores (figura 12). Como consecuencia, los ciclos de lixiviación son más largos y existe un mayor consumo de ácido. (Hashemzadehfini & Ghaffari, 2012).

Las pilas estáticas se construyen por capas o niveles. Al finalizar la lixiviación, se procede a cargar el siguiente nivel. Para dar cifras de alturas de pila comunes, primero debe diferenciarse entre pilas ROM y pilas de mineral chancado. Las pilas ROM normalmente tienen grandes alturas, pudiendo alcanzar hoy en día hasta 200 m, y se construyen en niveles que normalmente no sobrepasan los 40 m, sin sistema de impermeabilización entre niveles. El material ROM está compuesto por un amplio rango de tamaños, desde finos hasta clastos de dimensiones métricas. Por lo tanto,

los problemas de permeabilidad de la pila se suelen limitar a canalizaciones y flujos preferenciales (Schmidt, 2001).

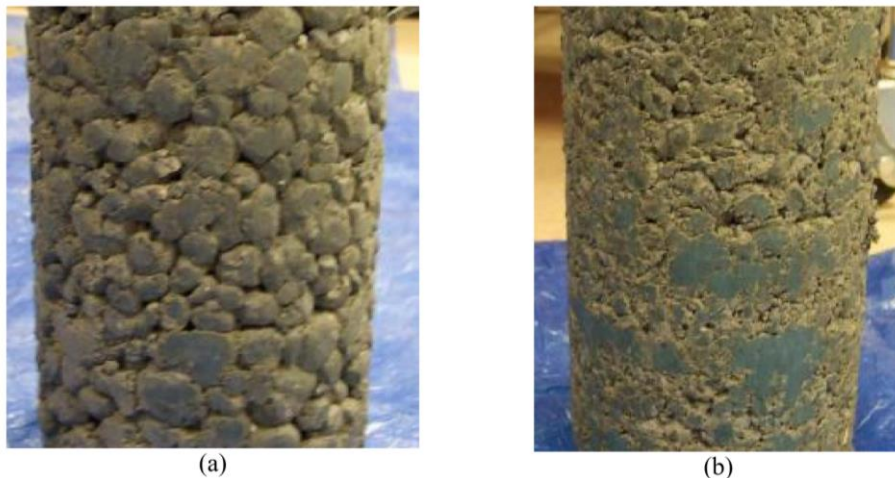


Figura 12. Compactación del mineral apilado para una altura de (a) 3 metros bajo la superficie y (b) 9 metros bajo la superficie
Fuente: Milzarek, et al., 2013

2.2.8.5 Tiempo de lixiviación

El tiempo de lixiviación es un parámetro operacional muy importante para el proceso hidrometalúrgico del cobre, y depende de muchas de las variables anteriormente descritas. De esta forma, si se fija una recuperación objetivo, el tiempo de lixiviación dependerá fuertemente de las siguientes variables:

- Granulometría del mineral

- Altura de apilamiento
- Tasa de riego
- Ácido en la aglomeración
- Permeabilidad de la pila
- Concentración de ácido en las soluciones de lixiviación.

(Schmidt, 2001) afirma respecto a este parámetro, que siempre un mayor tiempo de procesamiento conlleva una mayor inversión (ver figura 13). Por lo tanto, muchas veces sería mejor tener una mayor inversión en chancado, obteniéndose una granulometría más pequeña y de esta manera tener menores tiempos de lixiviación. No obstante, se debe aclarar que Schmidt está asumiendo que al disminuir el tamaño de partículas, la permeabilidad del mineral será suficiente para que no se presenten problemas en la extracción de la solución rica, lo cual, no será cierto a partir de un cierto tamaño de partículas, dependiendo también de otras variables operacionales.

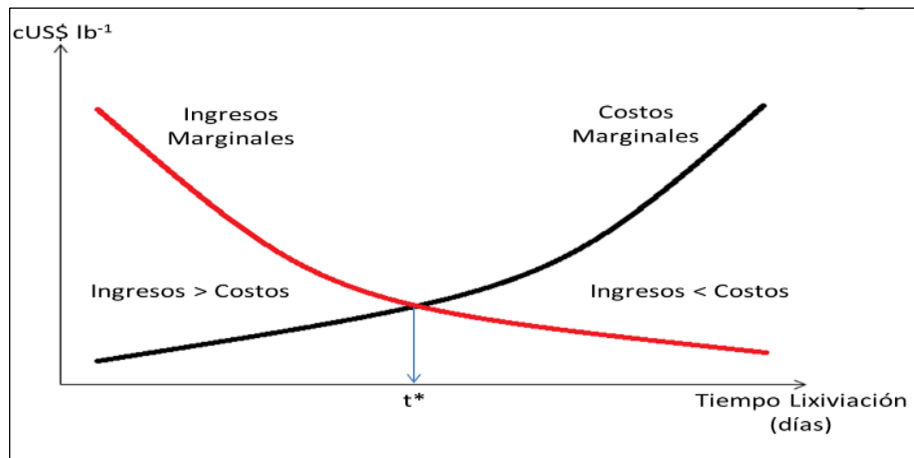


Figura 13. Ingresos y costos marginales en función del tiempo de lixiviación
Fuente: Schmidt, 2001

2.2.8.6 Concentración de ácido en solución de riego

En vista que las reacciones de lixiviación de óxidos de cobre corresponden a reacciones ácido-base, el ácido sulfúrico se convierte en la fuerza motriz del proceso. El ácido no solo reacciona con los compuestos oxidados de cobre sino que también con otros compuestos constituyentes de la ganga, como el carbonato de calcio (ecuación (4)), que corresponde a una base fuerte. La concentración de ácido de la solución de irrigación dependerá entonces del consumo tanto de los compuestos oxidados como de la ganga.



[4]

Una concentración baja de ácido en el flujo de alimentación (menor al consumo por parte de los minerales de cobre) disminuye la recuperación de cobre. Por otra parte, concentraciones altas de H_2SO_4 (mayores a las requeridas para disolver los compuestos de cobre) aumentan la disolución de la ganga, generando un mayor consumo de este reactivo junto con una solución rica en impurezas (algunas de ellas perjudiciales para las siguientes etapas del proceso), lo que aumenta el costo de producción (Miller & Newton, 1999). Por lo tanto, se debe encontrar una concentración óptima de ácido la cual promueva la recuperación de cobre deseada y que al mismo tiempo no favorezca la disolución de impurezas (Schmidt, 2001).

2.2.8.7 Hierro presente en el mineral

Los minerales de cobre sulfurado pueden ser lixiviados mediante la oxidación de estos, lo cual se logra a través de microorganismos y la acción del ión férrico (Fe^{+3}), el que puede ser obtenido de la ganga o de minerales como la calcopirita ($CuFeS_2$), la pirita (FeS_2), arsenopirita ($FeAsS$), etc., (Barrett, 1993) mediante la disolución por medio de una solución ácida. Por lo tanto, en el proceso de lixiviación se tendrá generalmente, variadas especies de hierro en solución, que interactúan formando complejos que conducen a la precipitación del ión férrico.

2.2.9 Sistemas de riego

Al regar la pila debe tenerse en cuenta la necesidad de que la solución se distribuya uniformemente sobre su superficie. La selección del sistema de riego es un punto clave para el éxito del proceso, ya que, si se elige bien, se puede evitar que la solución se canalice en la superficie y en el lecho interno de la pila, permitiendo que por todo el mineral pase la cantidad de ácido necesaria para obtener el cobre (Schmidt, 2001).

Los sistemas de riego ofrecen una serie de alternativas que posibilitan optimizar el uso del agua disponible, aplicar cualquier sistema de riego constituye someterse a un estudio previo y así determinar si es el sistema más idóneo, existen muchos y variados sistemas de riego que brindan facilidad y comodidad los cuales se encuentran en permanente revisión, ya que se trata de una tecnología que se ha ido desarrollando en conjunto con lo que ha avanzado la sociedad.

2.2.9.1 Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU)

El coeficiente de uniformidad de Christiansen, o CU, es el método más utilizado para determinar la uniformidad de un sistema de rociadores.

La CU es una determinación estadística de la uniformidad de un sistema.

La siguiente fórmula calcula la CU:

$$CU = 100 (1 - S x / mn) \quad [5]$$

Aquí, x es el valor absoluto de la desviación de las observaciones individuales del valor medio m , y n es el número de observaciones.

A menudo, la CU da la mejor interpretación general de lo que está sucediendo bajo los rociadores al dar el mismo peso a toda el área irrigada. Cuando la aplicación es perfectamente uniforme, la CU es igual al 100 por ciento.

Interpretación de la CU

- 90 % - más: uniformidad excelente
- 80 % - 90 %: uniformidad buena
- 70 % - 80 %: uniformidad regular
- Menos de 70 %: uniformidad inaceptable

2.2.9.2 Distribución de uniformidad (DU)

La DU en realidad evalúa al 25 % del área que está con el riego más bajo (sub-irrigada), y se utiliza para ajustar la lámina de riego al 100 %, eliminando la posibilidad de que existan áreas con estrés hídrico. La uniformidad de distribución, o DU, es también un medio ampliamente aceptado para determinar la uniformidad de un sistema de riego. La siguiente fórmula calcula el DU:

$$DU = 100 (mLQ / m) \quad [7]$$

Aquí mLQ es el promedio del cuarto más bajo de las observaciones, y m es el promedio de todas las observaciones. Al igual que con el CU, cuando la aplicación es perfectamente uniforme, el DU es del 100 por ciento.

2.2.9.3 Por goteo

El sistema de riego por goteo es un método de irrigación que permite una óptima aplicación del uso del agua (figura 14), en lugares o en zonas donde hay un alto porcentaje de evaporación, el agua se distribuye

puntualmente, sin atomización y sin que empape el terreno. La densidad de puntos de riego humedece ciertas zonas, mientras la mayor parte del terreno permanece seco.

“En muchos casos deben instalarse válvulas reductoras de presión de 0,5 a 2 kg/cm², por lo general, precisa dichas presiones. También es preciso un sistema para filtrar el agua, ya que esta fluye al exterior por pequeños orificios denominados goteros. A pesar de estas medidas de prevención es necesario limpiar periódicamente las tuberías y los goteros desatascándolos con líquidos detergentes o desincrustantes” (Alvarez Perez, 2010)



Figura 14. Módulos de riego por goteo
Fuente: Módulo Lixiviación Alto Chicama

2.2.9.4 Por aspersión

El sistema de riego por aspersión es muy eficaz debido a que los aspersores proporcionan una cobertura extremadamente uniforme y sobre un gran diámetro a bajas presiones operativas, y produce una aplicación suave de solución lixivante, (figura 15). Este método, de uso general, se aplica sobre grandes superficies lanzando un gran volumen de agua controlada y uniforme en forma de lluvia. Por lo general, actúa cubriendo toda el área y es muy adecuado para automatizar la operación.

El principio de operación en los sistemas de riego por aspersión se basa en convertir la energía de velocidad a la salida de la boquilla del aspersor en forma de chorro. A medida que dicho chorro de agua pasa sobre el terreno del campo, este queda esparcido en forma de gotas de agua, las cuales al reunirse con la resistencia del aire caen a la superficie del suelo.



Figura 15. Riego por aspersion
Fuente: Intercade

2.2.9.5 Tuberías de colección y drenaje

Para un buen drenaje de la pila es necesario realizar un diseño adecuado de las tuberías que conforman el sistema de drenaje y evacuación. Para pilas de gran altura es necesario estudiar la deformación que se produce en las tuberías ante la carga del mineral y su capacidad para seguir transportando las soluciones. En este ámbito hay pocos estudios que sean concluyentes acerca del comportamiento que tendrán las tuberías sometidas a la carga del mineral.

2.2.9.6 Consecuencias de un mal drenaje

La consecuencia más lógica de un mal drenaje de la pila es la imposibilidad de recuperar el cobre, no obstante, también puede causar problemas de estabilidad mecánica, estática y sísmica.

2.3 Definición de términos

- **Lixiviación.-** Es un proceso en el cual el mineral valioso es disuelto en forma de iones en soluciones por un disolvente diluido.
- **Ácido sulfúrico.-** Es un químico líquido, denso e incoloro que se usa mucho para lixiviar.
- **Aglomeración.-** es un proceso que consiste en humedecer el mineral, de modo que las partículas finas se adhieran a partículas gruesas.
- **Curado.-** Es una etapa previa a la lixiviación, la finalidad es formar el sulfato de cobre.
- **Permeabilidad.-** Es la capacidad de la solución lixivante de penetrar a las partículas de minerales en el Pad.
- **Percolación.-** Es la manera en la cual la solución lixivante fluye por gravedad a través del mineral el cual constituye la pila.

- **PLS.-** Es la solución rica en cobre efluente de la pila.
- **Drenaje.-** Es la acción de evacuación de la solución rica por medio de cañerías corrugadas y perforadas, colocadas longitudinalmente debajo de la pila de mineral.

En la tabla 2 se muestra la identificación de variables en el sistema de riego.

Tabla 2
Identificación de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	VARIABLE DEPENDIENTE
Sistema de riego	Coeficiente de uniformidad
Diseño de riego	Distribución de uniformidad
Flujo de riego	

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de la investigación

Los procesos de aglomeración y lixiviación de minerales oxidados de cobre, se emplearon modelos matemáticos y pruebas experimentales desarrollados a nivel laboratorio.

3.2 Operacionalización de variables

La construcción del módulo así como el diseño de riego en pilas para la recuperación del PLS, están controlados permanentemente a los parámetros de operación como son:

- Concentración del H^+
- Tasa de riego
- Concentración de Cu^{++} en PLS

3.3 Procesamiento y análisis de datos

3.3.1 Proceso de chancado, aglomeración y transporte

3.3.1.1 Proceso de chancado

El circuito de chancado existente es un circuito de dos etapas con la segunda etapa operando en circuito cerrado con una zaranda vibratoria. El proceso de chancado de Cuajone trata de 300 t/h de mineral de cobre oxidado con una ley de 0,7 – 0,8 % de cobre total y 50 – 60 % de cobre soluble.

El mineral extraído de la mina (ROM) es trasladado por volquetes desde el stock pile (pila de almacenamiento de mineral oxidado) de la mina de Cuajone a la Planta de Chancado ubicada al este de la concentradora. Los volquetes depositan el mineral en un área de almacenamiento que tiene una capacidad de aproximadamente 80 000 t. Un cargador frontal remueve el mineral desde la pila y lo deposita sobre una parrilla fija. El mineral que atraviesa la parrilla cae dentro de la tolva. Los minerales de mayor tamaño son retenidos por el *grizzly* de la tolva de paso y es triturado

por un rompedor de rocas móvil y neumático. La capacidad de tratamiento es de 4 500 – 5 000 t/día.

Los trozos menores de son clasificados y separados en otro *grizzly* o parrilla del alimentador vibratorio.

El mineral que pasa a través de las barras clasificadoras, va directamente a la faja transportadora de descarga de la chancadora primaria. El mineral que es demasiado grande para pasar por la parrilla del alimentador vibratorio, se alimenta a la chancadora primaria. La chancadora primaria es de quijada. El producto de la chancadora de quijadas y el pasante de la parrilla vibratoria descargan en la faja transportadora.

La faja de descarga de la chancadora primaria deposita el mineral sobre la faja que alimenta a la zaranda de la chancadora secundaria. La faja de alimentación a la zaranda vibratoria, descarga mineral sobre ésta, clasificando el material en dos niveles. El producto grueso descarga a la faja transportadora, que a su vez descarga a una tolva intermedia, del cual mediante la faja alimentadora, se alimenta a la chancadora secundaria de tipo cónico, ésta trabaja en circuito cerrado con la zaranda vibratoria. El

producto fino de la zaranda descarga en la faja transportadora. Este material pasante es el producto final del chancado.

La faja transportadora de finos clasificados recibe el mineral pasante tamizado de la zaranda vibratoria de doble piso. La faja transportadora de finos clasificados alimenta el mineral a un sistemas de fajas que a su vez alimentan al tambor aglomerador.



Figura 16. Planta de chancado
Fuente: SPC - Cuajone

3.3.1.2 Proceso de aglomeración y carguío

Luego de una etapa de chancado, el mineral es transportado mediante las fajas al tambor aglomerador. Una balanza de faja pesa el mineral que pasa en la faja transportadora y monitorea la velocidad de paso del mineral. El peso del mineral determina la cantidad de reactivo aglomerante para ser añadido en el tambor de aglomeración. Aglomeración significa la unión por ligamento. El proceso de aglomeración es necesario para prevenir la presencia de material fino en la solución de lixiviación y posibles canalizaciones en la pila de lixiviación. Si la pila de lixiviación se canaliza, la recuperación de cobre recae. Si no se consigue aglomerar los finos, pueden bloquearse algunas partes de la pila de lixiviación y además causar empozamientos de PLS. Estos problemas adicionales contribuyen a aumentar los costos de operación y disminuir la recuperación de cobre (la humedad al final de la aglomeración debe ser 6,2 %).

Usando el peso del mineral, el PLC calcula la señal de salida apropiada para el controlador de velocidad de bombeo, que resulta en la cantidad apropiada de reactivo aglomerante que está siendo adicionado al mineral. Inmediatamente después de ser pesado el mineral es descargado al tambor aglomerador y allí se le añade mediante quenas ácido sulfúrico

concentrado y agua. El tambor trabaja en forma continua y al girar mezcla estos elementos con el mineral lo más homogéneamente posible.

En total 70 % de la cantidad estequiométrica de ácido necesario para la lixiviación es añadido al mineral en el tambor.



Figura 17. Tambor aglomerador
Fuente: SPC - Cuajone

Cantidad estequiométrica significa la cantidad química hallada según cálculos. La adición de agua es de 80 Kg/t. Una vez mezclados los dos elementos, el mineral es descargado del tambor aglomerador, para luego ser enviado en volquetes hacia las canchas de lixiviación.

3.3.2 Proceso de lixiviación y manejo de PLS

3.3.2.1 Proceso de lixiviación

Los volquetes acarrean el mineral aglomerado a una cancha de lixiviación permanente, depositándolo para la formación del módulo; un módulo es la unidad básica para el tratamiento del mineral aglomerado llevado por los volquetes y extendido por el cargador frontal. Una vez en la pila (una pila es un conjunto de módulos), el mineral es humectado por 6 a 8 días antes de que la lixiviación se inicie. El periodo de curado sirve para doble propósito. Primero, permite al ácido sulfúrico concentrado disolver el cobre del aglomerado. Cuando se inicia la lixiviación después de un tiempo de curado, esta es más rápida. La disolución de cobre en gran parte ya realizada es fácil y la solución de lixiviación sirve más para lavar el cobre disuelto que para reaccionar con él. En segundo lugar, el tiempo de curado permite también al aglomerado ligarse completamente y estabilizar la pila para la lixiviación (ver figura 18). Después del curado, un sistema de irrigación por aspersión distribuye ácido sulfúrico diluido desde el mezclador de ácido sulfúrico sobre la superficie de la pila. La solución de lixiviación posee una concentración de ácido sulfúrico de 5 -10 gramos por litro, resultando en una solución de lixiviación con un pH menor a 1,0.



Figura 18. Lixiviación de cobre por aspersion
Fuente: SPC - Cuajone

3.3.3 Ciclo de lixiviación de cobre en Cuajone

El ciclo básico de lixiviación en Cuajone abarca entre 60 a 70 días. Durante el curado, el ácido sulfúrico y el reactivo aglomerante, previamente agregado al mineral en el tambor aglomerador reaccionan con las partículas del mineral. Ligamentos tipo cemento se generan entre las partículas de los aglomerados para obtener partículas más gruesas que permiten una buena percolación. Sin esos ligamentos los aglomerados tenderían a desmoronarse y colapsar cuando se humedezcan completamente durante la lixiviación. Si un gran número de aglomerados colapsa, la pila llega a ser parcialmente obstruida y con acanalamientos.

Esto reduce en gran manera la recuperación de cobre. Durante el ciclo de lixiviación, el ácido sulfúrico agregado ayuda a dar continuidad a las reacciones para producir el ión Cu^{++} (ver figura 19).

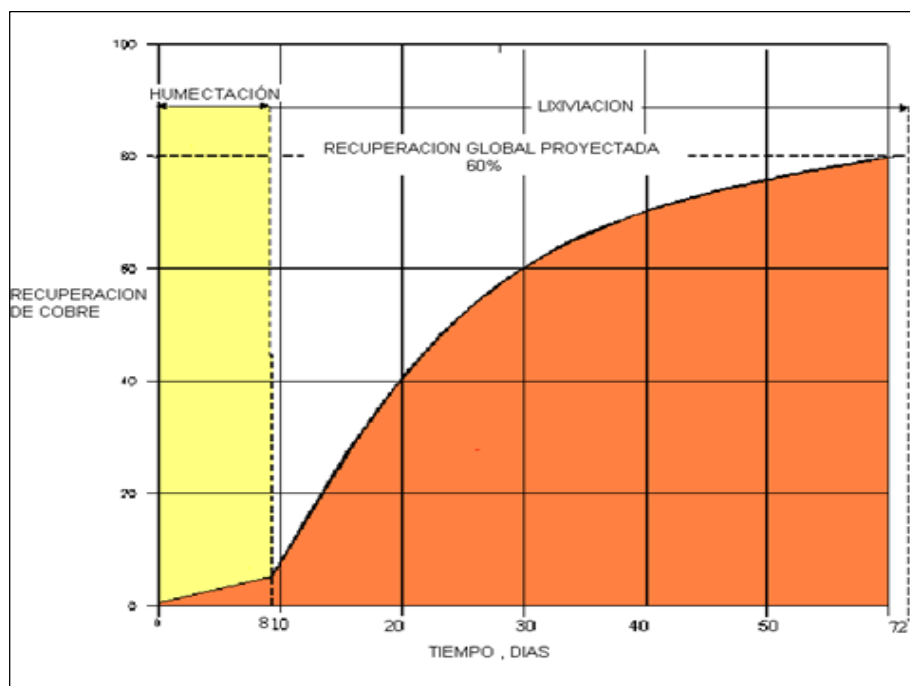


Figura 19. Tiempo de lixiviación
Fuente: SPC

3.3.3.1 Construcción del módulo

a. Preparación de la carpeta

Para la preparación de la cancha, por lo general durante la operación de descarga del mineral aglomerado para formar la pila se utiliza un cargador frontal, este equipo efectúa un emparejamiento final de la cancha.

Sin embargo, como resultado el cargador frontal no es el más adecuado para efectuar esta operación y lo que realiza es un emparejamiento irregular y parcial (ver figura 20), con lo que la cancha queda con desniveles que finalmente conducen a aumentar el nivel de la capa freática al no evacuar oportunamente el PLS desde la base de la pila hacia las canaletas recolectoras.

El mayor nivel de la capa freática, producirá canalizaciones, inundaciones localizadas y deslizamiento de taludes, que conducen a una serie de alteraciones operacionales con pérdida de la eficiencia en esta etapa y las posteriores de SX-EW. Incluso se puede llegar a bajar la tasa de riego para permitir el adecuado drenaje de las soluciones, que altera la razón de lixiviación y los tiempos de lixiviación establecidos.



Figura 20. Preparación del PAD
Fuente: Cía Minas Buenaventura

b. Construcción del módulo

Se instala una manta de PEBD y los drenaflex, para la descarga del mineral aglomerado (figura 21). Desde un punto de vista práctico, la formación de una pila mediante el uso de cargador frontal en reemplazo de un apilador o correas transportadoras, no permite la formación de una superficie pareja, pero al menos se debería evitar la formación de protuberancias y valles que impiden posteriormente una adecuada distribución de las soluciones y su percolación a través del lecho.

Una deficiente terminación conduce a inundaciones localizadas y canalizaciones que debilitan los taludes e impiden una operación eficiente de las parrillas de riego, manifestadas en filtraciones en los acoples y mal

funcionamiento de los aspersores de riego, lo que produce no solo alteraciones operacionales severas sino que obligan a un control e intervención frecuente del operador, desviando su atención de controles en otras áreas que perjudican la operación general y alteran los procesos posteriores.



Figura 21. Apilamiento del mineral
Fuente: Hidrometallurgy

Para la construcción del módulo se tienen en cuenta los siguientes factores:

Tabla 3
Factores en la construcción de módulos

Reparación de carpeta con pendiente	3,0 – 3,5%
Impermeabilización del piso	De polietileno de 12 m x 20 m x 0,008 mm Mantas de LPDL
Instalación de tuberías de drenaje	50,8 mm de diámetro (2")
Formación de la pila	Volquetes
Relleno entre volquetada, rastrillado y nivelado	Cargador frontal
Distancia entre línea de drenaje	4,5 m
Drenajes principales (donde el drenaje de 50,8 mm (2") es insertado)	101,6 mm de diámetro (10")
Forma que presenta el módulo	Trapezoidal
Altura de módulo	2,5 m. – 3,0 m.
Tonelaje promedio de un módulo	10 000 t – 20 000 t
Dimensión del área mayor	100 m x 35 m
Dimensión del área menor	93,5 m x 29,4 m
Ángulo de reposo del aglomerado	38 grados
Densidad aparente	1,48 g/cm ³
Área ocupada por el módulo	3 500 m ²

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.4 Instalación del sistema de riego

Instalación de líneas para el sistema de riego



Figura 22. Instalación de líneas de riego
Fuente: SPC - Cuajone

Para la instalación del sistema de riego se toman los factores que se muestran a continuación:

Tabla 4
Factores en el sistema de riego

Área de riego	3 184,15 m ²
Densidad de riego	4 L/m ² h
Flujo de riego	17 m ³ /h
Tipo de aspersores	Mini Woblers Nro. 4
Flujo de aspersor (20 PSI)	1,8 L/min
Número de mini woblers	162 unidades
Tubería de riego	HDPE 50 mm diámetro
Tubería de troncales	HDPE 150 mm diámetro
Presión de líneas	5 000 – 10 000 kg/m ²
Evaporización de sol	10-15 %
Recuperación de cobre	60 % CuT
Ciclo total de lixiviación por módulos	60 – 70 días

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.5 Manejo del PLS

Luego de una etapa de lixiviación, el PLS fluye a una poza de colección que está doblemente cubierta con mantas de HDPE para prevenir fugas en el terreno (figura 23). Esta poza está equipada con una tubería detectora de fugas instalada entre los liners que permiten el drenaje de

cualquier solución que penetre la lámina superior. La poza de PLS está también equipada con un vertedero para manejar reboses de la poza que pueden ocurrir sobre todo durante periodos de lluvias fuertes. Este vertedero fluye a una poza de contención de lluvias o retención.

Los trabajos sobre pruebas metalúrgicas realizadas por SPCC estiman que para extraer 1 kg de cobre de mineral se necesitan de 7,40 kg de ácido y 40 – 50 kg/t mineral de ácido sulfúrico.



Figura 23. Poza de PLS
Fuente: SPC - Cuajone

3.3.2.6 Equipos asociados a la lixiviación y manejo de PLS

A continuación se describen los equipos asociados a la lixiviación y manejo de PLS:

a. Aspersor tipo mini wobbler

El aspersor del tipo mini-wobbler es utilizado para el sistema de riego con ácido sulfúrico en los módulos de lixiviación. Este aspersor está hecho de termoplástico de alta densidad, para una excelente resistencia a la degradación y corrosión termoquímica.

- **Principio de operación**

El aspersor tiene una parte móvil y ningún resorte metálico. Las únicas partes móviles son el deflector y el trípode, los cuales están sobre una base, sujetos por una porta boquilla. El tamaño de la boquilla es seleccionada para un flujo en particular; en Cuajone la boquilla tiene una abertura de 1,6 mm, puesto que la solución sale de la boquilla a alta velocidad (debido a la fuerza de la solución en estas ranuras) el deflector y el trípode se balancea y rota al mismo tiempo. Este movimiento combinado

crea un círculo uniforme de solución. La aspersion puede ser hasta 9 m (29,5 pies) de diámetro, dependiendo de la presión de la solución y el flujo nominal (Senninger).

Tabla 5
Características del aspersor

Boquilla N° 4	PRESIÓN DE LA BOQUILLA (PSI)				
	10	15	20	25	30
Flujo (L/h)	95,39	111,29	113,5	118	134,5
Diámetro (m)	8,07	8,53	8,99	8,99	-

Fuente: (Senninger)



Figura 24. Aspersores
 Fuente: (Senninger)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Resultados

4.1.1 Optimización del sistema de riego.

4.1.1.1 Diferencias entre sistemas de riego por goteo y por aspersión

El objetivo del sistema de riego es lograr un mojado uniforme y completo del mineral a través de la percolación continua de la solución lixiviante entre las partículas del mineral. La selección de la aspersión o goteo se basa generalmente de las condiciones climáticas de la región donde se ubican las minas, teniendo en cuenta la tasa de evaporación y la congelación potencial.

4.1.1.2 Sistema de riego por goteros

Los goteros producen un problema típico, ya que en la parte superficial de la pila quedan sectores sin regar, conocidos como “cono invertido sin riego”. En esta zona, que queda comprendida entre gotero y gotero, se produce una humectación del mineral, pero la solución de lixiviación no fluye, por lo que esas zonas quedan mal lixiviado y la recuperación global de cobre se ve afectada. Este depende mucho de la permeabilidad del mineral aglomerado, como se muestra en la figura 24.

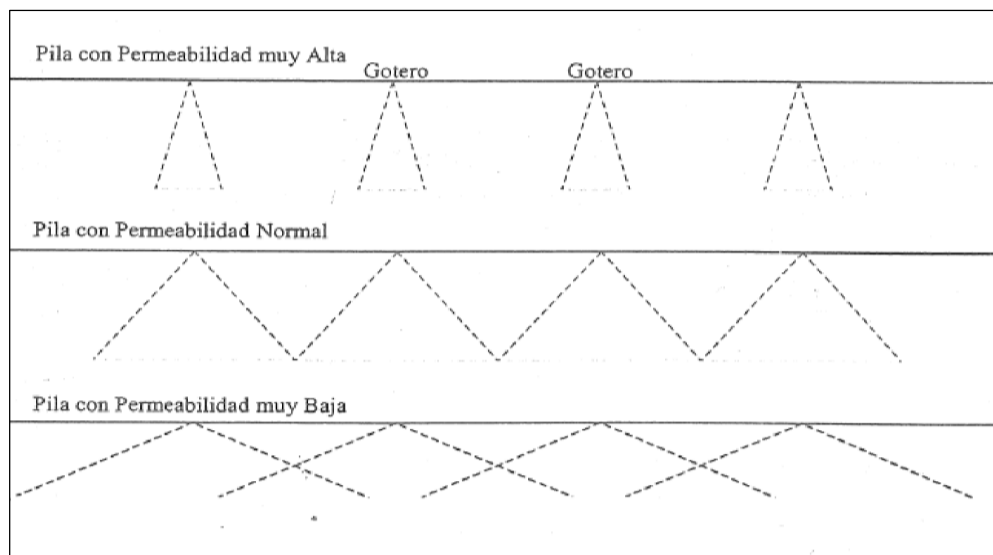


Figura 25. Cono sin riego según permeabilidad
Fuente: Lopez, 2012

Los procesos de lixiviación que utilizan métodos de goteo dependen del punto de origen de aplicación de solución, lo que promueve la canalización. Debido a que hay un mínimo movimiento lateral y entre líneas de la solución aplicada sobre el mineral apilado, es necesario poco espaciamiento entre emisores y laterales para lograr la dosis de aplicación deseada (Senninger).

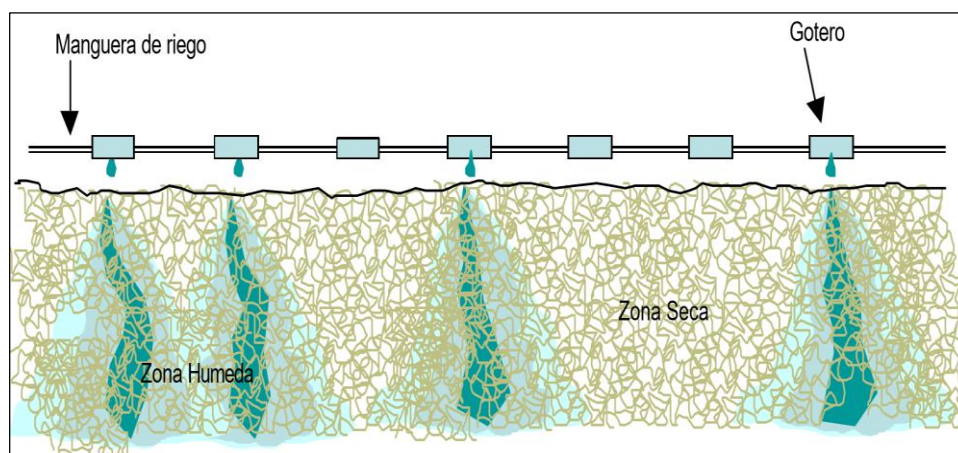


Figura 26. Obstrucción de goteros en lixiviación
Fuente: Lopez, 2012

4.1.1.3 Sistema de riego por aspersión

La uniformidad de distribución de la solución es esencial para maximizar la recuperación de metales deseados. Este diseño por aspersión ofrece más de un 90 % de uniformidad, es el método más eficaz para lograr un contacto total entre la solución y la superficie del aglomerado.

4.1.1.4 Comparación del diseño de riego por goteo y aspersión

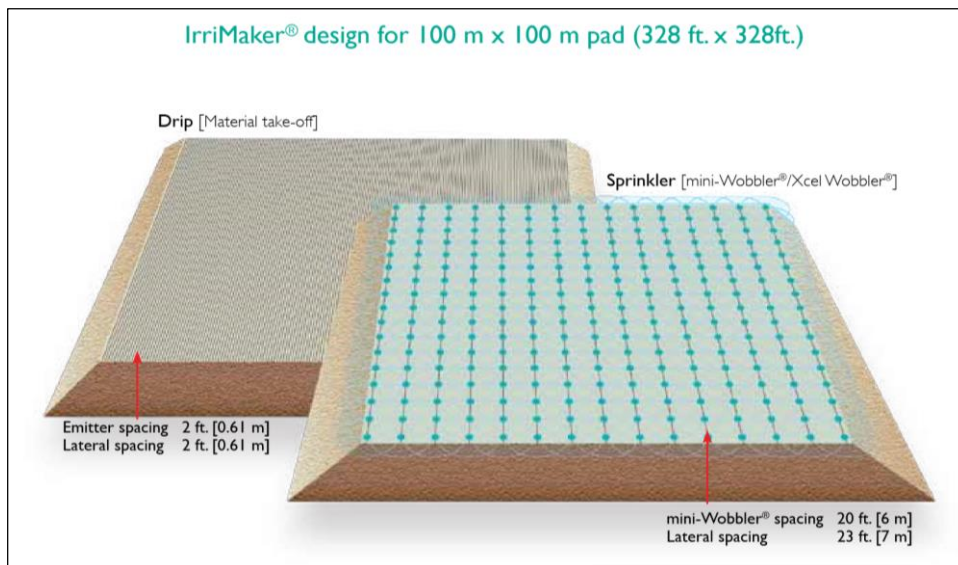


Figura 27. Comparación del diseño de riego por goteo y aspersión
Fuente: IrriMaker

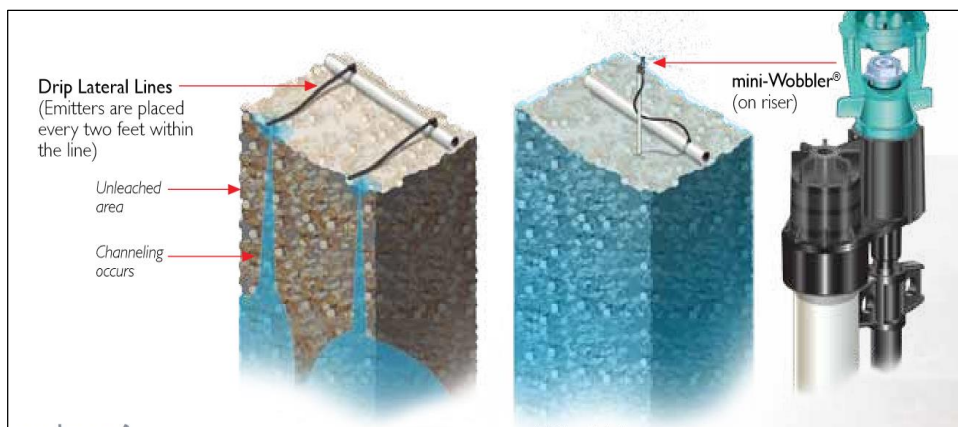


Figura 28. Comparación gotero y aspersión
Fuente: (Senninger)

4.1.1.5 Selección del diseño de riego

Se optó por la distribución rómbica para el sistema de riego, con la ayuda del programa Winsipp de Senninger.

El programa proporciona perfiles que ilustran la uniformidad de distribución para determinar que espaciado sería el óptimo. También permite establecer un espaciado de incremento para ver cómo cambian las distribuciones de uniformidad en diferentes espaciamientos de cabeceras y filas lo que convierte en una excelente herramienta para diseñar un sistema riego.

El diseño de riego con una distribución de aspersores en forma cuadrada, nos indica que no hay una buena distribución uniforme del flujo.
(Ver figura 29)

Coeficiente de uniformidad: 86,43 %

Distribución de uniformidad: 75,48 %

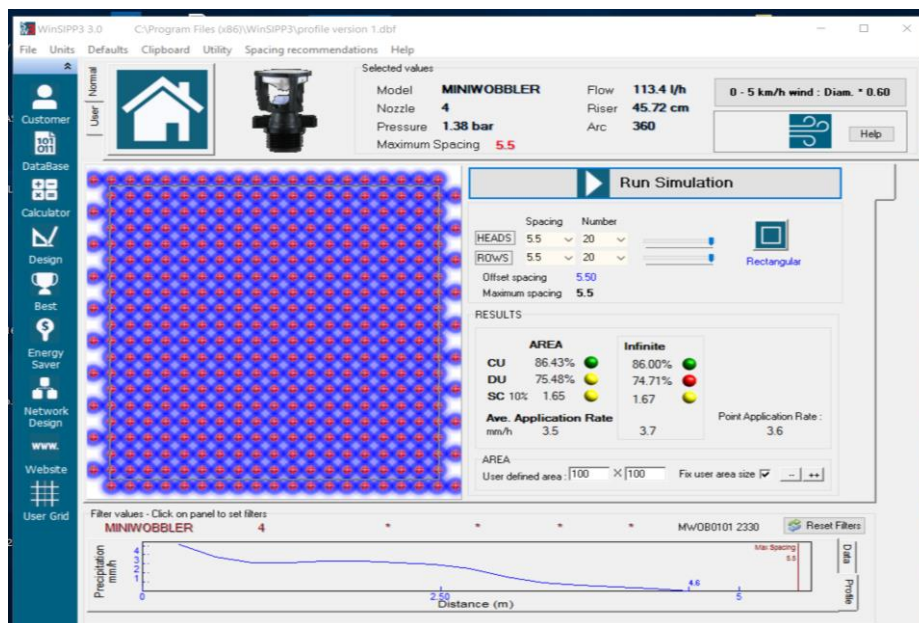


Figura 29. Diseño de riego rectangular
Fuente: Elaboración propia

El diseño de riego con una distribución de aspersores en forma rómbica, nos indica que hay una buena distribución uniforme del flujo en toda la superficie de la pila (figura 30).

Los gráficos de densidad representan la uniformidad de riego, diámetro humedecido y patrón de aplicación de un determinado perfil.

Coefficiente de uniformidad: 90,93 %

Distribución de uniformidad: 85,86 %

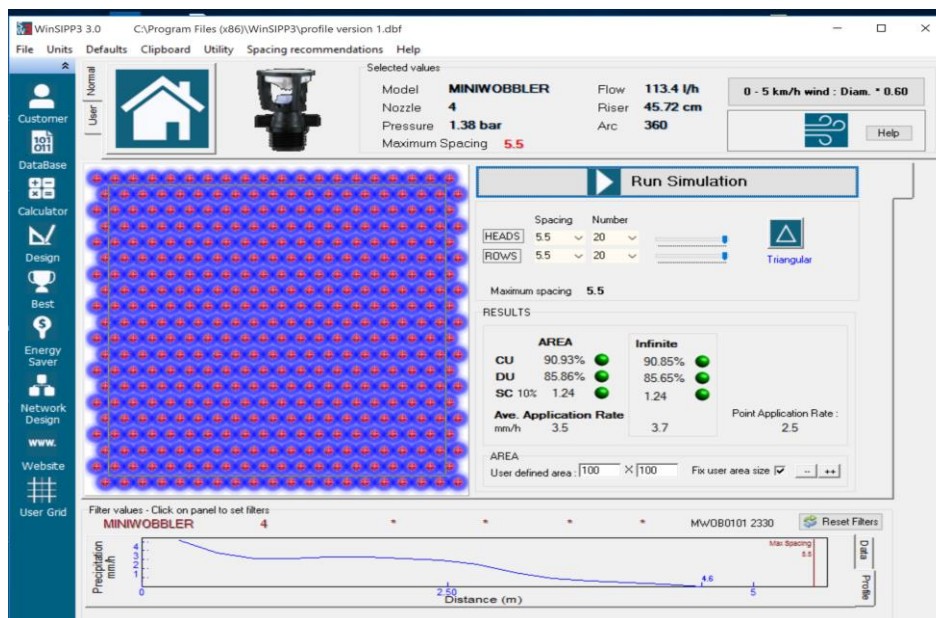


Figura 30. Diseño de sistema de riego rómbica
Fuente: Elaboración propia

Área de riego de los aspersores en los dos diseños de riego

El diseño en forma rómbica tiene un área de riego: 164,54 m²

El diseño en forma cuadrada tiene un área de riego: 160,98 m²

(Ver figura 31)

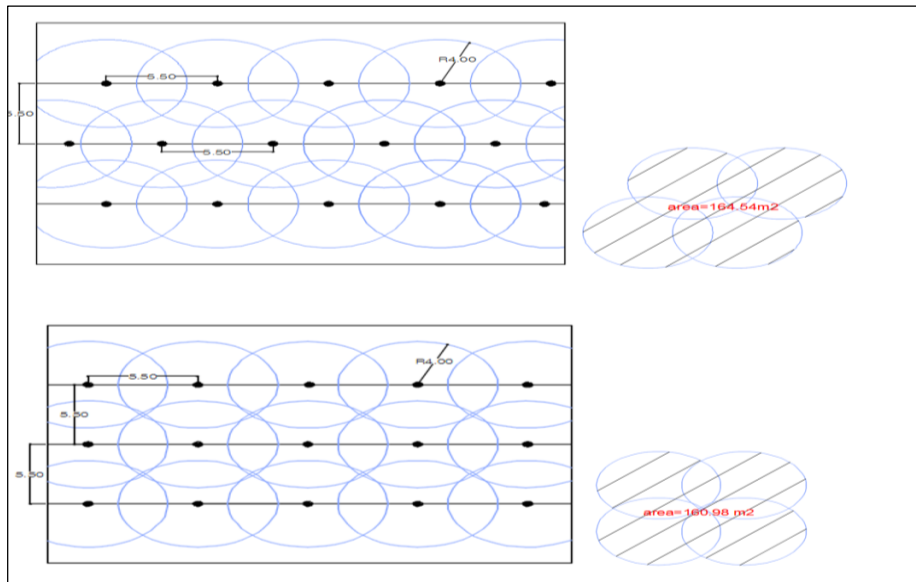


Figura 31. Áreas de riego en forma rómbica y cuadrada
Fuente: Elaboración propia

El espaciamento óptimo entre líneas y de cada aspersor es de 5,5 m

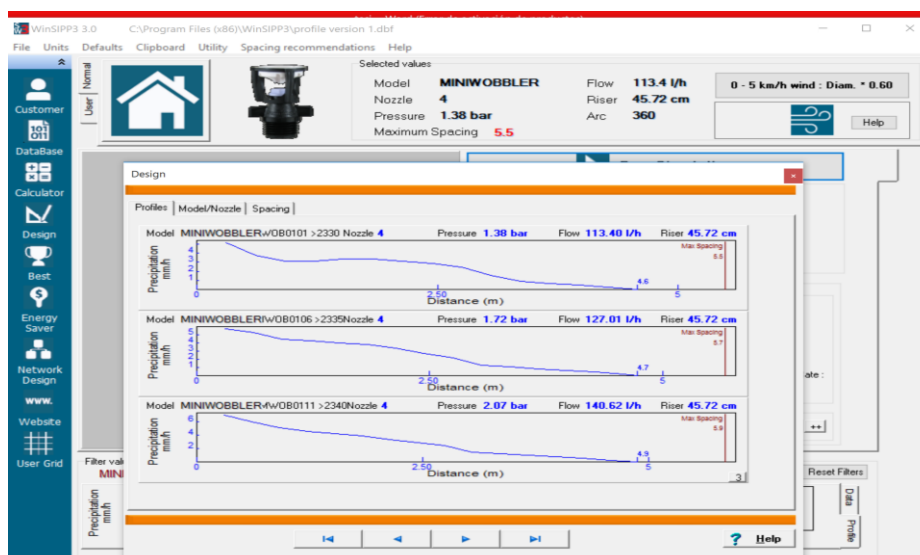


Figura 32. Esquema de cantidad de solución aplicada a varios intervalos, así como el radio de alcance
Fuente: Elaboración propia

Una ilustración del densograma de riego en 3D

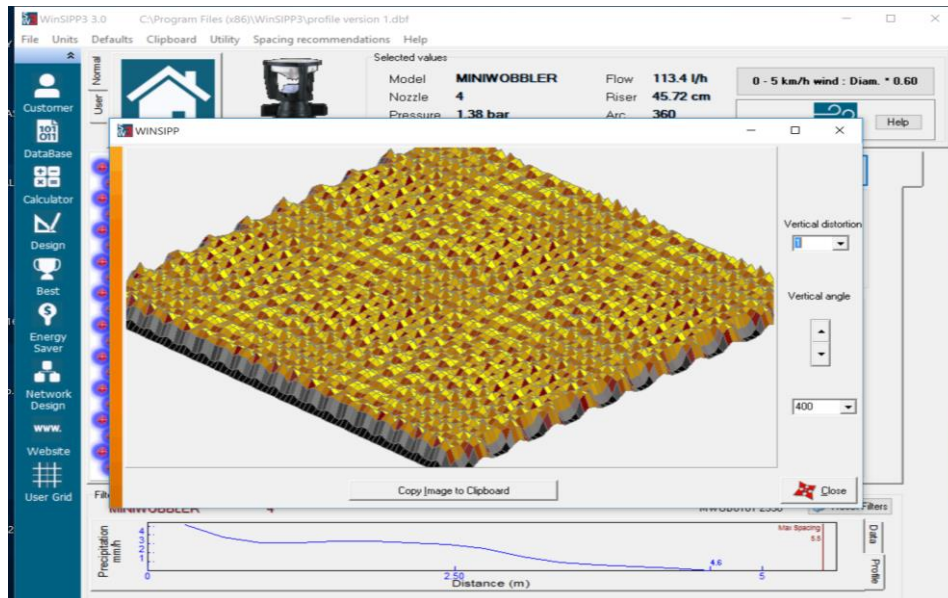


Figura 33. Aplicación de riego en 3D
Fuente: Elaboración propia

En la figura 34, selecciona 100 aspersores basados en la distribución de uniformidad en la base de datos en función del espaciado entre cabeceras y filas. Sí ha seleccionado un aspersor, esto permitirá ordenar de mejor a peor lo que haya elegido.

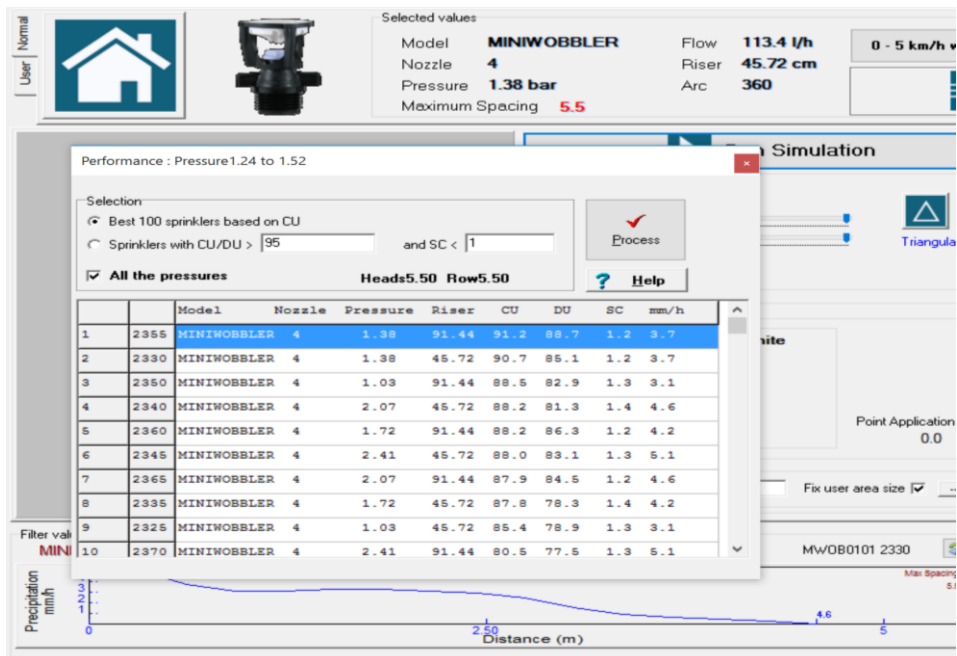


Figura 34. Diseño de aspersores para ordenar mejor los parámetros
 Fuente: Elaboración propia

Esta herramienta se utiliza para generar diseños de aspersores seleccionados, utilizados en la simulación inicial, se puede establecer la presión, ubicar válvulas y revisar el flujo lateral (figura 35).

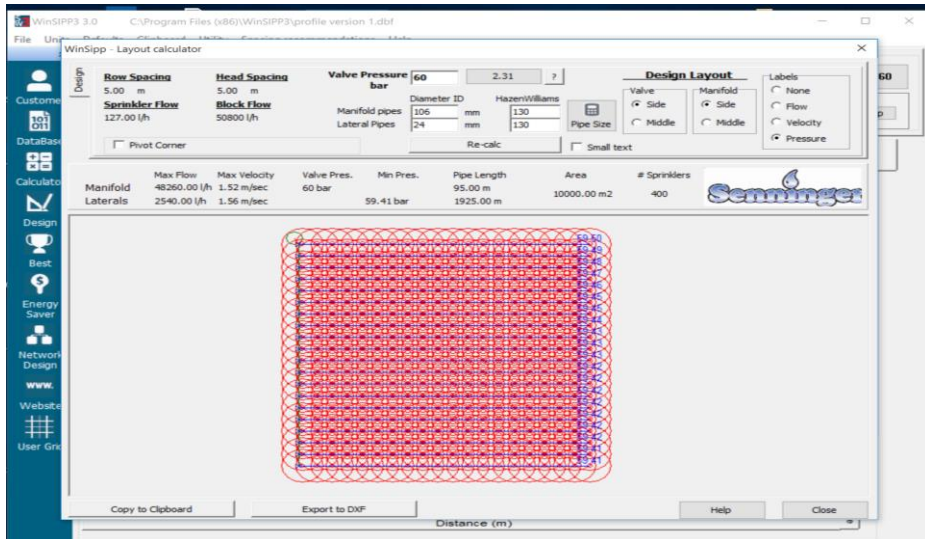


Figura 35. Diseño de riego para mejorar los parámetros
Fuente: Elaboración propia

4.1.1.6 Calculo de área de riego por cada aspersor

Caudales proporcionados por el programa Senninger

Tabla 6
Caudales

	CAUDALES	UNIDADES
Q1	94	l/h
Q2	114	l/h
Q3	127	l/h
Q4	140	l/h

Fuente: Elaboración propia

- **Área de riego:**

$$A = \pi D^2 / 4 \quad [8]$$

Donde:

A= área

D= espaciamento entre aspersores

Espaciamento entre aspersores: 5,5 m

Entonces el área: 23,76 m²

- **Tasa de riego**

$$T = Q/A \quad [9]$$

Donde:

T= tasa de riego,

Q=flujo

A=área de riego

Flujo de riego: 114L/h

Área: 23,76 m²

Entonces la tasa de riego: 4,8L/m²h

Como resultado de las pruebas de simulación, se obtienen los siguientes parámetros de operación.

Flujo de riego: 114L/h

Tasa de riego: 4,8L/m²h

Espaciamiento entre aspersores: 5,5 m

- **Distancia por cada Aspersor**



Figura 36. Distancia entre cada aspersor
Fuente: Elaboración propia

4.1.1.7 Sistema de drenaje para el PLS

Una buena instalación del sistema de drenaje (los drenaflex), permite controlar el nivel freático dentro de la pila. Estas transportan la solución rica (PLS) hasta el sistema de evacuación como se muestra en la figura 37.



Figura 37. Recolección de PLS
Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

El diseño de riego en forma rómbica, tiene mejor área de riego y mejor distribución de uniformidad en toda la superficie de la pila.

Se determinó un flujo de 114L/h, como mejor resultado para cada aspersor que irriga un diseño de espaciamiento de 5,5 metros entre emisores y la tasa de riego de 4,8L/m²h.

Para optimizar la recuperación de cobre en pilas de lixiviación, la permeabilidad es una condición de operación muy importante porque mejora las condiciones de riego; como una buena percolación, minimizando los empozamientos y canalizaciones.

El sistema de riego por aspersión requiere menos horas-hombre que en la instalación del sistema por goteo. También requiere menor mantenimiento y monitoreo con respecto al de goteo.

RECOMENDACIONES

Se debe evitar altas densidades de riego que provocan capas freáticas e inundaciones localizadas, así también como canalizaciones, diluciones, deslizamientos y derrumbes de la pila.

Realizar mantenimiento continuo de estadíos de lixiviación, tuberías y accesorios de riego (abrazaderas, niples, reductores de presión, aspersores, etc).

Para la preparación para la carpeta, la recomendación, es que se implemente como procedimiento rutinario el empleo de una motoniveladora para efectuar el perfilamiento superficial y terminación final de la cancha de lixiviación previa a la carga de una nueva pila.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez Perez, A. (2010). Diseño, proceso de cultivo y riego. México.
- Bartlett, R. (1993). Solution mining, leaching and fluid, recovery minerals.
- Bustamante, R. (2015). Evaluación metalúrgica de lixiviación con ácido sulfúrico de mineral oxidado de cobre de la mina Antapaccay. Arequipa, Perú: UNSA.
- Dhawan, N., Zafarzadeh, M., Miller, J., & Moats, M. (2012). Insights into Heap Leach Technology. Seattle. U.S.A: SME Annual Meeting.
- Domic, E. (2001). Hidrometalurgia. Fundamentos, procesos y aplicaciones. Santiago Chile.
- E. Bard, J. C. (2004). Aspectos geotécnicos en el diseño de pilas y botaderos de ripios lixiviados.
- Hashemzadehfini, M., & Ghaffari, N. (2012). The Effect to Heap Height and Particle Size on the Copper Recovery and Acid Consumption. International Mineral Processing Conference, (p. 7). Nueva Delhi. India.
- Kane, O. (2000). Demonstration of the Application of Unsaturated Zone Hydrology for Heap Leach Optimization. O'Kane Consulting Inc, 43.

- King, M., Davenport, W.G., Schlesinger, M., & Biswas, A. (2011).
Hidrometallurgical Copper Extaction Pág. 281-322.
- Lidell, K. (2005). Shrinking core model in hidrometallurg.
- Lopez Alfaro, E. J. (2012). Estudio de la permeabilidad de materiales depositados en pilas de lixiviación. Santiago, Chile.
- Miller, G., & Newton, T. (1999). Copper Heap Leach Testing: Interpretation and Scale. 27.
- Milzarek, M., Banerjee, M., Yao, T., & Keller, J. (2013). Ore Permeability Methods of Evaluation and Application to Heap Leach Optimization. Vancouver Canadá.
- Mimica, C. (2002). Criterios vigentes para el diseño de circuitos de lixiviación de minerales de cobre en pilas. Santiago: Universidad de Chile.
- Olivares Donoso, H. (2013). Lixiviación columnar de minerales mixtos de cobre de baja ley con alto contenido de impurezas. Valparaiso, Chile.
- Peterson, J., & Dixon, D. (2007). Modeling and Optimization of Heap Bioleach Processes pags. 153-175.

Schmidt, (2001). Criterios de diseño de un proceso hidrometalúrgico para minerales de cobre oxidado. Santiago: Universidad de Chile.

Senninger, Irrigation (1970). Guía de lixiviación en pilas..

Silva, H. (1999). Aplicacion de un modelo cinético para la lixiviación de minerales oxidados de cobre.

Surco, Álvarez, M. (2012). Optimización del proceso de aglomeración y lixiviación en una planta de lixiviación de cobre. Lima, Peru.

ANEXOS



Fuente: Google Earth