

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**“EFECTOS DEL USO DE GEOMEMBRANA COMO COBERTURA  
IMPERMEABLE EN PILAS DE LIXIVIACIÓN”**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO CIVIL**

**NANCY JAQUELINE TAFUR CENTENO**

**Lima- Perú**

**2015**

## INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE GRÁFICAS</b> .....	<b>9</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS</b> .....	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO I: GENERALIDADES</b> .....	<b>13</b>
1.1. UBICACIÓN .....	13
1.2. ANTECEDENTES .....	13
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.4. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS .....	14
1.4.1. Objetivo principal .....	14
1.4.2. Objetivos específicos .....	14
1.5. INSTALACIONES DEL PROYECTO .....	15
1.5.1. Plataforma de lixiviación .....	15
1.5.2. Pila de lixiviación .....	16
1.5.3. Pozas de procesos (PLS e ILS) .....	16
1.5.4. Poza Raincoats .....	17
1.5.5. Poza de emergencias .....	17
1.5.6. Planta de tratamiento .....	17
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
2.1. LIXIVIACIÓN EN PILAS .....	19
2.1.1. Definición .....	19
2.1.2. Tipos de pilas de lixiviación .....	19
2.1.3. Descripción del proceso de lixiviación en pilas .....	20
2.2. COBERTURA IMPERMEABLE .....	25
2.2.1. Definición .....	25
2.2.2. Ventajas de su uso .....	25
2.2.3. Aplicación de cobertura impermeable .....	26
2.2.4. Materiales para cobertura impermeable .....	27
2.3. FACTORES HIDROLÓGICOS .....	29
2.3.1. Precipitación .....	29
2.3.2. Formas de precipitación .....	29

2.3.3. Medición de la precipitación .....	30
2.3.4. Evaporación .....	30
2.3.5. Medición de la evaporación .....	31
2.4. MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS HIDROLÓGICOS .....	31
2.4.1. Análisis de doble masa .....	31
2.4.2. Método del vector regional .....	32
<b>CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA .....</b>	<b>34</b>
3.1. PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL .....	35
3.1.1. Procesamiento de la información .....	35
3.1.2. Precipitación de diseño .....	42
3.2. EVAPORACIÓN TOTAL MENSUAL .....	47
3.2.1. Procesamiento de la información .....	47
3.2.2. Evaporación de diseño .....	50
<b>CAPÍTULO IV: APLICACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO .....</b>	<b>53</b>
4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO PARA EL BALANCE DE AGUAS .....	53
4.2. DATOS DE ENTRADA PARA EL ANÁLISIS .....	55
4.2.1. Datos hidrológicos .....	55
4.2.2. Parámetros de operación .....	56
4.3. APLICACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	58
4.3.1. Tendencia del balance de aguas .....	58
4.3.2. Volumen total almacenado .....	60
4.3.3. Demandas de agua fresca .....	62
4.3.4. Descargas de agua del sistema .....	66
4.3.5. Planta de tratamiento .....	69
4.3.6. Volumen de poza Raincoats .....	69
4.4. ESTIMACIÓN DE COSTOS .....	70
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>72</b>
5.1. CONCLUSIONES .....	72
5.2. RECOMENDACIONES .....	74
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>77</b>

## RESUMEN

El presente Informe de Suficiencia muestra una síntesis del nuevo sistema de cobertura impermeable de geomembrana que está siendo utilizado en la mayoría de las pilas de lixiviación ubicadas en zonas lluviosas de nuestra región, así como los beneficios de su uso durante la etapa de operación de estas estructuras.

Además, para analizar el efecto del uso de estas oberturas impermeables, se presentan los resultados del balance de aguas realizado al sistema de manejo de flujos de una pila de lixiviación ubicada en el departamento de Cusco, para 4 escenarios como son: el primer caso sin utilizar ningún tipo de revestimiento sobre la superficie de la pila de lixiviación y los otros tres casos utilizando porcentajes de revestimiento con cobertura impermeable de geomembrana de 30, 50 y 80%.

El objetivo de analizar 4 escenarios ha sido con la finalidad de evaluar la variación del balance de aguas y establecer, en base a los resultados obtenidos, el porcentaje de revestimiento de geomembrana que permita optimizar los costos de operación para los 10 años de funcionamiento de la pila de lixiviación en estudio.

Para el análisis de los resultados obtenidos del balance de aguas se evaluaron la variación del flujo de agua en el sistema (tendencia del balance), el volumen de almacenamiento total (que condiciona el dimensionamiento de la poza de emergencias), la demanda de agua fresca en el sistema (requerido para continuar con el riego de la pila de lixiviación), y la descarga de agua del sistema al medio ambiente (para el dimensionamiento de la planta de tratamiento y estimación de los volúmenes de agua que deberán ser tratados), los cuales han sido cuantificados en términos económicos para alcanzar los objetivos del presente informe.

En el capítulo I se presenta los antecedentes, planteamiento del problema y los objetivos que se persiguen en el presente informe, así como los aspectos más resaltantes del proyecto del que forma parte la pila de lixiviación en estudio, como son su ubicación, capacidad de almacenamiento, estructuras complementarias para su operación, entre otros.

El capítulo II refiere al marco teórico donde se enuncia los conceptos y tipo de operación de las pilas de lixiviación y la cobertura impermeable de geomembrana, así como definiciones de los parámetros hidrológicos requeridos para el desarrollo del presente informe.

El capítulo III comprende la caracterización climática de la zona en donde se ubica la pila de lixiviación en estudio, desarrollada en base a los datos de precipitación y evaporación de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de influencia, con información del SENAMHI.

El capítulo IV corresponde a la aplicación del caso de estudio, que incluye el desarrollo del balance de aguas de la pila de lixiviación para los 4 escenarios establecidos, así como un análisis comparativo entre estos, y la estimación de los costos operativos.

En el capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones del informe efectuado que permite extender nuestro conocimiento para seguir con la aplicación de este nuevo sistema de cobertura impermeable de geomembrana sobre las pilas de lixiviación.

## LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 1.1:	Años de operación y áreas impactadas de la plataforma de lixiviación .....	16
Cuadro N° 1.2:	Volumen y capacidad por fase de la pila de lixiviación .....	16
Cuadro N° 2.1:	Aplicación de coberturas Impermeables en pilas de lixiviación .....	26
Cuadro N° 2.2:	Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de geomembranas .....	28
Cuadro N° 3.1:	Estaciones meteorológicas .....	34
Cuadro N° 3.2:	Estaciones meteorológicas para caracterizar la precipitación .....	35
Cuadro N° 3.3:	Precipitaciones medias anuales y principales parámetros del vector regional .....	40
Cuadro N° 3.4:	Precipitación total mensual de la estación Chinchayllapa completada con registros de la estación Orcopampa .....	42
Cuadro N° 3.5:	Precipitación total mensual asignada al área del proyecto .....	45
Cuadro N° 3.6:	Estaciones meteorológicas para caracterizar la evaporación .....	47
Cuadro N° 3.7:	Evaporación total mensual asignada al área del proyecto .....	50
Cuadro N° 4.1:	Parámetros de operación .....	57
Cuadro N° 4.2:	Volumen total almacenado en el sistema .....	61
Cuadro N° 4.3:	Demandas de agua fresca al sistema .....	64
Cuadro N° 4.4:	Descarga de agua del sistema .....	67
Cuadro N° 4.5:	Dimensionamiento de la planta de tratamiento .....	69
Cuadro N° 4.6:	Dimensionamiento de la poza Raincoats .....	69
Cuadro N° 4.7:	Costo estimado .....	71

## LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1:	Revestimiento de la plataforma de lixiviación .....	21
Figura N° 2.2:	Construcción del sistema de colección de solución .....	21
Figura N° 2.3:	Conformación de la pila de lixiviación .....	23
Figura N° 2.4:	Sistema de riego .....	23
Figura N° 2.5:	Componentes para el proceso de Lixiviación .....	24
Figura N° 2.6:	Disposición de la cobertura impermeable .....	25
Figura N° 3.1:	Ubicación de las estaciones meteorológicas .....	34
Figura N° 3.2:	Isoyetas de precipitación anual .....	44
Figura N° 4.1:	Diagrama esquemático del modelo del balance de aguas .....	54

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica N° 3.1:	Variación de la precipitación anual de la estación Andahua ...	36
Gráfica N° 3.2:	Variación de la precipitación anual de la estación Antabamba .....	37
Gráfica N° 3.3:	Variación de la precipitación anual de la estación Chinchayllapa .....	37
Gráfica N° 3.4:	Variación de la precipitación anual de la estación Coracora ...	38
Gráfica N° 3.5:	Variación de la precipitación anual de la estación Orcopampa .....	39
Gráfica N° 3.6:	Variación de la precipitación anual de la estación Santo Tomás .....	39
Gráfica N° 3.7:	Método del vector regional .....	40
Gráfica N° 3.8:	Resultados del análisis de doble masa .....	41
Gráfica N° 3.9:	Variación de la precipitación anual asignada al área del proyecto .....	46
Gráfica N° 3.10:	Variación de la evaporación anual de la estación Antabamba	48
Gráfica N° 3.11:	Variación de la evaporación anual de la estación Coracora....	49
Gráfica N° 3.12:	Variación de la evaporación anual de la estación Pauza .....	49
Gráfica N° 3.13:	Variación de la evaporación anual asignada al área del proyecto .....	52
Gráfica N° 4.1:	Tendencia del balance de agua - Escenario 1: Sin cobertura impermeable.....	58
Gráfica N° 4.2:	Tendencia del balance de agua - Escenario 2: 30% de cobertura impermeable.....	59
Gráfica N° 4.3:	Tendencia del balance de agua - Escenario 3: 50% de cobertura impermeable.....	59
Gráfica N° 4.4:	Tendencia del balance de agua - Escenario 4: 80% de cobertura impermeable.....	60
Gráfica N° 4.5:	Demanda de agua fresca - Escenario 1: Sin cobertura impermeable.....	62
Gráfica N° 4.6:	Demanda de agua fresca - Escenario 2: 30% de cobertura impermeable.....	63
Gráfica N° 4.7:	Demanda de agua fresca - Escenario 3: 50% de cobertura impermeable.....	63

Gráfica N° 4.8: Demanda de agua fresca - Escenario 4: 80% de cobertura impermeable.....	64
Gráfica N° 4.9: Descarga de agua del sistema - Escenario 1: Sin cobertura impermeable.....	66
Gráfica N° 4.10: Descarga de agua del sistema - Escenario 2: 30% de cobertura impermeable.....	67
Gráfica N° 4.11: Descarga de agua del sistema - Escenario 3: 50% de cobertura impermeable.....	67

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

<b>%</b>	:	Porcentaje
<b>°</b>	:	Grado angular (Ángulo plano)
<b>'</b>	:	Minuto Angular (Ángulo plano)
<b>"</b>	:	Segundo angular (Ángulo plano)
<b>cm</b>	:	Centímetro
<b>día</b>	:	Día
<b>g/t</b>	:	Gramos por tonelada
<b>h</b>	:	Hora
<b>ha</b>	:	Hectárea (área)
<b>Km</b>	:	Kilómetro
<b>m</b>	:	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	:	Metro cuadrado (área)
<b>m<sup>3</sup></b>	:	Metro cúbico (volumen)
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	:	Metro cúbico por hora (caudal)
<b>mm</b>	:	Milímetro
<b>msnm</b>	:	Metros sobre el nivel del mar
<b>Mt</b>	:	Millón de tonelada métrica
<b>oz</b>	:	Onza
<b>t</b>	:	Tonelada métrica
<b>t/ m<sup>3</sup></b>	:	Tonelada métrica por metro cúbico
<b>t/día</b>	:	Tonelada métrica por día
<b>Tr</b>	:	Periodo de retorno
<b>s</b>	:	Segundo
<b>SI</b>	:	Sistema Internacional de Unidades

## INTRODUCCIÓN

El uso de las pilas de lixiviación para la extracción de metales diseminados o en bajas concentraciones se ha convertido en uno de los métodos más utilizados en los últimos tiempos, debido al incremento de la explotación minera a tajo abierto y a las ventajas que se obtienen de este proceso conforme se trabajan mayores volúmenes de material.

Hasta antes de la década de los 80, durante la etapa de operación de las pilas de lixiviación no se consideraba la colocación de ningún tipo de cobertura sobre su superficie, en consecuencia en las pilas de lixiviación ubicadas en zonas lluviosas se generaban sobrecostos elevados, debido al ingreso de las aguas de lluvia al sistema de manejo de flujos de la pila y al incremento de aguas en exceso que debían descargarse al medio ambiente, previo tratamiento.

Tomando en cuenta la información anterior, la unidad minera propietaria de la pila de lixiviación en estudio, ubicada en el departamento de Cusco, con la finalidad de optimizar sus costos durante los 10 años de operación de esta estructura y reducir, dentro de lo posible, la descarga de flujos al medio ambiente en beneficio al cumplimiento de las metas del estudio de impacto ambiental, está considerando utilizar esta cobertura impermeable de geomembrana sobre la superficie de su pila de lixiviación.

El presente Informe de Suficiencia responde a esta necesidad siendo importante antes realizar una evaluación de la variación del balance de aguas para el uso de diferentes porcentajes de cobertura impermeable, y luego establecer el porcentaje de revestimiento que permita optimizar los costos para la etapa de operación de esta estructura.

Para determinar lo antes mencionado se ha realizado la caracterización climática de la zona en estudio en base a la información meteorológica del SENAMHI, y posteriormente se ha elaborado el balance de aguas para los 4 escenarios propuestos, para finalmente cuantificar los resultados obtenidos en términos económicos.

## **CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

### **1.1. UBICACIÓN**

El proyecto del que forma parte la pila de lixiviación en estudio se encuentra ubicado en el anexo de Tambo Wancarama, distrito de Santo Tomas, Provincia de Chumbivilcas, en el Departamento de Cusco, aproximadamente a 345 km al noroeste de la ciudad de Arequipa y a una altitud aproximada de 4700 y 5200 msnm. En el Anexo A se presenta el plano de ubicación de la zona en estudio.

### **1.2. ANTECEDENTES**

La tecnología de las pilas de lixiviación se ha desarrollado ampliamente a partir de la década de los 70, y desde hace 35 años se está impulsando la mejora de los procesos de operación de este tipo de estructuras. En base a lo anterior en el año 1980 en Costa Rica se ha utilizado por primera vez a la geomembrana como cobertura impermeable colocado sobre la superficie de la pila, obteniéndose como resultado una reducción de los costos operativos.

La unidad minera del que forma parte la pila de lixiviación en estudio tiene un yacimiento de oro y plata que será explotado a tajo abierto. El yacimiento se encuentra emplazado en rocas de origen volcánico, conformado por coladas volcánicas, tobas y aglomerados para una reserva combinada de mineral de 26.1 Mt con una ley de tratamiento de 0.46 g/t de oro y 39.44 g/t de plata.

La extracción de este yacimiento y procesamiento del mineral para la recuperación de los metales valiosos en la pila de lixiviación será a un ritmo de 4500 y 8500 t/día. La vida esperada de las operaciones desde el comienzo de la puesta en marcha es de aproximadamente 10 años y durante este tiempo, un total de 338 799 oz-t de oro (Au) y 12 708 658 oz-t de plata (Ag) deberá ser producidas.

Para la operación de la pila de lixiviación dentro del proyecto ha sido necesaria la configuración de una plataforma de lixiviación, planta de procesos, planta de tratamiento, pozas de operación para los procesos de lixiviación de oro y plata, poza de emergencias, campamentos, accesos y demás estructuras.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las diferentes experiencias en operaciones mineras con pilas de lixiviación nos indican que el ingreso de las aguas de lluvia al sistema de manejo de flujos reduce la eficiencia del proceso de recuperación de metales, e incrementa los costos relacionados al tratamiento de agua, originando un incremento considerable de los costos de operación.

Razón por lo que en la etapa de diseño de la pila de lixiviación en estudio, la unidad minera propietaria de esta estructura ha considerado el uso de esta cobertura impermeable, dado que de acuerdo a la información meteorológica se presentan precipitaciones que podrían incrementar los costos para los 10 años de operación.

### **1.4. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS**

#### **1.4.1. Objetivo principal**

Evaluar el efecto del uso de cobertura impermeable sobre la pila de lixiviación, cuantificando las variaciones de los resultados del balance de aguas para diferentes porcentajes de cobertura impermeable sobre la pila de lixiviación en estudio, con la finalidad de determinar el porcentaje óptimo para un escenario favorable en términos económicos.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Realizar y analizar el Balance de Aguas para diferentes escenarios empleando diferentes porcentajes de cobertura impermeable.
- Estimar las descargas y demandas de agua del sistema de manejo de flujos para cada escenario evaluado.
- Determinar la capacidad de la planta de tratamiento para cada escenario estudiado.
- Establecer una tendencia de la variación de los costos para los diferentes escenarios estudiados.

## 1.5. INSTALACIONES DEL PROYECTO

Para el desarrollo del presente Informe de Suficiencia se ha utilizado información de un proyecto minero ubicado al sur del Perú, el cual para la recuperación de metales valiosos considera la construcción de una plataforma de lixiviación, pila de lixiviación, planta de procesos, pozas de procesos y poza de emergencias. Además, de una poza encargada de coleccionar los flujos provenientes de la cobertura impermeable, denominada de aquí en adelante poza Raincoats, y una la planta de tratamiento, las cuales deberán ser configuradas en base a los resultados del balance de aguas para los diferentes escenarios estudiados. En el Anexo A (Plano 02) se presenta el arreglo general de las instalaciones antes mencionadas y a continuación la descripción de cada una de estas.

### 1.5.1. Plataforma de lixiviación

La plataforma de lixiviación abarca un área total de 41.1 ha y está configurada en 3 fases para un periodo de 10 años, de acuerdo a los planes de operación de la unidad minera; para aislar el suelo natural de todo el proceso hidrometalúrgico y asegurar la contención de la solución lixiviada, se encuentra revestida con una lámina de geomembrana de polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) de 2,0 mm de espesor, dispuesto sobre una capa de suelo de baja permeabilidad de 30 cm de espesor, que actúa como contingencia en caso de un posible desgarramiento o daño en la geomembrana.

La superficie de nivelación de la plataforma está diseñada para tener una pendiente mínima de 2% en la parte más baja, y de esta manera garantizar el drenaje efectivo de la solución lixiviada mediante tuberías principales de colección que convergen en la caja de distribución. La solución captada será derivada posteriormente por gravedad mediante tuberías sólidas hacia las pozas de procesos para finalmente ser conducida a la planta de procesos para la recuperación del metal. En el Anexo A (Plano 03) se presenta la superficie de nivelación de la plataforma de lixiviación, y en el Cuadro N° 1.1 las áreas impactadas y los años de operación por cada fase establecida para esta estructura.

**Cuadro N° 1.1: Años de operación y áreas impactadas de la plataforma de lixiviación**

Fases	Área impactada ( m <sup>2</sup> )	Años de Operación (años)
Fase 1	170 000	2.5
Fase 2	118 000	3.0
Fase 3	123 000	4.5
<b>Total</b>	<b>411 000</b>	<b>10.0</b>

Fuente: Unidad Minera propietaria del Proyecto en estudio

### 1.5.2. Pila de lixiviación

La pila de lixiviación está configurada sobre la plataforma de lixiviación y deberá ser efectuada empleando bancos de 8 m de altura, con taludes intermedios de 1.4H:1V, y anchos de banquetas de 9.05 m, que definen un talud global de 2.5H:1V, hasta alcanzar 95 m de altura y 26.1 millones de toneladas de capacidad.

En el Cuadro N° 1.2 se muestra las capacidades de almacenamiento por cada fase de material apilado.

**Cuadro N° 1.2: Volumen y capacidad por fase de la pila de lixiviación**

Fases	Volumen de almacenamiento ( m <sup>3</sup> )	Capacidad de almacenamiento ( t )	Capacidad de almacenamiento acumulado ( t )
Fase 1	2 810 959	4 104 000	4 104 000
Fase 2	5 696 233	8 316 500	12 420 500
Fase 3	9 396 575	13 719 000	26 139 500
<b>Total</b>	<b>17 903 767</b>	<b>26 139 500</b>	<b>26 139 500</b>

Fuente: Unidad Minera propietaria del Proyecto en estudio

Además, en el Anexo A (Planos 04, 05 y 06) se presenta la vista en planta y secciones de la pila de lixiviación por cada Fase.

### 1.5.3. Pozas de procesos (PLS e ILS)

Las pozas de procesos PLS (Pregnant Leach Solution) también denominada poza de Solución Rica, e ILS (Intermediate Leach Solution) denominada en adelante como poza de Solución Intermedia, están diseñadas para una capacidad de operación de 15 260 y 15 290 m<sup>3</sup>, respectivamente.

El diseño de estas pozas ha sido realizado considerando una producción de solución a una tasa de diseño de 480 m<sup>3</sup>/h, pérdidas de solución lixiviada durante los procesos de regado, y tiempo de parada de bombas (24 horas aproximadamente) en caso de un evento imprevisto. El nivel máximo de operación de las pozas PLS e ILS es de 4997 y 4996.90 msnm, respectivamente, teniendo ambas una altura de flujo de solución de 9.50 m aproximadamente y un borde libre de 1.50 m.

#### **1.5.4. Poza Raincoats**

La poza Raincoats será dimensionada en base a las características climatológicas del área del proyecto y al porcentaje de cobertura impermeable (raincoats) establecido para los diferentes escenarios en estudio.

Esta poza tendrá la función de coleccionar y almacenar los flujos de agua provenientes de la cobertura impermeable ubicada sobre la superficie de la pila de lixiviación, durante los eventos de precipitaciones pluviales. Además, debido a que es la encargada de coleccionar flujos de agua que no han tenido contacto con el material lixiviado, denominadas en adelante aguas de no contacto, pueden descargar su contenido al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento previo.

#### **1.5.5. Poza de emergencias**

La poza de emergencias está diseñada para coleccionar los flujos excedentes provenientes de las pozas de procesos (PLS e ILS) debido a los grandes eventos de tormenta y a los flujos excedentes de agua durante la etapa de operación de la mina. Para el análisis se ha considerado una capacidad de operación de 105 000 m<sup>3</sup>.

#### **1.5.6. Planta de tratamiento**

El proceso de lixiviación para la recuperación de metales valiosos (para este caso oro y plata) se realiza en un circuito cerrado manteniendo una cantidad casi constante de solución a lixiviar (para este caso solución cianurada) sin embargo esto cambia cuando llega la temporada de lluvias ingresando agua de lluvia al circuito, por esta razón es necesario desalojar el volumen de agua excedente para mantener un adecuado balance de aguas y prevenir posibles reboses de la solución lixiviada al medio ambiente. Para realizar la descarga del efluente al

medio ambiente, el exceso de agua es procesada en la planta de tratamiento y luego descargadas al medio ambiente.

El dimensionamiento de la capacidad de la planta de tratamiento y lo periodos de utilización serán determinados en función al porcentaje de cobertura impermeable establecido para los diferentes escenarios en estudio.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. LIXIVIACIÓN EN PILAS**

#### **2.1.1. Definición**

La Lixiviación es un proceso de carácter hidrometalúrgico que consiste en la obtención o extracción de minerales o metales valiosos como el oro, cobre, plata, vanadio, entre otros, desde los materiales que lo contienen. Para efectuar este proceso se utilizan métodos fisicoquímicos de fase líquida en donde se emplean disolventes adecuados (químicos específicos) para separar los minerales valiosos (y solubles en dichos químicos) de los no valiosos.

La lixiviación en pilas constituye una tecnología relativamente nueva que ha permitido con el paso del tiempo trabajar yacimientos con materiales de baja ley, siempre y cuando la operación minera involucre una actividad a gran escala. Es decir, la lixiviación en pilas es un proceso de recuperación que hace económico un proyecto conforme se trabajen mayores volúmenes de material.

Para efectuar el proceso de lixiviación se debe realizar una preparación adecuada y responsable del área donde se va a realizar esta actividad, esto con la finalidad de evitar impactos negativos al medio ambiente y al mismo tiempo obtener un proceso eficiente de recuperación de metales valiosos.

#### **2.1.2. Tipos de pilas de lixiviación**

##### *2.1.2.1. Pilas dinámicas*

Las pilas dinámicas también denominadas "on-off" son aquellas en donde la plataforma de lixiviación o base de la pila puede ser reutilizada luego de finalizado el proceso de lixiviación. La operación de este tipo de pila considera la remoción del material lixiviado, transporte de este material al depósito establecido por la unidad minera, y posterior acopio del nuevo material para el inicio de siguiente ciclo de recuperación de metales valiosos.

Para la configuración de esta pila se recomienda un rectángulo alargado, sin embargo se puede elegir cualquier tipo de configuración siempre y cuando esta permita la operación de los equipo de carga y descarga. Adicionalmente, para casos particulares de operaciones mayores en donde se presenta cierta rigidez

con los equipos para el transporte de materiales, se recomienda una configuración rectangular doble (dos rectángulos paralelos y adyacentes) con semicírculos en los extremos, donde se forma la pista de giro de los equipos de carguío y de descarga.

#### *2.1.2.2. Pilas permanentes*

A diferencia de las pilas dinámicas, la plataforma de lixiviación de las pilas permanentes no pueden ser reutilizadas luego de finalizado el procesos de lixiviación, por esta razón son apiladas en capas considerando que una nueva capa sólo se podrá colocar cuando haya concluido la lixiviación de la capa inferior que se debe cubrir.

La configuración de este tipo de pila puede tener cualquier geometría de acuerdo con la disponibilidad de espacio de cada lugar, sin embargo en los casos en donde no existan restricciones topográficas se recomienda una configuración rectangular.

### **2.1.3. Descripción del proceso de lixiviación en pilas**

#### *2.1.3.1. Construcción de la plataforma de lixiviación*

La construcción de esta estructura se debe realizar sobre una cimentación adecuada capaz de soportar las cargas que impondrá la pila de lixiviación final. Dentro de los trabajos a ejecutar se considera la remoción de material, con la finalidad de obtener una superficie que permitan coleccionar y conducir de manera eficiente la solución lixiviada.

Además, para evitar la contaminación ambiental del suelo natural que subyace a la plataforma, se debe construir una capa impermeable conformada por una lámina de geomembrana impermeable dispuesta sobre una capa de suelo de baja permeabilidad, ésta ultima utilizada como medida de emergencia en caso de un posible daño en la geomembrana.

En la Figura N° 2.1 se presenta el proceso constructivo de la plataforma de lixiviación. En el sector inferior se observa a la capa de suelo de baja permeabilidad y en el sector superior el sistema de revestimiento culminado con la lámina de geomembrana.



**Figura N° 2.1: Revestimiento de la plataforma de lixiviación**

Fuente: Breitenbach, (2013)

#### *2.1.3.2. Construcción del sistema de colección de solución*

La construcción del Sistema de Colección de Solución se realiza sobre la geomembrana impermeable de la plataforma de lixiviación, está conformado por un sistema de tuberías perforadas principales y una red de tuberías laterales dispuestas siguiendo el esquema denominado espina de pescado, que permiten recoger las soluciones lixiviadas que se infiltran a través del material apilado.

En la Figura N° 2.2 se presenta la disposición de las tuberías perforadas para la construcción del sistema de Colección de Solución.



**Figura N° 2.2: Construcción del sistema de colección de solución**

Fuente: Cesar, Mendoza y Parra (2014)

### 2.1.3.3. Preparación del material

Para preparar el material que se debe colocar en la pila de lixiviación, el material extraído del yacimiento minero, generalmente de tajo abierto, debe ser fragmentado mediante chancado primario, secundario y en algunos casos terciario, con el objeto de obtener un material mineralizado de tamaño máximo de 1.5 a  $\frac{3}{4}$  de pulgada, suficiente para dejar expuesto los minerales valiosos a la infiltración de la solución disolvente y obtener un procesos de separación más eficiente y rápido.

### 2.1.3.4. Transporte del material a la plataforma de lixiviación

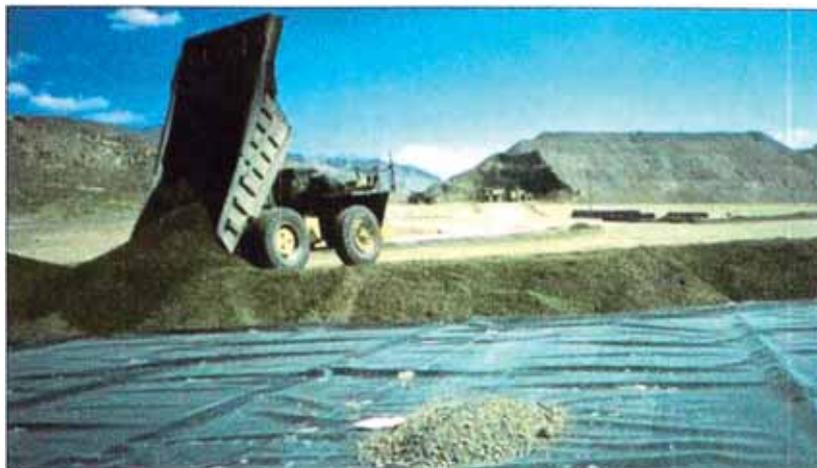
Posterior al chancado, el material preparado debe ser llevado y dispuesto adecuadamente sobre la plataforma de lixiviación a través de volquetes gigantes o mediante fajas transportadoras.

### 2.1.3.5. Formación de la pila de lixiviación

Para conformar la pila de lixiviación, el material chancado debe ser acumulado sobre la geomembrana impermeable de la plataforma de lixiviación, ordenadamente configurando un terraplén continuo de 6 a 8 m de altura, con taludes de inclinación de acuerdo al ángulo de reposo del material a apilar.

Además, para alcanzar la altura de diseño y capacidad de almacenamiento de la pila para una condición estable, durante la etapa de operación se deben conformar banquetas intermedias entre los terraplenes, que deben estar dimensionadas en base al estudio de estabilidad física de la pila de lixiviación.

En la Figura N° 2.3 se presenta la forma de disposición de los vehículos para conformar la pila de lixiviación.



**Figura N° 2.3: Conformación de la pila de lixiviación**

Fuente: Breitenbach (2013)

#### 2.1.3.6. Sistema de Riego

Una vez conformados los terraplenes que constituyen la pila de lixiviación, se debe realizar la instalación de un sistema de riego por goteo o aspersores, que aplican en repetidas oportunidades y lentamente por un periodo de 45 a 60 días, una solución especial sobre la superficie del material apilado. La solución es la mezcla de químicos disueltos en agua, los cuales varían dependiendo del material que se esté utilizando y los productos a obtener, como el oro, plata, cobre, entre otros.

La solución líquida tiene la propiedad de disolver el mineral valioso y fluir con el líquido hacia el sistema de colección de solución, para finalmente ser transportados mediante tuberías hacia las pozas de procesos. En la Figura N° 2.4 se presenta el sistema de riego sobre la superficie de la pila de lixiviación.



**Figura N° 2.4: Sistema de riego**

Fuente: Breitenbach (2013)

### 2.1.3.7. Almacenaje y recuperación

Como se mencionó anteriormente, la solución lixiviada obtenida del proceso de recuperación de metales es transportada hacia las pozas de procesos, construidas y acondicionadas para almacenar estos flujos en tanto se programe su ingreso a la siguiente etapa del proceso de recuperación de metales valiosos

Para el inicio de las actividades de recuperación, la solución almacenada en las pozas de procesos, es conducida a la planta de procesos en donde los metales valiosos deben ser separados del líquido que lo contiene. Para esto, en principio se eliminan las partículas sólidas que pudiera haber sido arrastrados y que no tienen valor, para luego llevar a un procesos de recuperación y concentración a través de técnicas de precipitación, extracción por solventes-electro, entre otros, dependiendo del mineral valiosos que se quiera obtener.

Cabe indicar que al igual que se recupera mineral valioso de la solución lixiviada, también se recupera el agua involucrada en ella, la misma que es almacenada en la poza barren y que es reutilizada en los siguientes procesos de lixiviación, buscando hacer un uso más eficiente de este recurso.

En la Figura N° 2.5 se muestran los componentes típicos que forman parte del proceso de lixiviación, así como la relación que existe entre cada uno de estos.

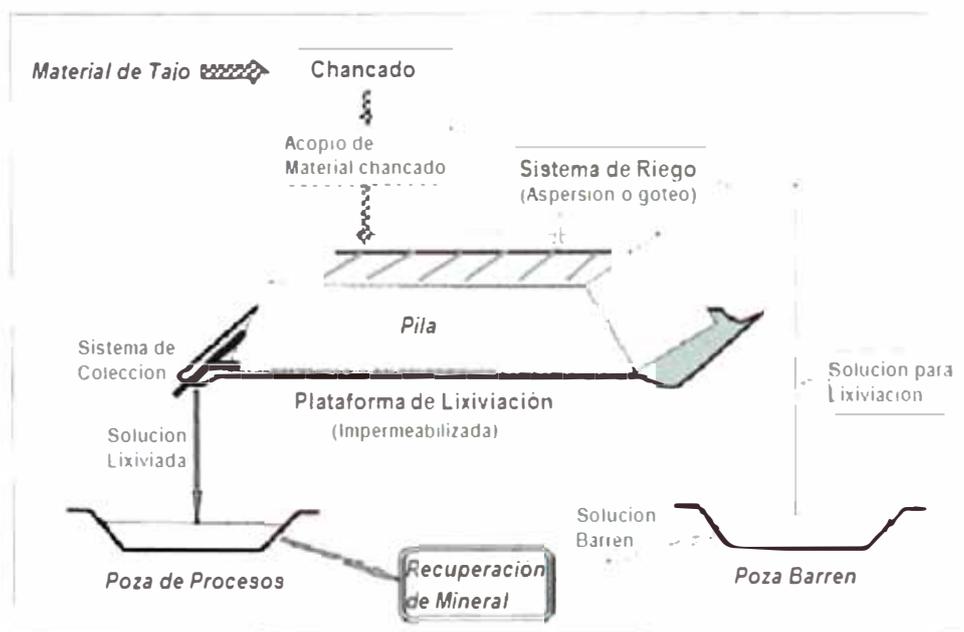


Figura N° 2.5: Componentes para el proceso de Lixiviación

## 2.2. COBERTURA IMPERMEABLE

### 2.2.1. Definición

Cobertura impermeable o raincoats es la terminología que se utiliza en la industria minera en referencia a la cubierta de geomembrana temporal, que es instalada sobre la superficie de la pila de lixiviación (banquetas y taludes), con la finalidad de reducir el ingreso de aguas de lluvia al sistema de manejo de flujos, minimizando la dilución de la solución lixiviada.

Además, de acuerdo a la configuración adoptada, la cobertura impermeable ofrece un modo eficaz para derivar el agua de lluvia que no ha tenido contacto con el material mineralizado, hacia una poza de almacenamiento denominada Raincoats, para su almacenamiento y posterior descarga al medio ambiente.

En la Figura N° 2.6 se presenta la disposición de la cobertura impermeable sobre la superficie de la pila de lixiviación.



Figura N° 2.6: Disposición de la cobertura impermeable

### 2.2.2. Ventajas de su uso

En base a las experiencias obtenidas en diferentes proyectos mineros ubicados en zonas lluviosas, en donde se ha optado por el uso de cobertura impermeable, se han identificado las siguientes ventajas:

- Manejo de aguas de lluvia óptimo, que permite la colección y almacenamiento de las aguas de lluvia en la poza Raincoats, y su posterior descarga al medio ambiente sin tratamiento previo.

- Reducción del tamaño de la planta de tratamiento, debido a la disminución del agua en exceso obtenida del proceso de recuperación de metales valiosos y que requieren ser tratadas antes de su descarga al medio ambiente.
- Reducción del volumen de almacenamiento de la poza emergencias, encargada de coleccionar los flujos en exceso de las pozas de operación durante un evento de precipitación extraordinario.
- Reducción de la migración de finos y pérdida de material apilado en los taludes debido a la erosión de la lluvia.
- Reducción de los impactos ambientales generados, debido a la reducción del agua de exceso del sistema.

### 2.2.3. Aplicación de cobertura impermeable

El uso de cobertura impermeable en la operación de las pilas de lixiviación se inicia en los años 80, como respuesta a la necesidad de optimizar los procesos de recuperación de metales y hacer viable una mayor cantidad de proyectos de este tipo.

En el Cuadro N° 2.1 se listan los principales proyectos en donde se ha utilizado este sistema de cobertura impermeable, y se han revestidos los taludes de material apilado con geomembranas de diversas características.

**Cuadro N° 2.1: Aplicación de cobertura Impermeable en pilas de lixiviación**

Fecha	Proyecto	Localización	Propietario	Descripción
1987 - 1990	Río Chiquita gold	Noroeste de Costa Rica	Río Chiquita	Primeras aplicaciones en sistemas Interlift, utilizando geomembranas de PVC de 0.5 y 0.75 mm.
1989 - 1990	Marcacona Gol	Oeste de Costa Rica	Río Heron	Colocada en una pila dinámica
1994 - 1997	Maqui Maqui Mine – Yanacocha Complex	Norte del Perú	Yanacocha Newmont	Geomembrana de HDPE de 1.0 mm y 1.5 mm, colocado en taludes inactivos.

Fecha	Proyecto	Localización	Propietario	Descripción
1994 -1997	Carachugo Gold Mine	Norte del Perú	Yanacocha Newmont	Geomembrana de HDPE de 1.0 mm y 1.5 mm, colocado en taludes inactivos
1994 -1995	Santa Rosa Gold	Panamá	Minera Santa Rosa SRK	Geomembrana de HDPE de 1.5 mm, usado épocas de lluvia
1996	Kyisintaung Copper	Norte de Myanmar	Indochina Gold Westec	Geomembrana de PVC de 0.5 mm
1998 - 2006	Gold Heap Leach	Filipinas	Philex Mines Group	Geomembrana de HDPE de 1.0 mm
1998 - 2006	Pierina Gold	Norte del Perú	Barrick	Geomembrana de HDPE de 1.0 mm a 1.5 mm, colocados en áreas y taludes inactivos.
2006	Bellavista Gold	Oeste de Costa rica	Glencairn	Geomembrana de LLDPE de 0.25 mm colocados en taludes.
2013	Lagunas Norte	Norte del Perú	Barrick	Geomembrana de HDPE de 1.0 mm a 1.5 mm, colocados en áreas y taludes inactivos.

Fuente: Breitenbach y Smith (2007)

#### 2.2.4. Materiales para la cobertura impermeable

El material utilizado en mayor medida como cobertura impermeable corresponde a la geomembrana, que puede ser de cloruro de polivinilo, polietileno de baja densidad lineal y polietileno de alta densidad lineal, en espesores que van desde 0.25 a 1.5 mm.

La geomembrana es un revestimiento o barrera sintética de muy baja permeabilidad usada para controlar la migración de fluidos en una estructura o sistema construido.

La geomembrana es utilizada principalmente como revestimiento de dispositivos de almacenamiento para líquidos y sólidos, cobertura impermeable, entre otros. Además, de acuerdo al material que lo compone puede clasificarse en:

- Geomembrana de Polietileno de alta densidad o HDPE (high polyethylene density).

- Geomembrana de Polietileno de baja densidad lineal o LLDPE (low linear density polyethylene).
- Geomembrana de cloruro de polivinilo o PVC (Poly Vinyl Chloride).

Para la selección del tipo de geomembrana para un determinado proyecto, se debe considerar las condiciones climáticas a las cuales estará sometida, la exposición ultravioleta, la sustancia que será contenida, la vida de servicio requerida y el área en donde será instalada. Adicionalmente, a modo de referencia, en el Cuadro N° 2.2 se muestran las principales ventajas y desventajas para cada tipo de geomembrana.

**Cuadro N° 2.2: Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de geomembranas**

Tipo de geomembrana	Ventajas	Desventajas
HDPE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenta alta resistencia química y resistencia a los rayos UV.</li> <li>- Permite un mejor control de calidad a las uniones por soldadura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiene un bajo nivel de flexibilidad.</li> </ul>
LLDPE	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenta gran elongación y flexibilidad.</li> <li>- Presenta mayor rango de resistencia química y mejor resistencia a los rayos UV comparado con el PVC.</li> <li>- Permite un mejor control de calidad a las uniones por soldadura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenta menor rango de resistencia química y resistencia a los rayos UV comparado con el HDPE.</li> </ul>
PVC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenta una elevada elongación y flexibilidad.</li> <li>- Presenta gran resistencia al punzonamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenta menor resistencia a los rayos UV.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

### 2.3. FACTORES HIDROLÓGICOS

Para caracterizar el clima de una determinada región, para fines de elaboración del balance de aguas, se deben determinar los siguientes parámetros hidrológicos.

#### 2.3.1. Precipitación

Se conoce como precipitación a la cantidad de agua que cae a la superficie terrestre y proviene de la humedad atmosférica, ya sea en estado líquido (llovizna y lluvia) o en estado sólido (escarcha, nieve, granizo). La precipitación es uno de los procesos meteorológicos más importantes para la hidrología, y junto a la evaporación constituyen la forma mediante la cual la atmósfera interactúa con el agua superficial en el ciclo hidrológico del agua.

#### 2.3.2. Formas de precipitación

De acuerdo a sus características físicas la precipitación puede adquirir diversas formas como producto de la condensación del vapor de agua atmosférico, formado en el aire libre o en la superficie de la tierra, siendo las más comunes las que se detallan a continuación:

- Llovizna: En algunas regiones es más conocida como garúa, consiste en pequeñas gotas de agua líquida cuyo diámetro fluctúa entre 0.1 y 0.5 mm; debido a su pequeño tamaño tienen un asentamiento lento y en ocasiones parecen que flotarán en el aire. La llovizna usualmente cae de estratos bajos y rara vez excede de 1 mm/h.
- Lluvia: Es la forma de precipitación más conocida. Consiste de gotas de agua líquida comúnmente mayores a los 5 mm de diámetro.
- Nieve: Está compuesta de cristales de hielo, de forma hexagonal ramificada y a menudo aglomerada en copos de nieve, los cuales pueden alcanzar varios centímetros de diámetro. Aparece cuando las masas de aire cargadas de vapor de agua se encuentran con otras cuya temperatura es inferior a 0°C.

- **Granizo:** Es la precipitación en forma de bolas o formas irregulares de hielo, que se producen por nubes convectivas, pueden ser esféricos, cónicos o de forma irregular, su diámetro varía entre 5 y 125 mm.

### 2.3.3. Medición de la precipitación

La precipitación se mide en términos de la altura de lámina de agua y se expresa comúnmente en milímetros. La altura de lámina de agua indica la altura de agua que se acumularía en una superficie horizontal, si la precipitación permaneciera donde cayó. Los aparatos de medición, se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto en su parte, en el cual se recoge el agua producto de la lluvia u otro tipo de precipitación, registrando su altura.

Los aparatos de medición utilizados para el registro de la precipitación se indican a continuación:

- **Pluviómetro:** Instrumento que permite medir la altura de lluvia en la probeta, con una aproximación hasta décimos de milímetros. Su lectura generalmente se realiza cada 24 horas.
- **Pluviógrafo:** Instrumento que registra la altura de lluvia en función del tiempo, en un gráfico denominado pluviograma, el cual es utilizado para determinar la intensidad de la precipitación.

### 2.3.4. Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual, el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en los almacenamientos, en el suelo y en las capas cercanas a la superficie, a estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera.

La evaporación se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua producido por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor.

### 2.3.5. Medición de la evaporación

Para la medición directa de la evaporación se utilizan los siguientes aparatos:

Evaporímetros: La medición de la evaporación se realiza en un tanque mediante dos métodos. El primer método denominado volumétrico, consiste esencialmente en medir los volúmenes de agua que es preciso añadir periódicamente al tanque para reponer en éste su nivel inicial. El segundo método se basa en la medida periódica de los niveles que el agua tiene en el tanque, deduciendo como diferencia de estos niveles la evaporación habida en el tiempo transcurrido entre dos medidas consecutivas

Recipientes de vaporización: Consiste de un evaporímetro de balanza formado por un recipiente lleno de agua, en donde al cabo de 24 horas se realiza la lectura de la evaporación. Dentro de este tipo de instrumentos se encuentra el Evaporímetro Wild tipo pasacartas.

- Recipientes de porcelana porosa: Consiste en una esfera de porcelana porosa con un vástago barnizado e impermeable. La evaporación se mide calculando la pérdida de agua del depósito. Dentro de este tipo de instrumentos se encuentra la esfera de Livingston.
- Evaporímetros de disco de papel: Está formado por un tubo normalizado graduado en centímetros y milímetros, abierto por un extremo que se cubre con un disco de papel filtro normalizado. El evaporímetro más sencillo, barato y práctico que destaca en este tipo es el evaporímetro Piche.

## 2.4. MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE DATOS HIDROLÓGICOS

### 2.4.1. Análisis de doble masa

El análisis de doble masa permite evaluar la consistencia de una serie de valores de algún elemento hidrometeorológico medido en una estación "X" en base a los datos tomados en otra estación o grupo de estaciones "Y", situadas en una zona climática similar y cuya homogeneidad haya sido verificada.

Este sistema de homogeneización de series, se utiliza cuando se desea verificar la ocurrencia de un cambio relativo en la variable observada, medida o registrada

en una estación meteorológica (Searcy y Hardison, 1960).

La aplicación gráfica del análisis de doble masa se realiza trazando todos los valores de las estaciones "X" y "Y". El diagrama entonces se analiza visualmente para determinar si los valores sucesivos de las estaciones "X" y "Y", siguen una única línea recta, lo cual indica homogeneidad del registro "Y" respecto de "X". Si aparece una discontinuidad (o más de una) en el diagrama, entonces hay una indicación visual de que la serie de datos de las estaciones "Y" o quizás "X" no es homogénea.

Si la variable analizada fuera la precipitación, en el análisis de doble masa se comparara la lluvia anual o mensual (valores acumulados), con la precipitación anual o mensual, acumulada de otra estación o grupo de estaciones. Graficando estas dos variables se observa si se presenta un cambio de pendiente, el cual puede deberse a causas diferentes a las meteorológicas.

#### **2.4.2. Método del vector regional**

El Método del vector regional es un método de cálculo orientado a dos tareas específicas como son: la crítica de datos y homogenización de la información. Consiste en elaborar, a partir de la información disponible, una especie de estación ficticia que sea representativa de toda la zona de estudio, donde luego para cada estación se calcula un promedio extendido sobre todo el período de estudio, y para cada año, se calcula un índice.

Además, en lugar de comparar pares de estaciones por correlación o doble masa, como se realiza en los métodos clásicos, compara cada estación analizada con la estación ficticia "especie de promedio" de todas las estaciones de la zona.

Para el cálculo del Vector Regional se pueden utilizar dos métodos los cuales fueron desarrollados por G. Hiez y Y. Brunet Moret en el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM, por sus siglas en francés).

El método de G. Hiez se basa en el cálculo de la moda (valor más frecuente), mientras que el de Y. Brunet Moret se basa en el promedio, eliminando los

valores demasiado alejados del promedio para evitar contaminar demasiado las estimaciones con datos evidentemente erróneos. Cada método estima una media extendida para cada estación sobre el período de trabajo, y calcula los índices anuales de cada estación, obtenidos al dividir el valor observado en una estación para un año por ésta media extendida. (Espinoza, 2005).

### CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

La caracterización climática de la zona en estudio para la elaboración del balance de aguas, ha sido realizada en base a la información de la precipitación y evaporación total mensual de las estaciones meteorológicas administradas por SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) y ubicadas cerca al área en donde se emplaza la pila de lixiviación. (Ver Cuadro N° 3.1 y Figura N° 3.1)

Cuadro N° 3.1: Estaciones meteorológicas

Estación	Coordenadas		Altitud (msnm)	Tipo de datos	Periodo de registro	Fuente	Región
	Latitud S	Longitud W					
Andahua	15°30'00"	72°21'00"	3587	PTM	1950 - 1983	SENAMHI	Arequipa
Antabamba	14°22'00"	72°53'00"	3639	P <sub>TM</sub>	1964 - 1974	SENAMHI	Apurímac
				E	1965 - 1975		
Chinchayllapa	14°55'00"	72°44'00"	4100	P <sub>TM</sub>	1964 - 2009	SENAMHI	Arequipa
Coracora	15°01'00"	73°47'00"	3172	P <sub>TM</sub> y E	1964 - 2010	SENAMHI	Ayacucho
Orcopampa	15°15'00"	72°19'59"	3779	P <sub>TM</sub>	1951 - 2011	SENAMHI	Arequipa
Pauza	15°17'00"	73°21'00"	2560	E	1964 - 2010	SENAMHI	Ayacucho
Santo Tomás	14°23'00"	72°05'00"	3253	P <sub>TM</sub>	1964 - 2011	SENAMHI	Cusco

Fuente: SENAMHI

Nomenclatura: P<sub>TM</sub> = Precipitación Total mensual, E = Evaporación y T= Temperatura.

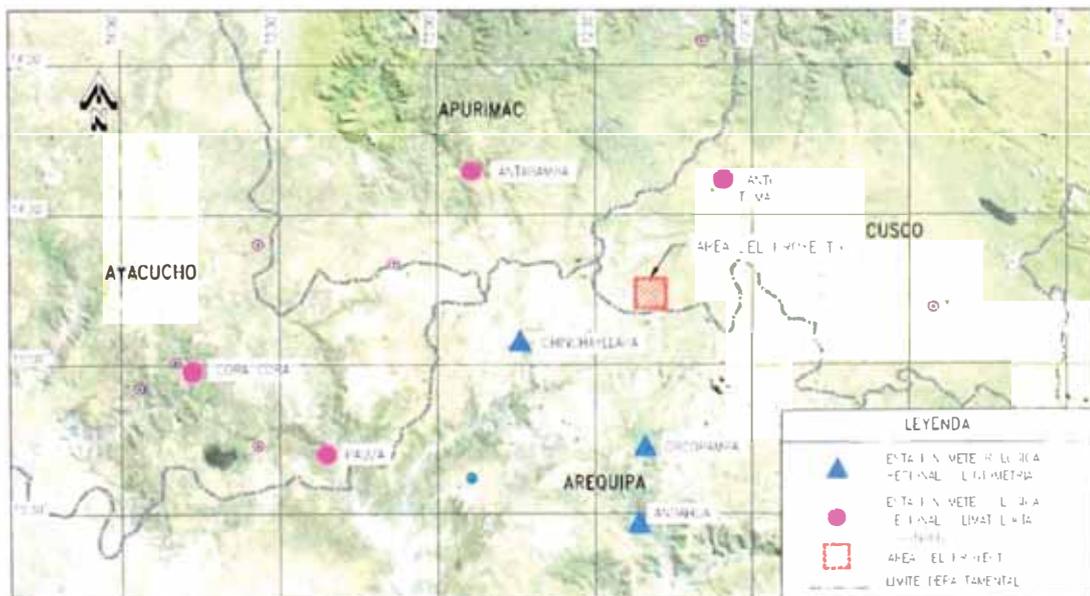
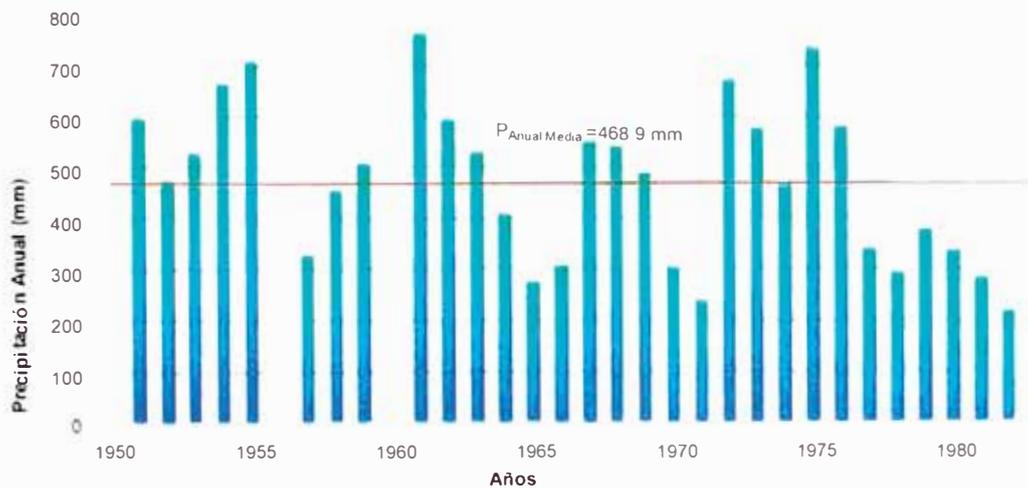


Figura N° 3.1: Ubicación de las estaciones meteorológicas

**Estación Andahua**

Geográficamente se encuentra ubicada en la Latitud 15°30'00" y Longitud 72°21'00", y a una altitud aproximada de 3587 msnm. Cuenta con información histórica de 1950 a 1983, posterior al análisis de los datos de la precipitación total mensual se han obtenido una precipitación media anual de 468.9 mm. Además la máxima precipitación anual registra un valor de 759 mm en el año 1961 y la mínima precipitación anual un valor de 216 mm en el año 1982.

En la Gráfica 3.1 se presenta la variación de la precipitación anual y precipitación media anual obtenida del análisis.

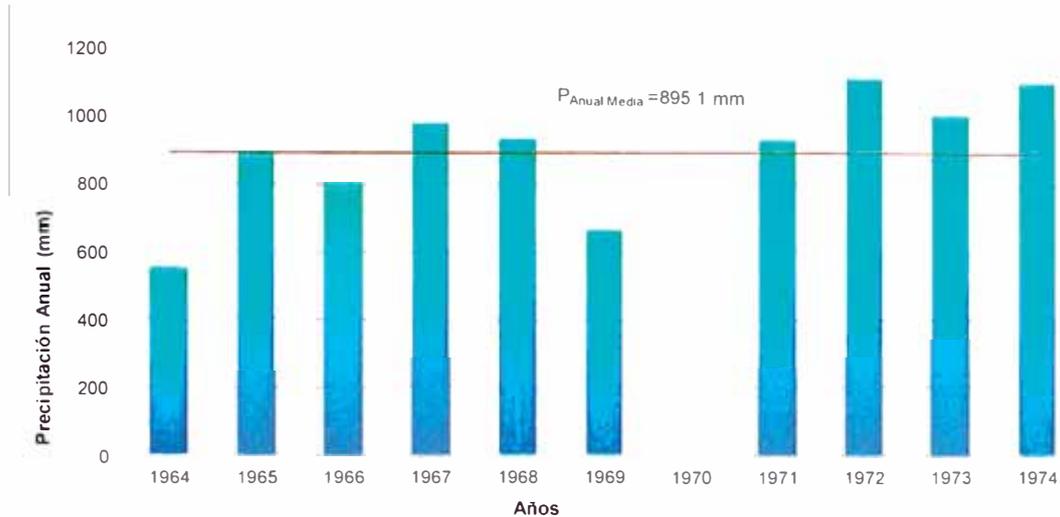


**Gráfica N° 3.1: Variación de la precipitación anual de la estación Andahua**

**Estación Antabamba**

Geográficamente se encuentra ubicada en la Latitud 14°22'00" y Longitud 72°53'00", y a una altitud aproximada de 3639 msnm. Cuenta con información histórica de 1964 a 1974, posterior al análisis de los datos de la precipitación total mensual se han obtenido una precipitación media anual de 895.1 mm. Además la máxima precipitación anual registra un valor de 1110 mm en el año 1972 y la mínima precipitación anual un valor de 574 mm en el año 1964.

En la Gráfica N° 3.2 se presenta la variación de la precipitación anual y precipitación media anual obtenida del análisis.

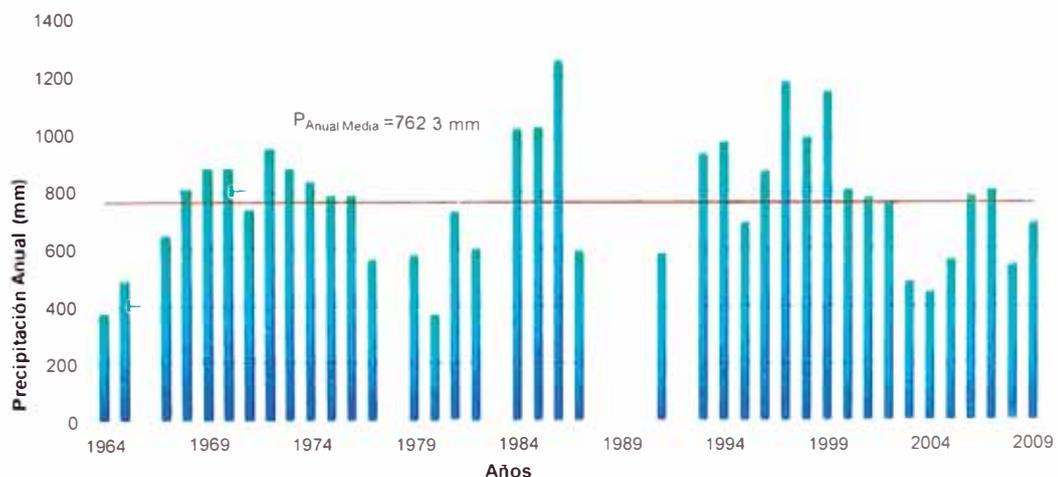


Gráfica N° 3.2: Variación de la precipitación anual de la estación Antabamba

- **Estación Chinchayllapa**

Geográficamente se encuentra ubicada en la Latitud 14°55'00" y Longitud 72°44'00", y a una altitud aproximada de 4100 msnm. Cuenta con información histórica de 1964 al 2009, posterior al análisis de los datos de la precipitación total mensual se han obtenido una precipitación media anual de 762.3 mm. Además la máxima precipitación anual registra un valor de 1250 mm en el año 1986 y la mínima precipitación anual un valor de 368 mm en el año 1980.

En la Gráfica N° 3.3 se presenta la variación de la precipitación anual y precipitación media anual obtenida del análisis.

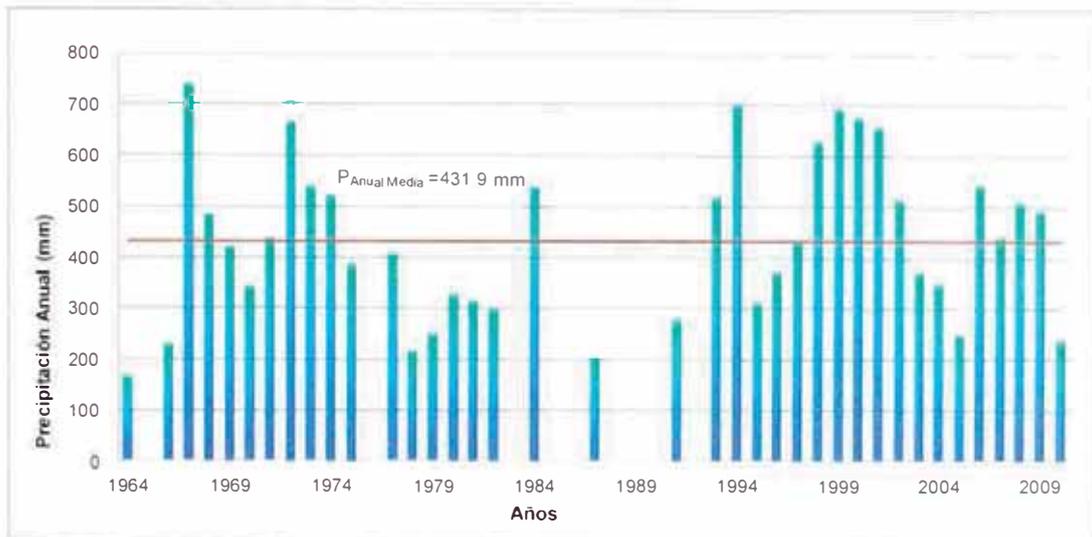


Gráfica N° 3.3: Variación de la precipitación anual de la estación Chinchayllapa

### - Estación Coracora

Geográficamente se encuentra ubicada en la Latitud 15°01'00" y Longitud 73°47'00", y a una altitud aproximada de 3172 msnm. Cuenta con información histórica de 1964 a 2010, posterior al análisis de los datos de la precipitación total mensual se han obtenido una precipitación media anual de 431.9 mm. Además la máxima precipitación anual registra un valor de 738 mm en el año 1967 y la mínima precipitación anual un valor de 164 mm en el año 1964.

En la Gráfica N° 3.4 se presenta la variación de la precipitación anual y precipitación media anual obtenida del análisis.

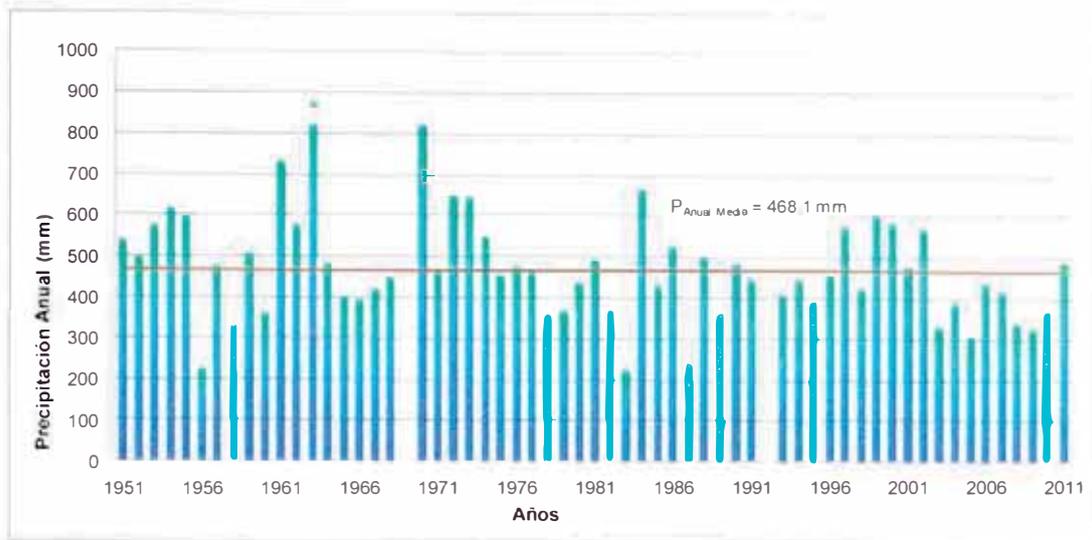


Gráfica N° 3.4: Variación de la precipitación anual de la estación Coracora

### - Estación Orcopampa

Geográficamente se encuentra ubicada en la Latitud 15°15'00" y Longitud 72°20'00", y a una altitud aproximada de 3779 msnm. Cuenta con información histórica de 1951 a 2011, posterior al análisis de los datos de la precipitación total mensual se han obtenido una precipitación media anual de 468.1 mm. Además la máxima precipitación anual registra un valor de 873 mm en el año 1963 y la mínima precipitación anual un valor de 218 mm en el año 1983.

En la Gráfica N° 3.5 se presenta la variación de la precipitación anual y precipitación media anual obtenida del análisis.

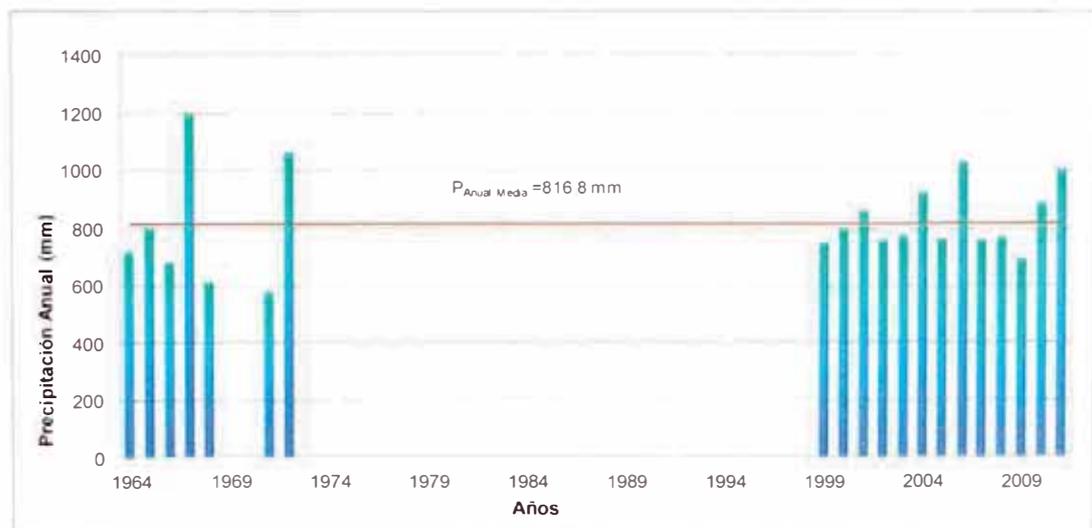


Gráfica N° 3.5: Variación de la precipitación anual de la estación Orcopampa

**Estación Santo Tomás**

Geográficamente se encuentra ubicada en la Latitud 14°23'00" y Longitud 72°05'00", y a una altitud aproximada de 3253 msnm. Cuenta con información histórica de 1964 a 2011, posterior al análisis de los datos de la precipitación total mensual se han obtenido una precipitación media anual tiene un valor de 816.8 mm, la máxima precipitación anual registra un valor de 1190 mm en el año 1967 y la mínima precipitación anual un valor de 574 mm en el año 1971.

En la Gráfica N° 3.6 se presenta la variación de la precipitación anual y precipitación media anual obtenida del análisis.



Gráfica N° 3.6: Variación de la precipitación anual de la estación Santo Tomás

### 3.1.1.2. Análisis estadístico y de Consistencia

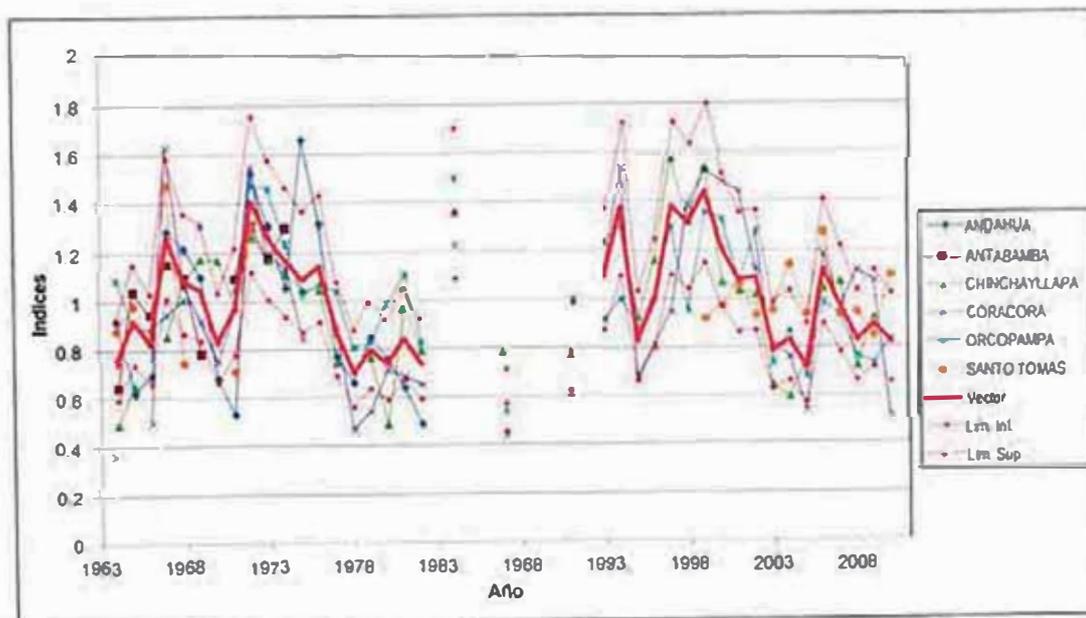
El análisis estadístico y de consistencia ha sido desarrollado mediante la aplicación del método del vector regional de índices pluviométricos elaborado por G.Hiez y Brunet Moret y el análisis de doble masa adimensional, empleando el software Hydraccess v.4.3.

Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro N° 3.3 y las gráficas N° 3.7 y 3.8.

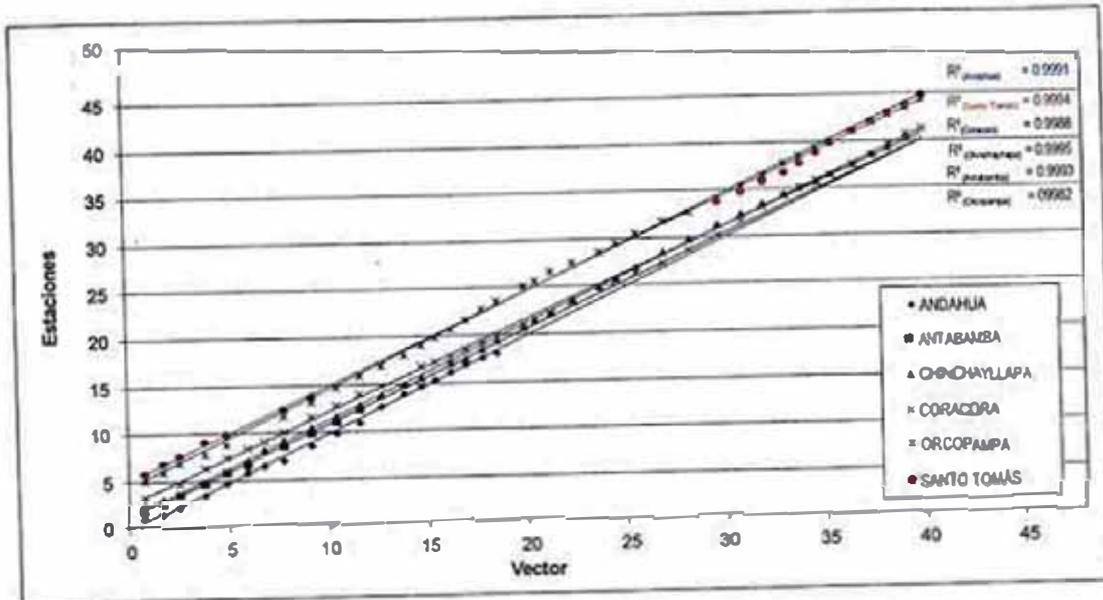
Cuadro N° 3.3: Precipitaciones medias anuales y principales parámetros del vector regional

Estación	N° Años	Desviación Estándar de Desvíos	Correlación / -Vector	P Anual Media Observada (mm)	P Anual Media Calculada (mm)
Andahua	19	0.215	0.803	418.8	439
Antabamba	10	0.129	0.795	895.1	846.4
Chinchayllapa	37	0.152	0.823	742.1	747.2
Coracora	38	0.195	0.863	431.9	453.1
Orcopampa	39	0.159	0.755	445.5	440.1
Santo Tomás	19	0.218	0.403	806.9	807.5

Fuente: Elaboración propia - Resultados del software Hydraccess v.4.3



Gráfica N° 3.7: Método del vector regional



Gráfica N° 3.8: Resultados del análisis de doble masa

De la interpretación de los resultados obtenidos del análisis del vector regional y análisis de doble masa se puede indicar lo siguiente:

- En el Cuadro N° 3.3 la desviación estándar de desvlos de cada estación respecto al vector regional son bajos lo que indica buena calidad de la data de las estaciones meteorológicas. Las estaciones con mejor comportamiento corresponden a las estaciones Antabamba, Chinchayllapa y Orcopampa.
- En el Cuadro N° 3.3 la correlación entre las estaciones y el vector presentan valores relativamente altos y homogéneos (a excepción de la estación Santo Tomás), lo que representa que la zona es climáticamente homogénea.
- En el gráfico del vector regional se observan estaciones pluviométricas que interceptan y superan los límites de confianza superior e inferior como la estación Andahua y Coracora.
- En la Gráfica N° 3.8 el valor del índice de correlación  $R^2$  para todas las estaciones es cercano a 1, lo que indica homogeneidad de los valores de las estaciones respecto al vector regional. Las estaciones con mayores índices, por ende con mayor homogeneidad, son la estación Chinchayllapa y Santo Tomás.

- En la Gráfica N° 3.8 se observan discontinuidades en la estación Santo Tomás, y limitación de datos en las estaciones Andahua y Antabamba.

En base al análisis estadístico anterior se indica que las estaciones Chinchayllapa y Orcopampa no presentan inconsistencia, y pueden ser utilizadas para caracterizar la precipitación del área del proyecto.

### 3.1.2. Precipitación de diseño

De acuerdo al procesamiento estadístico de la información, a la longitud de registro y ubicación geográfica de la zona donde se ubica la pila de lixiviación en estudio, se ha establecido a la estación Chinchayllapa como la representativa en el comportamiento pluviométrico para el área del proyecto.

Adicionalmente, para un mejor ajuste de la data de precipitación mensual de ésta estación se ha visto necesaria completar los datos no definidos (año 1966, 1978, 1983, 1988, 1990, 2010 y 2011) con registros de la estación Orcopampa. (Ver Cuadro N° 3.4)

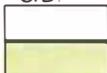
**Cuadro N° 3.4: Precipitación total mensual de la estación Chinchayllapa completada con registros de la estación Orcopampa**

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1964	30	99	67	52	10	0	2	10	4	22	31	42	369
1965	66	111	54	33	7	0	13	43	28	52	6	76	489
1966	114	120.5	162.8	6.5	61.9	0	0	0	6.5	20.8	46.2	95.3	634.6
1967	65	170	219	43	7	0	13	5	40	35	4	42	643
1968	223	125	193	7	15	11	7	13	14	47	55	97	807
1969	93	84	246	235	19	0	49	9	16	19	52	58	880
1970	287	216	130	47	21	8	6	7	32	32	24	67	877
1971	221	149	121	45	15	4	0	6	0	10	5	160	736
1972	189	256	215	78	3	1	0	4	28	58	32	84	948
1973	221	152	219	84	20	0	5	17	34	4	50	71	877
1974	316	126	87	111	6	18	0	76	8	13	19	54	834
1975	207	143	237	21	22	7	0	0	6	31	9	102	785
1976	266	131	158	25	20	5	9	18	59	18	0	75	784
1977	30	252	213	5	0	0	20	0	31	9	0	0	560
1978	135.2	63.5	45.6	79.8	0	0	13	0	4.9	3.3	127	105.8	578.1
1979	24	67	250	57	0	21	5	0	7	104	0	39	574
1980	88	65	110	0	0	0	0	0	6	39	15	45	368
1981	147	201	71	81	0	0	0	72	18	23	39	75	727

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1982	15	114	135	28	0	12	0	8	54	95	133	0	594
1983	45.6	76.5	48.9	73.3	19.5	3.3	0	0	29.3	0	1.6	57	355
1984	184	293	174	23	11	0	0	7	19	80	96	128	1015
1985	23	236	305	179	42	6	0	0	31	0	76	125	1023
1986	285	206	325	56	3	37	37	27	18	38	0	218	1250
1987	315	171.7	0	0	0	5	11	13.8	0	33	35	15	599.5
1988	282	74.9	151.3	42	38	0	0	0	0	0	0	151.4	739.6
1989	159.6	198.7	136.8	71.6	13	0	0	0	0	0	0	6.5	586.2
1990	96.1	191	151.3	29.3	0	0	0	16.3	0	16.3	244.3	40.7	785.2
1991	6	224	182	149	18	1	0	0	0	0	0	0	580
1992	171.4	171.7	156.4	52	12.1	4.6	6.1	13.8	16.2	24.9	34.5	77	740.6
1993	163	70	192	70	51	25	3	44	37	26	66	182	929
1994	399	317	174	16	9	6	6	0	0	0	0	47	974
1995	324	118	89	2	5	0	0	0	12	8	73	61	692
1996	187	300	86	121	25	3	0	26	41	9	14	58	870
1997	374	268	95	43	10	0	0	155	56	40	25	112	1178
1998	355	187	124	13	0	7	0	10	0	29	45	214	984
1999	143	307	360	98	0	16	16	2	53	60	19	76	1150
2000	265	145	100	87	12.1	4.6	1	17	3	68	18	82	802.7
2001	169	219	263	55	23	6	3	11	10	2	8	6	775
2002	85	203	222	59	0	3	35	7	0	13	51	84	762
2003	100	142	161	15	19	0	0	3	9	2	0	33	484
2004	127	123	92	8	0	4	15	6	7	0	2	63	447
2005	150	129	115	36	0	0	0	2	12	3	4	106	557
2006	119	182	330	11	12.1	3	0	1	8	24	59	34	783.1
2007	241	204	195	28	0	0	0	10	4	8	44	67	801
2008	245	120	57	16	4	0	0	0	0	29	0	71	542
2009	174	286	109	20	0	0	15	0	16	22	29	21	692
2010	135.2	177.5	97.7	13	10.1	0	0	0	0	20.8	46.2	96.1	596.6
2011	166.7	253.4	83	72.1	16.3	0	1.3	2.8	0	2.8	17.9	175	791.4
<b>Máxima</b>	<b>399</b>	<b>317</b>	<b>360</b>	<b>235</b>	<b>61.9</b>	<b>37</b>	<b>49</b>	<b>155</b>	<b>59</b>	<b>104</b>	<b>244.4</b>	<b>218</b>	<b>1250</b>
<b>Media</b>	<b>171.4</b>	<b>171.7</b>	<b>156.4</b>	<b>52</b>	<b>12.1</b>	<b>4.6</b>	<b>6.1</b>	<b>13.8</b>	<b>16.2</b>	<b>24.9</b>	<b>34.5</b>	<b>77</b>	<b>740.7</b>
<b>Minima</b>	<b>6</b>	<b>63.5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>355.2</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>101.6</b>	<b>70.6</b>	<b>81.1</b>	<b>47.6</b>	<b>13.8</b>	<b>7.6</b>	<b>10.6</b>	<b>26.7</b>	<b>17.1</b>	<b>25.1</b>	<b>44.6</b>	<b>52.5</b>	<b>206.8</b>
<b>C. Asim.</b>	<b>0.3</b>	<b>0.3</b>	<b>0.6</b>	<b>1.8</b>	<b>1.7</b>	<b>2.5</b>	<b>2.5</b>	<b>3.8</b>	<b>1.1</b>	<b>1.4</b>	<b>2.7</b>	<b>0.9</b>	<b>0.3</b>
<b>C. Var.</b>	<b>0.6</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.9</b>	<b>1.1</b>	<b>1.6</b>	<b>1.7</b>	<b>1.9</b>	<b>1.1</b>	<b>1</b>	<b>1.3</b>	<b>0.7</b>	<b>0.3</b>
<b>%Anual</b>	<b>23%</b>	<b>23%</b>	<b>21%</b>	<b>7%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>100%</b>

Fuente: SENAMHI

S/D: Sin Dato



Datos mensual completado con el promedio mensual del registro

Completado con la precipitación promedio mensual de la estación Orcopampa (debido a que presenta el mismo comportamiento en la variabilidad mensual)

Por otro lado, considerando que la pila del proyecto se ubica a una altitud sobre los 5000 msnm y la estación Chinchayllapa a una altitud de 4100 msnm, se ha visto necesario calibrar el registro de precipitación mensual completada en el Cuadro N° 3.4.

Para calibrar los datos de precipitación se ha utilizado el mapa de isoyetas de precipitación anual de la región, obteniéndose un valor de precipitación anual de 950 mm (Ver Figura N° 3.2). Dato que ha sido utilizado para calibrar la precipitación mensual de la estación Chinchayllapa por altitud, usando como base su precipitación anual promedio de 740.7 mm.

El cálculo el factor de corrección se presenta a continuación, y la precipitación total mensual asignada al área del proyecto, debidamente calibrada por el factor de corrección, el Cuadro N° 3.5.

$$FC = \frac{PTA \text{ asignada al área del proyecto}}{PTA \text{ completada de la estación Chinchayllapa}}$$

$$FC = \frac{950 \text{ mm}}{740.7 \text{ mm}}$$

$$FC = 1.3$$

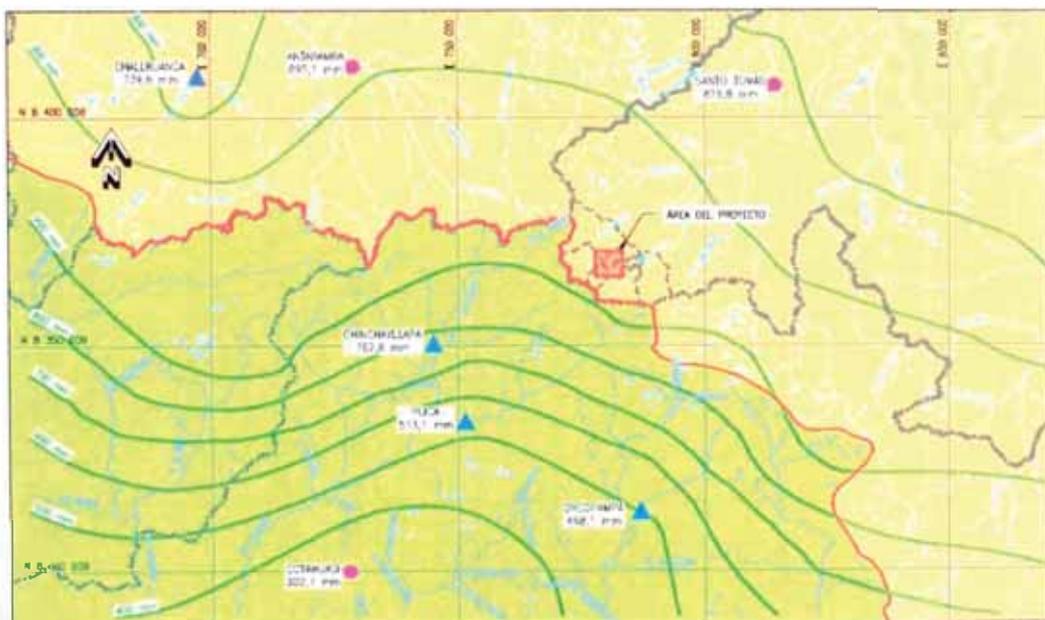


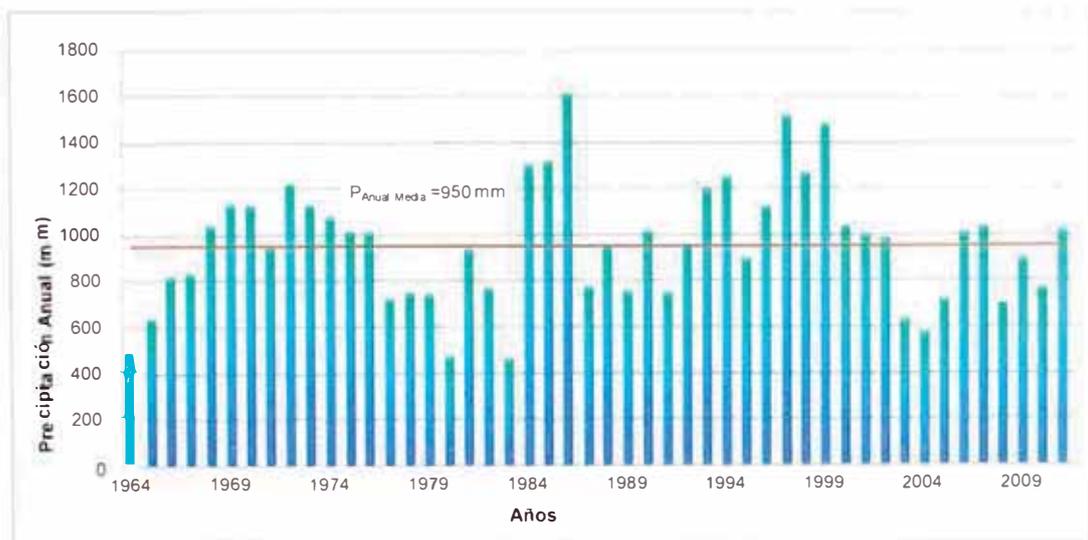
Figura N° 3.2: Isoyetas de precipitación anual

Cuadro N° 3.5: Precipitación total mensual asignada al área del proyecto

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1964	38.5	126.9	85.9	66.7	12.8	0	2.6	12.8	5.1	28.2	39.7	53.8	473.1
1965	84.6	142.3	69.2	42.3	9	0	16.7	55.1	35.9	66.7	7.7	97.4	626.9
1966	146.1	154.5	208.8	8.4	79.3	0	0	0	8.4	26.7	59.3	122.1	813.6
1967	83.3	217.9	280.8	55.1	9	0	16.7	6.4	51.3	44.9	5.1	53.8	824.4
1968	285.9	160.3	247.4	9	19.2	14.1	9	16.7	17.9	60.3	70.5	124.4	1034.6
1969	119.2	107.7	315.4	301.3	24.4	0	62.8	11.5	20.5	24.4	66.7	74.4	1128.2
1970	367.9	276.9	166.7	60.3	26.9	10.3	7.7	9	41	41	30.8	85.9	1124.4
1971	283.3	191	155.1	57.7	19.2	5.1	0	7.7	0	12.8	6.4	205.1	943.6
1972	242.3	328.2	275.6	100	3.8	1.3	0	5.1	35.9	74.4	41	107.7	1215.4
1973	283.3	194.9	280.8	107.7	25.6	0	6.4	21.8	43.6	5.1	64.1	91	1124.4
1974	405.1	161.5	111.5	142.3	7.7	23.1	0	97.4	10.3	16.7	24.4	69.2	1069.2
1975	265.4	183.3	303.8	26.9	28.2	9	0	0	7.7	39.7	11.5	130.8	1006.4
1976	341	167.9	202.6	32.1	25.6	6.4	11.5	23.1	75.6	23.1	0	96.2	1005.1
1977	38.5	323.1	273.1	6.4	0	0	25.6	0	39.7	11.5	0	0	717.9
1978	173.3	81.4	58.5	102.3	0	0	16.7	0	6.3	4.2	162.8	135.7	741.1
1979	30.8	85.9	320.5	73.1	0	26.9	6.4	0	9	133.3	0	50	735.9
1980	112.8	83.3	141	0	0	0	0	0	7.7	50	19.2	57.7	471.8
1981	188.5	257.7	91	103.8	0	0	0	92.3	23.1	29.5	50	96.2	932.1
1982	19.2	146.2	173.1	35.9	0	15.4	0	10.3	69.2	121.8	170.5	0	761.5
1983	58.5	98.1	62.6	93.9	25.1	4.2	0	0	37.6	0	2.1	73.1	455.1
1984	235.9	375.6	223.1	29.5	14.1	0	0	9	24.4	102.6	123.1	164.1	1301.3
1985	29.5	302.6	391	229.5	53.8	7.7	0	0	39.7	0	97.4	160.3	1311.5
1986	365.4	264.1	416.7	71.8	3.8	47.4	47.4	34.6	23.1	48.7	0	279.5	1602.6
1987	403.8	220.1	0	0	0	6.4	14.1	17.7	0	42.3	44.9	19.2	768.5
1988	361.5	96	193.9	53.8	48.7	0	0	0	0	0	0	194.1	948.2
1989	204.6	254.7	175.4	91.9	16.7	0	0	0	0	0	0	8.4	751.5
1990	123.2	244.9	193.9	37.6	0	0	0	20.9	0	20.9	313.1	52.2	1006.7
1991	7.7	287.2	233.3	191	23.1	1.3	0	0	0	0	0	0	743.6
1992	219.7	220.1	200.6	66.7	15.5	5.9	7.8	17.7	20.8	31.9	44.2	98.7	949.5
1993	209	89.7	246.2	89.7	65.4	32.1	3.8	56.4	47.4	33.3	84.6	233.3	1191
1994	511.5	406.4	223.1	20.5	11.5	7.7	7.7	0	0	0	0	60.3	1248.7
1995	415.4	151.3	114.1	2.6	6.4	0	0	0	15.4	10.3	93.6	78.2	887.2
1996	239.7	384.6	110.3	155.1	32.1	3.8	0	33.3	52.6	11.5	17.9	74.4	1115.4
1997	479.5	343.6	121.8	55.1	12.8	0	0	198.7	71.8	51.3	32.1	143.6	1510.3
1998	455.1	239.7	159	16.7	0	9	0	12.8	0	37.2	57.7	274.4	1261.5
1999	183.3	393.6	461.5	125.6	0	20.5	20.5	2.6	67.9	76.9	24.4	97.4	1474.4
2000	339.7	185.9	128.2	111.5	15.5	5.9	1.3	21.8	3.8	87.2	23.1	105.1	1029.1
2001	216.7	280.8	337.2	70.5	29.5	7.7	3.8	14.1	12.8	2.6	10.3	7.7	993.6
2002	109	260.3	284.6	75.6	0	3.8	44.9	9	0	16.7	65.4	107.7	976.9
2003	128.2	182.1	206.4	19.2	24.4	0	0	3.8	11.5	2.6	0	42.3	620.5

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
2004	162.8	157.7	117.9	10.3	0	5.1	19.2	7.7	9	0	2.6	80.8	573.1
2005	192.3	165.4	147.4	46.2	0	0	0	2.6	15.4	3.8	5.1	135.9	714.1
2006	152.6	233.3	423.1	14.1	15.5	3.8	0	1.3	10.3	30.8	75.6	43.6	1004
2007	309	261.5	250	35.9	0	0	0	12.8	5.1	10.3	56.4	85.9	1026.9
2008	314.1	153.8	73.1	20.5	5.1	0	0	0	0	37.2	0	91	694.9
2009	223.1	366.7	139.7	25.6	0	0	19.2	0	20.5	28.2	37.2	26.9	887.2
2010	173.3	227.6	125.3	16.7	12.9	0	0	0	0	26.7	59.3	123.2	764.9
2011	213.8	324.8	106.5	92.5	20.9	0	1.7	3.5	0	3.5	23	224.4	1014.6
Máxima	511.5	406.4	461.5	301.3	79.3	47.4	62.8	198.7	75.6	133.3	313.1	279.5	1602.6
Media	219.7	220.1	200.6	66.7	15.5	5.9	7.8	17.7	20.8	31.9	44.2	98.7	949.5
Minima	7.7	81.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	455.1
Desv. Est.	130.3	90.5	104	61.1	17.7	9.7	13.6	34.3	21.9	32.2	57.2	67.3	265.1
C. Asim.	0.3	0.3	0.6	1.8	1.7	2.5	2.5	3.8	1.1	1.4	2.7	0.9	0.3
C. Var.	0.6	0.4	0.5	0.9	1.1	1.6	1.7	1.9	1.1	1	1.3	0.7	0.3
%Anual	23%	23%	21%	7%	2%	1%	1%	2%	2%	3%	5%	10%	100%

Además en la Gráfica N° 3.9 se presenta la variación de la Precipitación Anual Asignada al área del Proyecto.



Gráfica N° 3.9: Variación de la precipitación anual asignada al área del proyecto

### 3.2. EVAPORACIÓN TOTAL MENSUAL

Para caracterizar las evaporaciones totales mensuales y anuales en la zona donde se ubica la pila de lixiviación, se ha analizado los registros de 3 estaciones meteorológicas operadas por SENAMHI. (Ver Cuadro N° 3.6)

Cuadro N° 3.6: Estaciones meteorológicas para caracterizar la evaporación

Estación	Coordenadas		Altitud (msnm)	Período de registro
	Latitud S	Longitud W		
Antabamba	14°22'00"	72°53'00"	3639	1965 - 1975
Coracora	15°01'00"	73°47'00"	3172	1964 - 2010
Pauza	15°17'00'	73°21'00"	2560	1964 - 2010

#### 3.2.1. Procesamiento de la información

El procesamiento de cada serie de datos de evaporación de las estaciones meteorológicas se ha realizado a través de una etapa de observación y de completar datos. El análisis estadístico no ha sido realizado debido a la limitada data meteorológica obtenida para el presente estudio.

##### 3.2.1.1. Observación y completación de datos

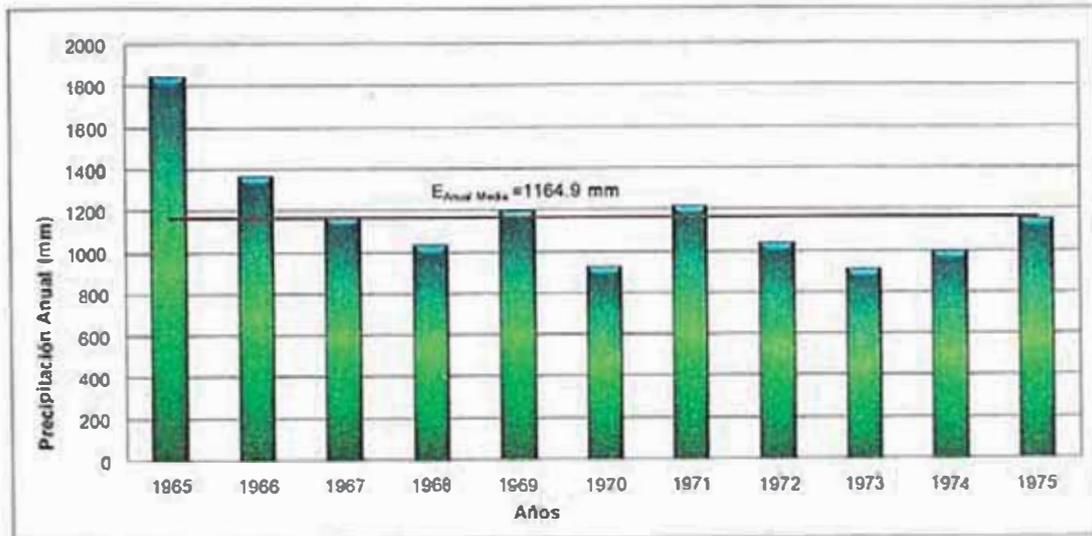
Esta etapa ha sido desarrollada con la finalidad de identificar datos inconsistentes y evaluar la continuidad de la información recopilada para aplicar una primera corrección. Los datos faltantes han sido completado con el promedio mensual en aquellos años con menos de seis datos faltantes por año.

En el Anexo B.2 se presenta el análisis de los datos y los registros completados de la evaporación total mensual de las 3 estaciones meteorológicas analizadas; y a continuación una descripción de los resultados obtenidos.

##### - Estación Antabamba

Geográficamente se encuentra ubicada en la Latitud 14°22'00" y Longitud 72°53'00", y a una altitud aproximada de 3639 msnm. Cuenta con información histórica de 1965 a 1975, posterior al análisis de los datos de la evaporación total mensual se ha obtenido una evaporación media anual de 1164.9 mm, la máxima evaporación anual registra un valor de 1843.5 mm en el año 1965 y la mínima evaporación anual un valor de 907 mm en el año 1973.

En la Gráfica N° 3.10 se presenta la variación de la evaporación anual y evaporación media anual completada.

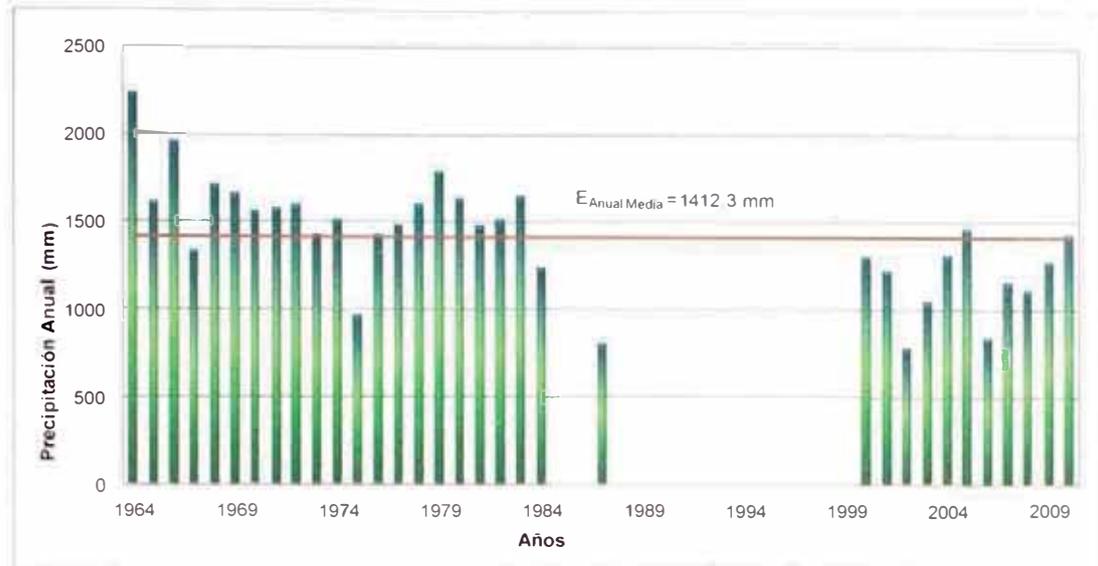


Gráfica N° 3.10: Variación de la evaporación anual de la estación Antabamba

- **Estación Coracora**

Geográficamente se encuentra ubicada en la Latitud 15°01'00" y Longitud 73°47'00", y a una altitud aproximada de 3172 msnm. Cuenta con información histórica de 1964 a 2010, posterior al análisis de los datos de evaporación total mensual se ha obtenido una evaporación media anual de 1412.3 mm, la máxima evaporación anual registra un valor de 2228 mm en el año 1964 y la mínima evaporación anual un valor de 776 mm en el año 2002.

En la Gráfica N° 3.11 se presenta la variación de la evaporación anual y evaporación media anual completada.

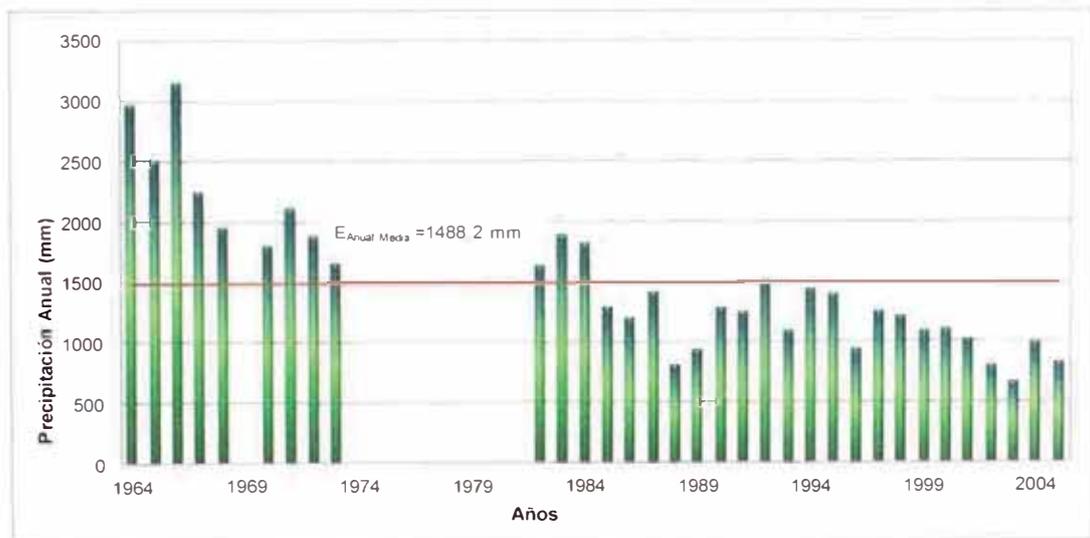


Gráfica N° 3.11: Variación de la evaporación anual de la estación Coracora

### - Estación Pauza

Geográficamente se encuentra ubicada en la Latitud 15°17'00" y Longitud 73°21'00", y a una altitud aproximada de 2 530 msnm. Cuenta con información histórica de 1964 a 2005, posterior al análisis de los datos de evaporación total mensual se ha obtenido una evaporación media anual de 1488.2 mm, la máxima evaporación anual registra un valor de 3140 mm en el año 1966 y la mínima evaporación anual un valor de 655.1 mm en el año 2003.

En la Gráfica N° 3.12 se presenta la variación de la evaporación anual y evaporación media anual completada.



Gráfica N° 3.12: Variación de la evaporación anual de la estación Pauza

### 3.2.2. Evaporación de diseño

De acuerdo al procesamiento de la información, a la longitud de registro y a la ubicación geográfica respecto a la zona donde se ubica la pila de lixiviación en estudio, se ha establecido a la estación Coracora como la representativa en el comportamiento de la evaporación total mensual para el área del proyecto.

Adicionalmente, para un mejor ajuste de la data de evaporación mensual de ésta estación se ha visto necesaria completar los datos no definidos con registros de la estación Pauza. (Ver Cuadro N° 3.7).

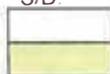
**Cuadro N° 3.7: Evaporación total mensual asignada al área del proyecto**

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
	(mm)												
1964	158	99	96	117	206	247	246	235	252	234	197	141	2228
1965	116	62	76	93	147	146	168	151	173	188	145	147	1612
1966	171	111	100	167	191	219	236	201	181	140	129	112	1958
1967	63	23	30	56	108	138	138	176	154	137	145	160	1328
1968	85	91	62	123	149	161	197	186	172	172	140	170	1708
1969	105	68	62	99	175	169	193	183	176	179	128	126	1663
1970	63	70	74	87	129	166	176	187	155	159	158	133	1557
1971	74	55	45	75	166	160	201	170	165	182	174	110	1577
1972	43	47	42	116	183	189	169	181	168	161	161	129	1589
1973	77	53	44	66	130	156	183	169	147	162	135	104	1426
1974	51	43	46	93	167	170	168	138	167	192	150	125	1510
1975	80	55	43	81	112	110	89	93	58	56	111	79	967
1976	59	40	42	56	89	137	176	134.1	168	184	183	132	1400.1
1977	78	56	70	98	144	132	171	167	143	146	135	145	1485
1978	100	115	112	116	147	143	135	125	161	163	149	137	1603
1979	134	91	60	126	160	166	177	201	191	182	168	129	1785
1980	93	94	75	122	157	154	151	184	174	148	160	114.8	1626.8
1981	98	72	77	63	55	125.1	208	140	169	171	156	136	1470.1
1982	91	53	88	116	162	115	174	162	138	131	121	154	1505
1983	157	107	106	128	130	154	168	171	138	140	146	100	1645
1984	90	63.4	81	129	128	100	66	130	145	110	77	114.8	1234.2
1985	118.6	48.4	79.7	77.8	121.5	118.6	111	115.8	113.9	115.8	105.3	102.5	1228.9
1986	79.7	80.7	84.5	93	82.6	86.4	98.7	94.9	131.9	101.5	35	60	1028.8
1987	33	53	36	26	50	39	49	138	96	108	75	103	806
1988	69	14.2	73	62	30.4	126.2	135.8	88.3	76.9	92.1	70.2	69.3	907.3
1989	51.2	56	71.2	79.7	70.2	59.8	77.8	73.1	62.6	73.1	96.8	114.8	886.3
1990	107.2	104.4	116.7	107.2	99.6	84.5	92.1	87.3	90.2	77.8	76.9	168.9	1212.8

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1991	186.9	81.3	90.2	128.1	110.1	71.2	66.4	75	93	86.4	84.5	107.2	1180.2
1992	109.1	111	118.6	100.6	113.9	85.4	95.8	134.6	135.3	140.2	129.5	160.4	1434.6
1993	122.4	90.2	81.6	69.3	92.1	126.2	68.3	56.9	73.1	79.7	89.2	89.2	1038.2
1994	87.3	79.7	86.2	101.7	93.9	87.3	62.6	74	171.8	217.3	204	109.1	1375.1
1995	98.7	76.9	86.4	80.7	96.8	108.2	122.4	124.3	128.1	140.4	146.1	115.8	1324.8
1996	109.1	81.6	105.3	77.8	92.1	51.2	0	0	0	137.6	153.7	85.4	893.9
1997	78.8	80.7	85.4	112	65.5	105.3	120.5	122.4	101.5	135.7	125.3	64.5	1197.6
1998	59.8	50.3	67.4	84.5	105.3	99.6	119.6	121.5	117.7	125.3	103.4	88.3	1142.6
1999	131	34.2	42.7	66.4	81.6	78.8	83.5	96.8	79.7	97.7	137.6	110.1	1040.1
2000	88.9	42	44	72	106	138	150	156	140	138	134	88	1296.9
2001	58	43	39	64	107	99	102	149	134	141	134	147	1217
2002	65	21	25	43	46	48	77	101	53	98	99	100	776
2003	73	42	45	79	99	116	124	90	91	138.8	63	67	1027.8
2004	80	54	57	85	146	146	125	136	113	119	132	114.8	1307.8
2005	66	58	64	96	142	148	172	177	102	171	140	114.8	1450.8
2006	60	30	22	16	77	65	65	124	55	120	82	121	837
2007	88.9	63.4	42	59	116	133	135	91	112	140	109	70	1159.3
2008	39	21	37	71	80	130	155	81	130	125	119	114.8	1102.8
2009	56	29	67.7	69	111	131	126	149	171	122	119	128	1278.7
2010	75.2	65.8	83	89.6	142.1	142.4	170.5	161.2	125.2	143.4	149.7	83.6	1431.7
2011	88.9	63.4	67.7	88	117.3	125.1	133.9	134.1	129.6	138.8	127.3	114.8	1328.9
<b>Máxima</b>	186.9	115	118.6	167	206	247	246	235	252	234	204	170	2228
<b>Media</b>	88.9	63.4	67.7	88	117.3	125.1	133.9	134.1	129.6	138.8	127.3	114.8	1328.9
<b>Minima</b>	33	14.2	22	16	30.4	39	0	0	0	56	35	60	776
<b>Desv. Est.</b>	33.7	25.9	24.9	28.6	39.4	42.2	51.8	45	45.5	37.2	35.3	27.6	306.7
<b>C. Asim.</b>	1	0.2	0.1	0.1	0	0.3	-0.2	-0.4	-0.3	0.1	-0.3	0	0.4
<b>C. Var.</b>	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2
<b>%Anual</b>	7%	5%	5%	7%	9%	9%	10%	10%	10%	10%	10%	9%	100%

Fuente: SENAMHI

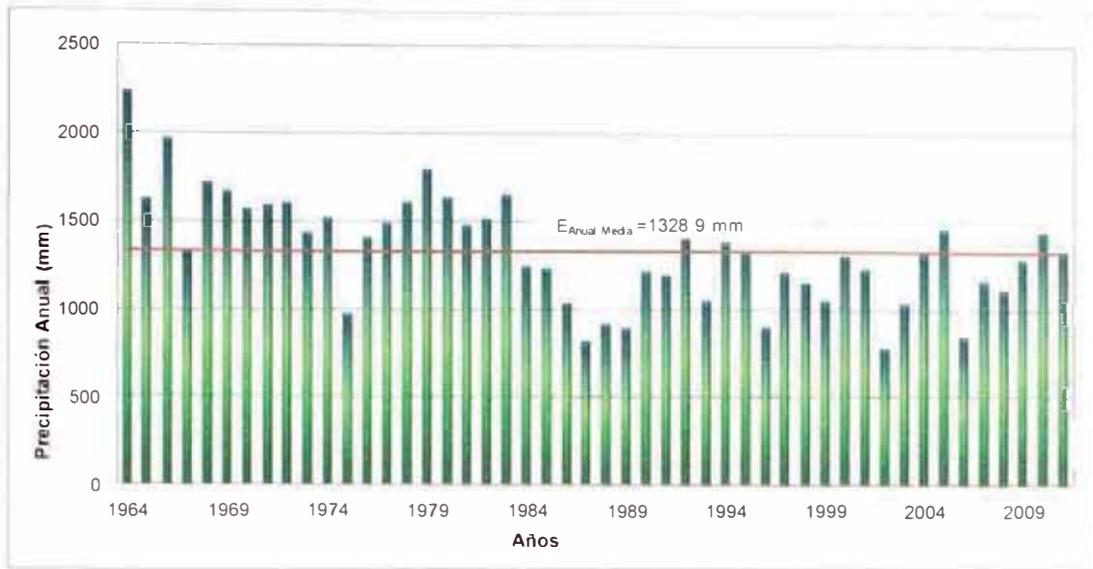
S/D: Sin Dato



Datos mensual completado con el promedio mensual del registro

Completado con la evaporación total mensual de la estación Pausa

En la Gráfica N° 3.13 se presenta la variación de la evaporación anual y evaporación media anual completada que ha sido asignada al área del proyecto.



Gráfica N° 3.13: Variación de la evaporación anual asignada al área del proyecto

## CAPÍTULO IV: APLICACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO

### 4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO PARA EL BALANCE DE AGUAS

Para el desarrollo del modelo de balance de aguas se ha utilizado el concepto basado en la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo entrante} - \text{Flujo Saliente} = \text{Cambio en el almacenamiento}$$

El flujo entrante corresponde a la precipitación que cae sobre el área revestida de la plataforma de lixiviación (incluida la pila de lixiviación) y al flujo de agua fresca de reposición requerida para el riego del material apilado. (Pulcha, Cesar y Parra, 2012).

El flujo saliente está compuesto por las evaporaciones en la plataforma de lixiviación (área inactiva), evaporaciones en la pila de lixiviación (áreas activas bajo lixiviación) y las pérdidas debidas al riego; además, de las evaporaciones en las pozas de emergencia y procesos (PLS e ILS), y las salidas de los flujos en exceso del sistema. Como se mencionó en capítulos anteriores la salida de los flujos en exceso del sistema relacionado con la recuperación de metales al medio ambiente, debe realizarse después del proceso de tratamiento de efluentes, también denominado detoxificación.

Los cambios en el almacenamiento están asociados con los cambios del contenido de la humedad almacenada en los vacíos del material mineralizado apilado y las fluctuaciones de los niveles de agua en las pozas de emergencia y procesos (PLS e ILS). Los flujos de recirculación entre las pozas y el área de lixiviación, son considerados como flujos internos y no generan entradas ni salidas del sistema del manejo de flujos de la pila de lixiviación. (Pulcha, Cesar y Parra, 2012).

De lo mencionado anteriormente las variables dependientes en el cálculo del balance de aguas son el flujo de demanda de agua fresca y las salidas de agua en exceso del sistema, en consecuencia estos flujos serán los encargados de equilibrar la ecuación del balance de aguas, manteniendo los niveles en las pozas dentro de los límites operativos y de contingencia al final de cada periodo

mensual, durante los 10 años de operación de la pila de lixiviación. Por tanto el balance de aguas está orientado a determinar lo siguiente:

- Las demandas de agua fresca para asegurar la continuidad de la lixiviación en la pila durante el periodo de operación.
- Las descargas de agua en exceso al medio ambiente, que está directamente relacionada con la capacidad de la planta de tratamiento necesaria para el tratamiento de flujos excedentes del sistema.

Adicionalmente, para analizar el efecto que causa el uso de cobertura impermeable en porcentajes ascendentes sobre la pila de lixiviación se ha considerado realizar la evaluación de la tendencia del balance de aguas, los volúmenes totales almacenados, y el dimensionamiento de la planta de tratamiento y poza Raincoats.

En la Figura N° 4.1 se presenta el diagrama esquemático del balance de aguas en donde se muestra el manejo de flujos que se deberán realizar para la recuperación de metales valiosos de la pila de lixiviación en estudio.

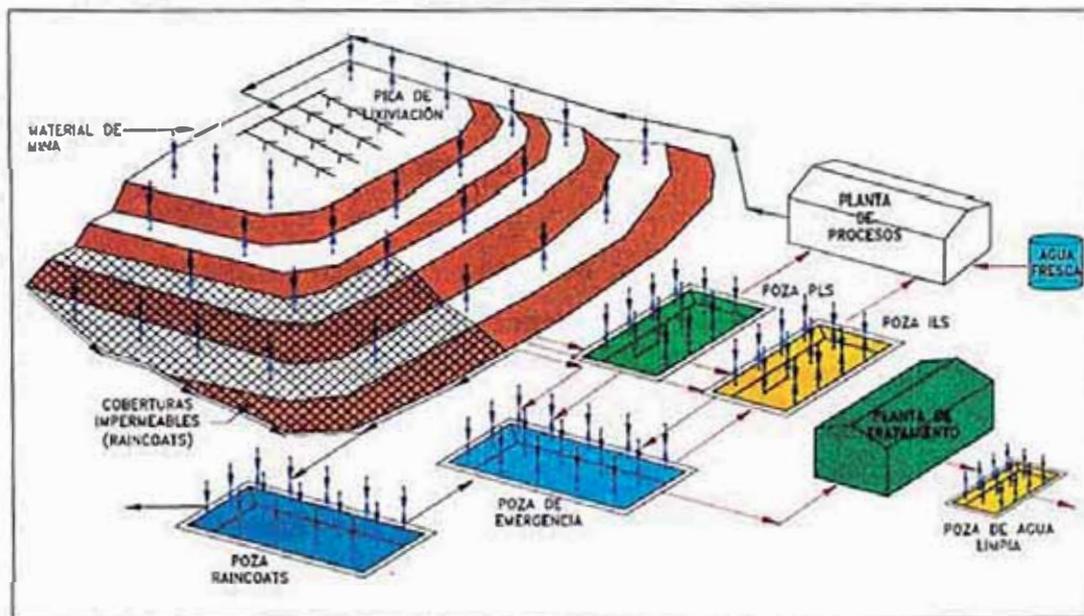


Figura N° 4.1: Diagrama esquemático del modelo del balance de aguas

Fuente: Anddes Asociados (2013)

## 4.2. DATOS DE ENTRADA PARA EL ANÁLISIS

Para desarrollar el modelo del Balance de Agua se ha utilizado la información obtenida de la caracterización climática de la zona donde se ubica la pila de lixiviación desarrollada en el Capítulo 3 y los parámetros de operación definidos de acuerdo a los planes de producción previsto por la unidad minera.

### 4.2.1. Datos hidrológicos

Par establecer los volúmenes de contingencia por lluvias extremas de acuerdo a con los criterios inferidos en el libro "Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects" (Van Zyl, Hutchinson y Zyl 1988), base de varias guías de diseño de plataformas y pilas de lixiviación, se describen dos criterios: El primero, añadiendo el volumen correspondiente de la tormenta de 24 horas y 100 años de periodo de retorno a las fluctuaciones de volúmenes de un año promedio; y el segundo, utilizando en las evaluaciones del balance de aguas registros históricos o sintéticos de precipitación y evaporación mensuales totales. (Pulcha, Cesar y Parra, 2012).

Para el presente informe, para simular los eventos de precipitación y evaporación para el periodo de operación de la pila de lixiviación, en el balance de aguas se han utilizado los registros hidrológicos de 48 años presentados en los cuadros N° 3.5 y 3.6, dado que se cuenta con esta información y de acuerdo con las prácticas en diferentes proyectos es la más recomendada para climas húmedos, como es el caso de estudio.

La series sintéticas han sido obtenidas aplicando el método ISM (Index Sequential Method), es decir con los registros de precipitación y evaporación se ha generado 48 series de 118 meses de duración cada una, para representar todas las combinaciones posibles de estos fenómenos hidrológicos.

Las series de precipitación y evaporación total mensual establecidas para el desarrollo del balance de aguas se presentan en el Anexo C.1 y C.2, respectivamente.

#### **4.2.2. Parámetros de operación**

La descripción de los principales parámetros de operación requeridos para el desarrollo del balance de aguas se describe a continuación:

##### *4.2.2.1. Periodo de simulación*

El periodo de simulación corresponde al periodo de operación de la pila de lixiviación, que inicia en enero del año 2014 y finaliza en octubre del año 2023, 118 meses (10 años aproximadamente), que considera, de acuerdo a los planes de producción de la unidad minera, periodos de 30, 35 y 53 meses para las fases 1, 2 y 3, respectivamente.

##### *4.2.2.2. Configuración de la plataforma y pila de lixiviación*

La configuración de la pila y extensión de la plataforma de lixiviación está directamente relacionada con la cantidad de agua de lluvia que ingresa al sistema, de ahí la importancia de su uso dentro del modelo del balance de agua.

La pila de lixiviación en estudio está configurada en 3 fases, con capacidades de almacenamiento de 4.1, 8.3, y 13.7 Mt para las fases 1, 2 y 3, respectivamente. Así mismo, la plataforma de lixiviación donde será apilado el material mineralizado, está dispuesta considerando extensiones de 17 ha para la Fase 1, 11.8 ha para la Fase 2 y 12.3 ha para la Fase 3.

##### *4.2.2.3. Características del material mineralizado*

Las características del material mineralizado requeridas para el desarrollo del balance de aguas están conformadas por la humedad natural, humedad residual, densidad seca, densidad húmeda y duración del ciclo de lixiviación para la recuperación de los metales valiosos, para este caso 120 días.

##### *4.2.2.4. Plan de producción*

El plan de producción representa uno de los principales parámetros para el desarrollo del balance de aguas, dado que de éste depende la estimación de la extensión del área bajo riego (área activa) a lo largo del periodo de operación de la pila de lixiviación.

Para el presente estudio la producción promedio para la Fase 1 es 4 500 t/día, para los primeros 6 meses de la Fase 2 de 4 500 t/día, y para la Fase 2 restante y la Fase 3 de 8 500 t/día.

En el Cuadro N° 4.1 se presenta el resumen de todos los parámetros de operación requeridos para el balance de aguas.

**Cuadro N° 4.1: Parámetros de operación**

Descripción	unidad	Criterio Usado
Capacidad de la pila de lixiviación (Fase 1)	t	4 104 000
Capacidad total de la pila de lixiviación (fases 1, 2 y 3)	t	26 139 500
Tasa de producción diaria de la Fase 1 y 6 primeros meses de la Fase 2	t/día	4 500
Tasa de producción diaria, resto de la operación	t/día	8 500
Periodo de operación	meses	118
Densidad del material mineralizado (seca)	t/m <sup>3</sup>	1.46
Densidad del material mineralizado (húmeda)	t/m <sup>3</sup>	1.53
Tasa de aplicación	l/h/m <sup>2</sup>	12
Tasa máxima de bombeo	m <sup>3</sup> /h	480
Duración de averías, tiempo de percolación libre	h	24
Altura de capa de apilado típico	m	8
Ciclo de lixiviación	días	120
Capacidad de poza PLS	m <sup>3</sup>	15 000
Capacidad de poza ILS	m <sup>3</sup>	15 000
Volumen mínimo de operación en las pozas	m <sup>3</sup>	5 000
Humedad natural del material mineralizado	%	5
Contenido de humedad residual	%	7
Absorción, retención de humedad	%	2
Factor de evaporación de pozas	-	0.7
Factor de evaporación de área de lixiviación	-	0.5
Factor de evaporación de área no lixiviada	-	0.25
Pérdidas por evaporación por riego	%	1
Volumen al inicio de la simulación	m <sup>3</sup>	25 000
Mes de inicio de la simulación	-	Enero 2014

Fuente: Unidad minera propietaria del Proyecto en estudio.

### 4.3. APLICACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

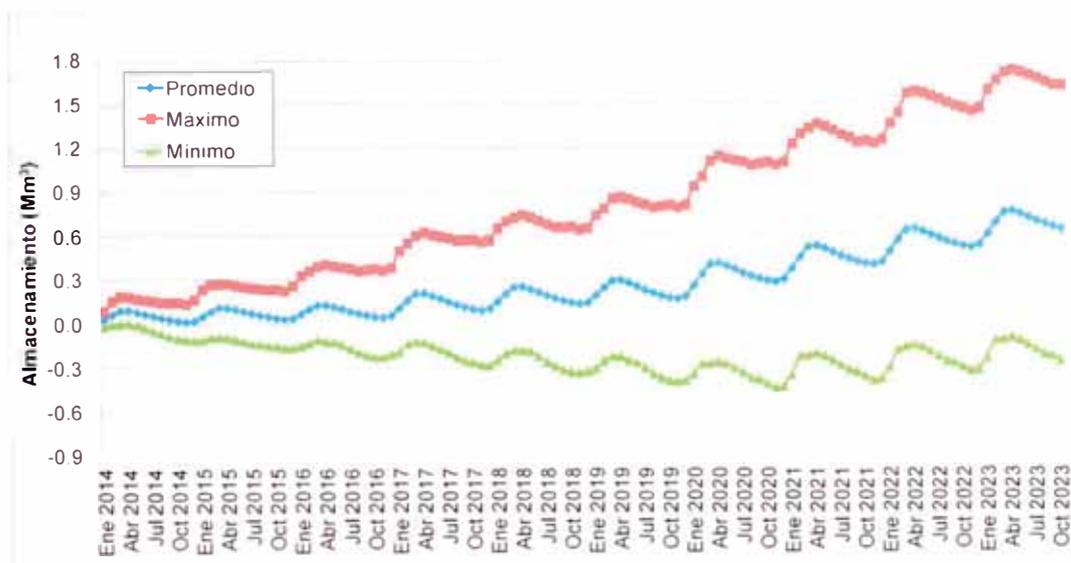
Para la aplicación del modelo se ha evaluado cuatro escenarios, considerando diferentes porcentajes de cobertura impermeable, como son 30%, 50% y 80%. Adicionalmente para evaluar el impacto del uso de esta cobertura se ha considerado un escenario sin ningún tipo de revestimiento.

En el Anexo D.1. se presenta el formato de la Hoja de Cálculo utilizada para ejecutar el modelo del balance de aguas para los 4 escenarios evaluados.

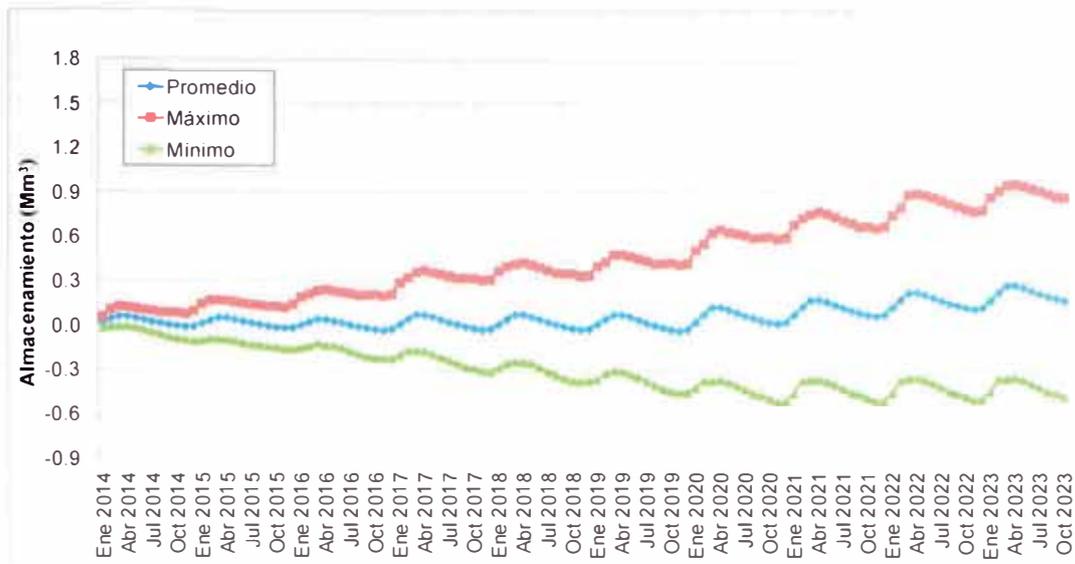
#### 4.3.1. Tendencia del balance de aguas

La evaluación del flujo total de agua en el sistema ha sido desarrollada para determinar la tendencia del balance de aguas conforme se incrementan el porcentaje de cobertura impermeable en la superficie de la pila de lixiviación.

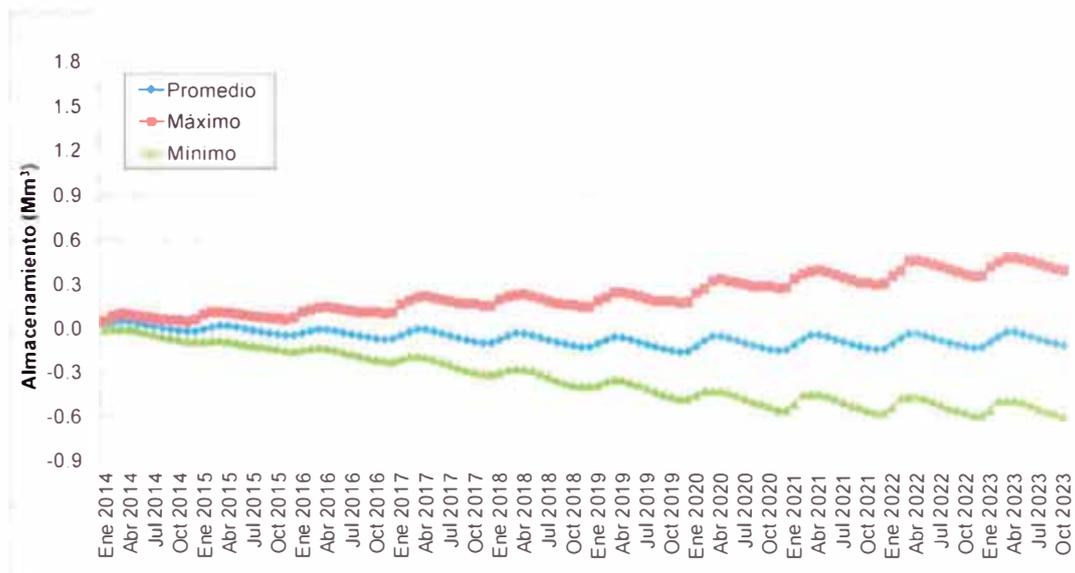
En el Anexo D.2 se presentan los resultados obtenidos de la variación del flujo de agua en el sistema para los 4 escenarios analizados para un periodo de operación de 118 meses, considerando 48 series de precipitación y evaporación. Además, para fines del análisis en las gráficas N° 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se presentan los valores mínimos, máximos y el promedio de los resultados obtenidos por cada mes de operación de la pila de lixiviación.



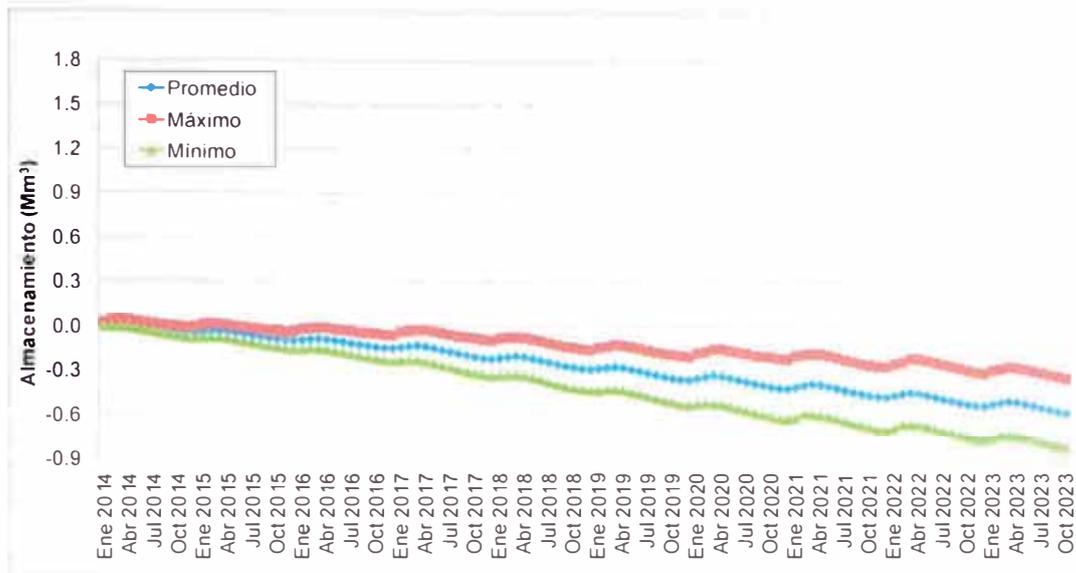
Gráfica N° 4.1: Tendencia del balance de agua - Escenario 1: Sin cobertura impermeable



Gráfica N° 4.2: Tendencia del balance de agua - Escenario 2: 30% de cobertura impermeable



Gráfica N° 4.3: Tendencia del balance de agua - Escenario 3: 50% de cobertura impermeable



Gráfica N° 4.4: Tendencia del balance de agua - Escenario 4: 80% de cobertura impermeable

Como se observa en las gráficas anteriores la tendencia del balance de aguas para los escenarios 1 y 2 es positiva, y para los escenarios 3 y 4 es negativa, en consecuencia se puede indicar que el comportamiento del balance de aguas, pasa de positiva a negativa conforme se incrementa el porcentaje de cobertura impermeable sobre la superficie de la pila.

La tendencia positiva indica el predominio del ingreso de las aguas de lluvia al sistema de flujos de la pila de lixiviación, así como de los volúmenes de agua que deben ser evacuados al medio ambiente durante la etapa de operación de la pila. La tendencia negativa indica el predominio de las pérdidas de agua y la necesidad de reponer agua al sistema para sostener el flujo de lixiviación requerido para el riego de la pila.

#### 4.3.2. Volumen total almacenado

El volumen total almacenado considera el volumen de operación y el volumen por contingencia ante averías por un periodo de 24 horas de todas las pozas que conforman el sistema de manejo de flujos de la pila de lixiviación, como son la poza de emergencias, poza PLS y poza ILS.

Para el cálculo del volumen total almacenado en el balance de agua se ha limitado las capacidades de la poza PLS, ILS y de emergencias a 15 260, 15 290 y 105 000 m<sup>3</sup>, respectivamente.

Los resultados obtenidos para los 4 escenarios, considerando en el análisis las 48 series sintéticas de precipitación y evaporación, se presentan en el Anexo D.3, así como los valores máximos, mínimos y los promedios obtenidos por cada periodo mensual.

Para establecer el valor más crítico (situación hidrológica mas critica) del volumen total almacenado en el sistema (volumen de operación y contingencia), para cada escenario evaluado y por cada serie considerada se ha seleccionado los valores máximos registrados para todo el periodo de operación de la pila. (Ver Cuadro N° 4.2)

**Cuadro N° 4.2: Volumen total almacenado en el sistema**

Escenario	Volumen total almacenado en el Sistema (m <sup>3</sup> )	Volumen de la poza PLS (m <sup>3</sup> )	Volumen de la poza ILS (m <sup>3</sup> )	Volumen de la poza de emergencias (m <sup>3</sup> )	Volumen total de almacenamiento de las pozas (m <sup>3</sup> )
Escenario 1: Sin cobertura impermeable	135 550	15 260	15 290	105 000	135 550
Escenario 2: 30% de cobertura impermeable	135 550	15 260	15 290	105 000	135 550
Escenario 3: 50% de cobertura impermeable	135 550	15 260	15 290	105 000	135 550
Escenario 4: 80% de cobertura impermeable	111 650	15 260	15 290	81 100	111 650

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el Cuadro N° 4.2, la capacidad de la poza de emergencias para el escenario que considera el uso de 80% de cobertura impermeable ha sido reducido de 105 000 a 81 000 m<sup>3</sup>, esto con el objetivo de equilibrar el volumen total del sistema obtenido del balance con el volumen de almacenamiento total de las pozas de acuerdo a su geometría.

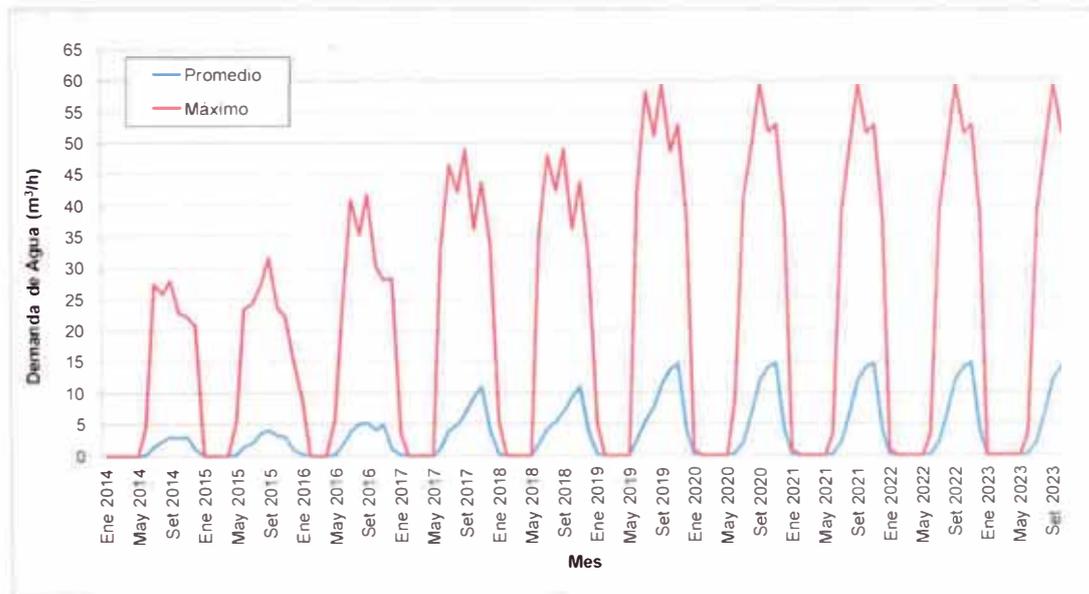
En general se puede indicar que si se utilizan porcentajes superiores del 80% de cobertura impermeable sobre la superficie de la pila de lixiviación, se ocasiona una reducción considerable del ingreso de agua de lluvia al sistema y por ende menores volúmenes de almacenamiento total que producen la reducción de la poza de emergencias.

### 4.3.3. Demandas de agua fresca

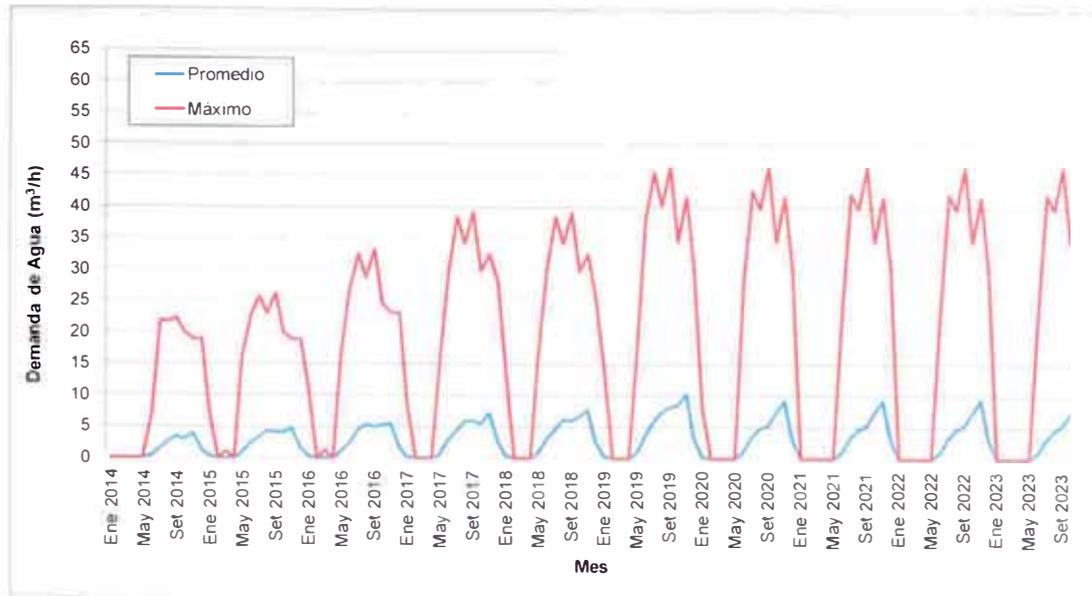
La evaluación de las demandas de agua fresca al sistema ha sido desarrollada para determinar los requerimientos del agua necesaria para operar adecuadamente la pila de lixiviación.

Los resultados obtenidos para los 4 escenarios evaluados, considerando las 48 series de precipitación y evaporación, se presentan en el Anexo D.4, así como los valores máximos, mínimos y los promedios obtenidos por cada periodo mensual.

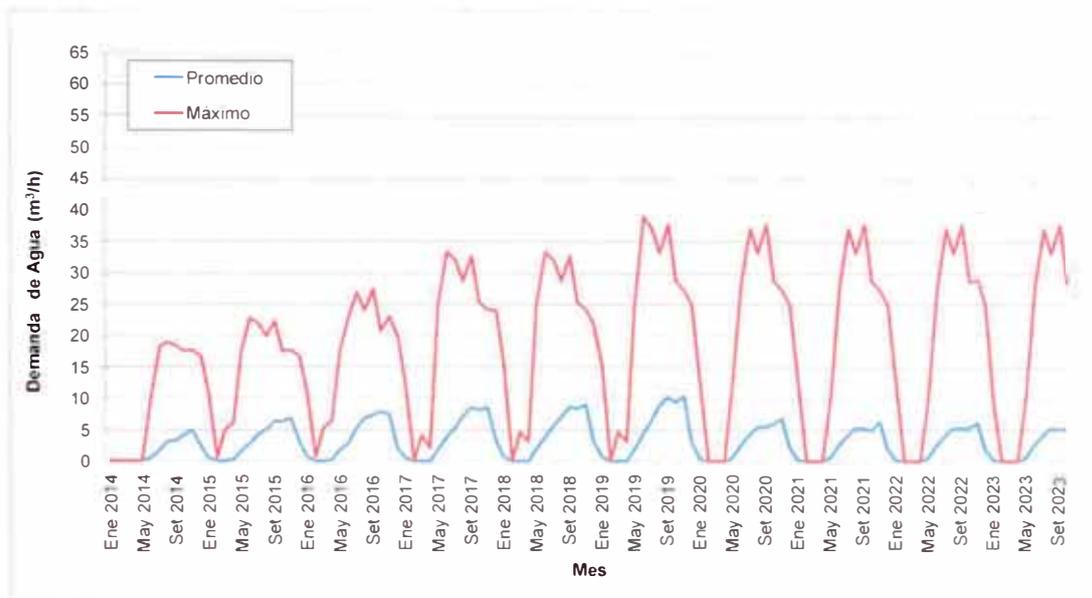
En base a los resultados obtenidos en las gráficas N° 4.5, 4.6, 4.7 y 4,8 se presentan los valores máximos y el promedio por cada mes de operación de la pila de lixiviación. Adicionalmente en el Cuadro N° 4.3 se presenta las demandas de agua fresca a nivel mensual durante todo el periodo de simulación para la condición más crítica (valores máximos).



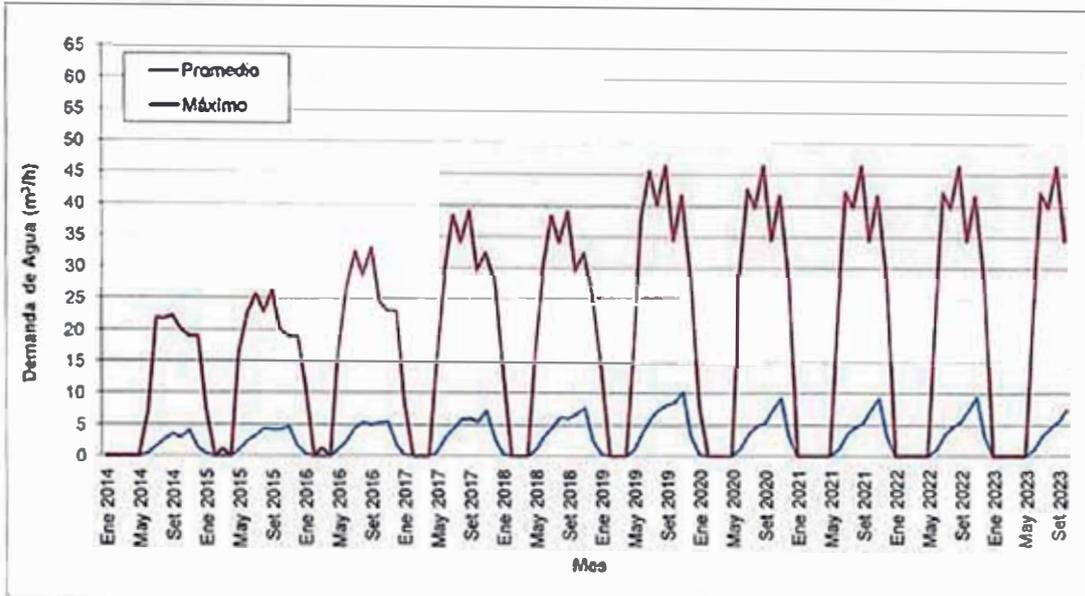
Gráfica N° 4.5: Demanda de agua fresca - Escenario 1: Sin cobertura impermeable



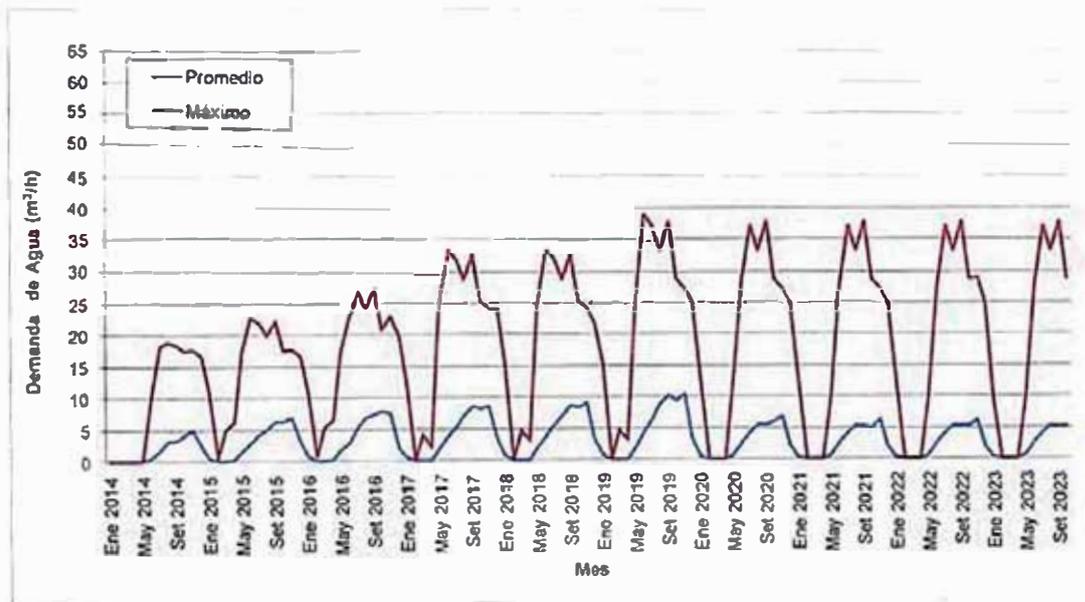
Gráfica N° 4.6: Demanda de agua fresca - Escenario 2: 30% de cobertura impermeable



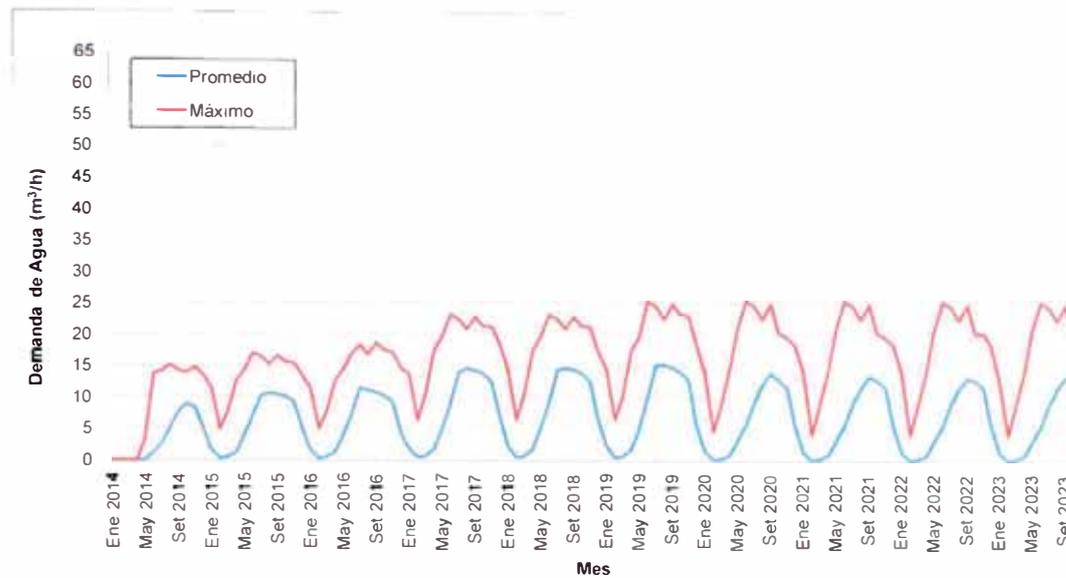
Gráfica N° 4.7: Demanda de agua fresca - Escenario 3: 50% de cobertura impermeable



Gráfica N° 4.6: Demanda de agua fresca - Escenario 2: 30% de cobertura impermeable



Gráfica N° 4.7: Demanda de agua fresca - Escenario 3: 50% de cobertura impermeable



Gráfica Nº 4.8: Demanda de agua fresca - Escenario 4: 80% de cobertura impermeable

Cuadro Nº 4.3: Demandas de agua fresca al sistema

Escenario	Demanda de Agua Fresca (m <sup>3</sup> /h)										
	Mes	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Escenario 1: Sin Cobertura Impermeable	Ene.	0.0	0.0	8.7	3.6	5.3	5.3	0.8	0.8	0.8	0.0
	Feb.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Mar.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Abr.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	May.	0.0	5.5	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Jun.	4.3	23.5	23.5	32.6	34.6	41.6	8.8	3.4	3.4	3.4
	Jul.	27.4	24.4	40.9	46.3	47.9	58.2	41.2	39.0	39.0	39.0
	Ago.	25.9	27.4	35.2	42.0	42.2	51.0	50.1	50.1	50.1	50.1
	Set.	27.8	31.7	41.7	48.9	48.9	59.4	59.4	59.4	59.4	59.4
	Oct.	22.8	23.7	30.2	36.1	36.1	48.3	51.6	51.5	51.5	51.5
	Nov.	22.2	22.2	28.2	43.7	43.7	52.8	52.8	52.8	52.8	-
	Dic.	20.8	15.0	28.3	33.7	31.6	37.9	37.9	37.9	37.9	-
Escenario 2: 30% de Cobertura Impermeable	Ene.	0.0	7.6	11.4	8.8	14.3	14.3	7.8	0.0	0.0	0.0
	Feb.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Mar.	0.0	1.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Abr.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	May.	0.0	16.2	16.5	15.0	16.4	16.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	Jun.	6.8	22.5	26.7	29.5	30.2	38.0	28.5	23.0	23.0	23.0
	Jul.	21.9	25.6	32.5	38.4	38.4	45.6	42.7	42.2	42.2	42.2
	Ago.	21.7	22.9	28.7	34.2	34.2	40.3	39.8	39.8	39.8	39.8
	Set.	22.2	26.1	33.1	39.1	39.1	46.4	46.4	46.4	46.4	46.4
	Oct.	20.0	20.0	24.6	29.7	29.7	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5
	Nov.	18.9	18.9	23.0	32.5	32.5	41.7	41.7	41.7	41.7	-
	Dic.	18.9	18.9	23.1	27.9	25.8	30.2	30.2	30.2	30.2	-

Escenario	Demanda de Agua Fresca (m <sup>3</sup> /h)										
	Mes	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Escenario 3: 50% de Cobertura Impermeable	Ene.	0.0	10.9	10.9	12.3	15.3	15.3	12.5	12.5	12.5	9.6
	Feb.	0.0	0.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Mar.	0.0	5.0	5.3	4.0	4.6	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0
	Abr.	0.0	6.2	6.5	2.1	3.1	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	May.	0.0	17.3	17.3	25.0	25.0	25.0	12.4	9.8	9.8	9.8
	Jun.	10.2	22.8	22.8	33.3	33.3	38.9	28.7	27.8	27.8	27.8
	Jul.	18.2	21.9	26.8	32.0	32.0	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1
	Ago.	18.8	19.8	24.0	28.8	28.8	33.2	33.2	33.2	33.2	33.2
	Set.	18.4	22.3	27.3	32.6	32.6	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8
	Oct.	17.5	17.6	20.8	25.4	25.4	28.8	28.8	28.8	28.8	28.8
	Nov.	17.8	17.8	23.0	24.1	24.1	27.2	27.2	27.2	28.9	-
	Dic.	16.6	16.6	19.7	24.1	21.9	25.1	25.1	25.1	25.1	-
Escenario 4: 80% de Cobertura Impermeable	Ene.	0.0	11.5	11.5	13.6	14.5	14.5	14.0	14.0	14.0	12.6
	Feb.	0.0	5.0	5.1	6.4	6.6	6.6	4.7	4.1	4.1	4.1
	Mar.	0.0	7.8	7.8	10.5	10.6	10.1	8.7	8.7	8.7	8.7
	Abr.	0.0	12.7	12.7	17.4	17.4	17.4	14.5	14.3	14.3	14.3
	May.	3.4	14.3	14.3	19.6	19.6	19.6	20.9	20.9	20.9	20.9
	Jun.	13.8	16.9	16.9	23.1	23.1	25.3	25.3	25.3	25.3	25.3
	Jul.	14.2	16.4	18.4	22.4	22.4	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5
	Ago.	15.1	15.3	16.8	20.9	20.9	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
	Set.	14.3	16.7	18.7	22.8	22.8	24.9	24.9	24.9	24.9	24.9
	Oct.	13.9	15.7	17.5	21.5	21.5	23.4	20.4	20.4	20.4	20.4
	Nov.	14.7	15.5	17.2	21.2	21.2	23.0	19.5	19.5	20.4	-
	Dic.	13.3	13.3	14.5	18.3	17.5	18.6	18.6	18.6	18.6	-

Fuente:  Elaboración propia  
 Valor máximo

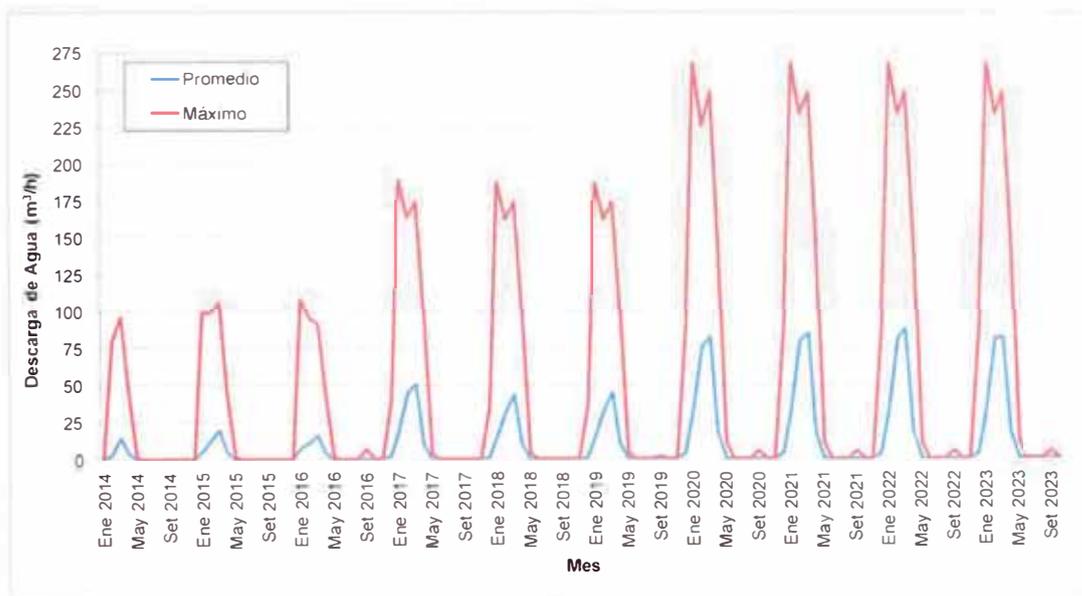
Como se observa en las gráficas anteriores y en el Cuadro N° 4.3 las demandas de agua fresca que se requiere para operar adecuadamente la pila de lixiviación en estudio, disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de cobertura impermeable sobre su superficie, esta tendencia se genera debido a que la evaporación en la zona de estudio es 1328.9 mm y la precipitación 950 mm, es decir 1.4 veces aproximadamente, en consecuencia al incrementar el porcentaje de cobertura impermeable sobre la pila de lixiviación se limita las pérdidas de agua por evaporación.

#### 4.3.4. Descargas de agua del sistema

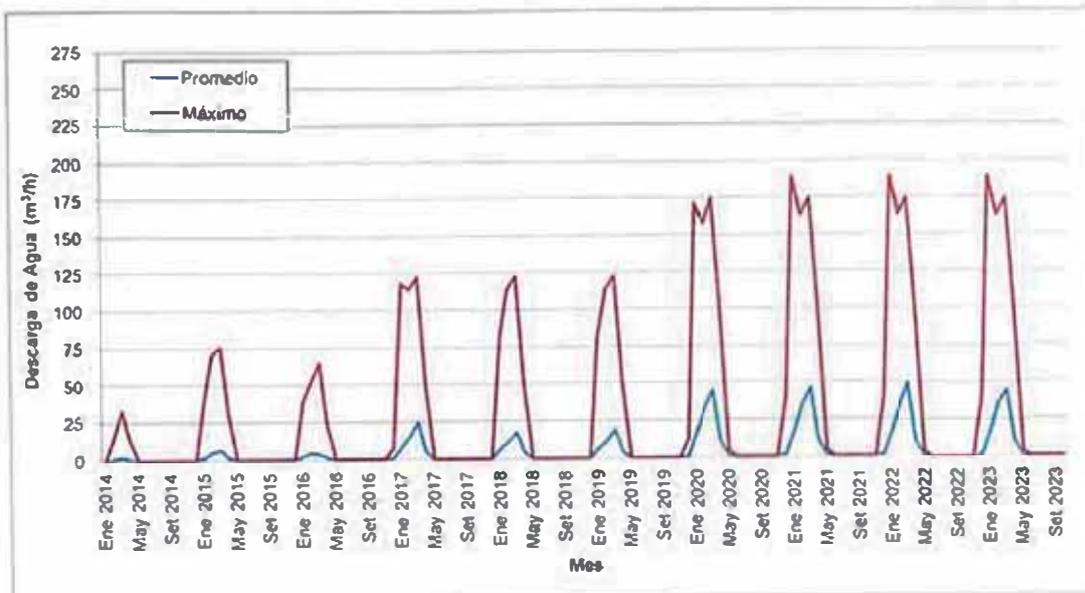
Esta evaluación ha sido desarrollada para determinar los volúmenes de agua en exceso que se deben descargar al medio ambiente para cada escenario analizado, para la correcta operación de la pila de lixiviación, previo tratamiento de acuerdo con los parámetros establecidos en el estudio de impacto ambiental.

En el Anexo D.5 se presentan los resultados obtenidos para los 4 escenarios evaluados, considerando las 48 series de precipitación y evaporación, así como los valores máximos, mínimos y los promedios obtenidos por cada periodo mensual.

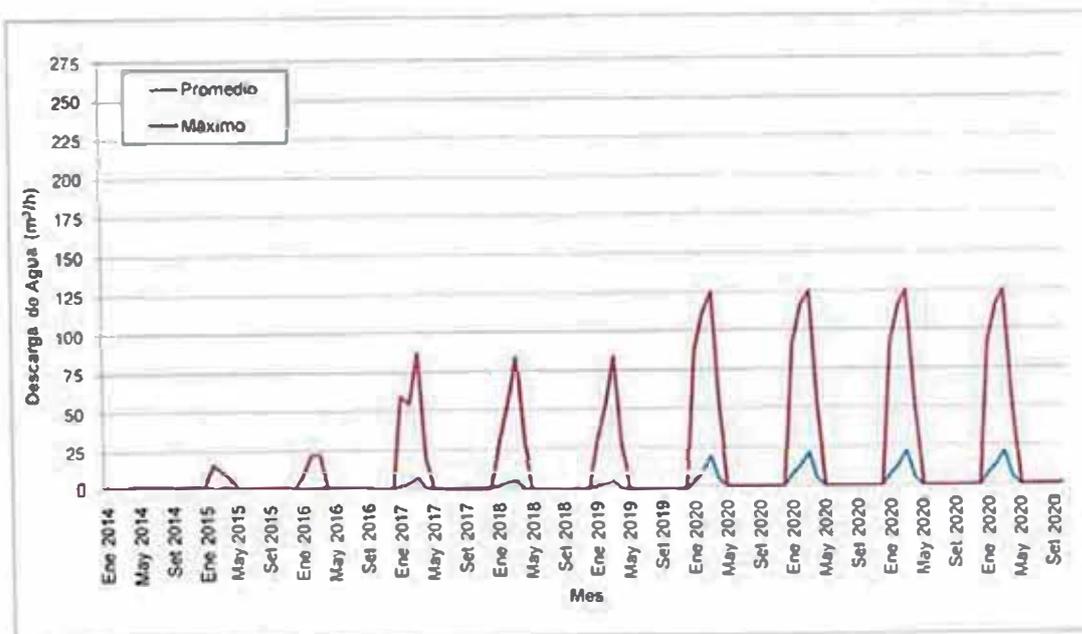
En base a los resultados obtenidos, en las gráficas N° 4.9, 4.10, 4.11 se presentan los valores máximos y el promedio de las descargas de agua por cada mes de operación de la pila de lixiviación, y en el Cuadro N° 4.3 se presenta las descargas máximas y el promedio a nivel anual durante todo el periodo de simulación, los cuales serán utilizados para el dimensionamiento de la planta de tratamiento.



Gráfica N° 4.9: Descarga de agua del sistema - Escenario 1: Sin cobertura impermeable



Gráfica N° 4.10: Descarga de agua del sistema - Escenario 2: 30% de cobertura impermeable



Gráfica N° 4.11: Descarga de agua del sistema - Escenario 3: 50% de cobertura impermeable

Cuadro N° 4.4: Descarga de agua del sistema

Escenario	Año	Descarga de agua (m³/h)	
		Máximo	Promedio
Escenario 1: Sin cobertura impermeable	2014	96.3	14.4
	2015	106.5	19.4
	2016	108.7	16.1
	2017	189.0	50.3
	2018	188.0	43.6
	2019	188.0	45.0

Escenario	Año	Descarga de agua (m <sup>3</sup> /h)	
		Máximo	Promedio
	2020	268.8	82.2
	2021	268.8	84.6
	2022	268.8	87.3
	2023	268.8	81.6
Escenario 2: 30% de cobertura impermeable	2014	33.1	1.9
	2015	75.8	6.5
	2016	64.4	4.1
	2017	122.2	23.9
	2018	122.0	16.9
	2019	122.0	18.4
	2020	174.1	44.1
	2021	188.6	45.9
	2022	188.6	49.2
Escenario 3: 50% de cobertura impermeable	2014	0.0	0.0
	2015	16.2	0.5
	2016	22.1	0.7
	2017	87.5	6.8
	2018	84.0	4.8
	2019	84.0	5.1
	2020	124.7	18.4
	2021	124.7	20.4
	2022	124.7	21.6
Escenario 4: 80% de cobertura impermeable	2014 al 2023	0.0	0.0

Fuente:  Elaboración propia  
 Valor máximo

De acuerdo a los resultados de las gráficas y cuadro anterior la descarga de agua en exceso (agua de purga) por año para un mismo escenario se incrementa conforme se aumenta la producción de la pila de lixiviación, es decir conforme se apila mayores volúmenes de material mineralizado sobre la plataforma de lixiviación; sin embargo, cuando se evalúa la tendencia de los valores máximos de descarga de agua para los diferentes escenarios, se observa que estos disminuyen conforme se incrementa los porcentajes de cobertura impermeable, debido principalmente a que el ingreso de agua de lluvias al sistema se ve limitado.

#### 4.3.5. Planta de tratamiento

El dimensionamiento de esta estructura requerida para el tratamiento de las aguas de purga antes de su descarga al medio ambiente, de acuerdo con la normativa medio ambiental, está en función a la demanda y descarga máxima de agua del sistema del manejo de flujos de la pila de lixiviación asociado con la recuperación de metales.

Los resultados obtenidos para los 4 escenarios analizados se presentan en el Cuadro N° 4.5.

**Cuadro N° 4.5: Dimensionamiento de la planta de tratamiento**

Escenario	Demanda máxima (m <sup>3</sup> /h)	Descarga máxima (m <sup>3</sup> /h)	Capacidad de planta de tratamiento (m <sup>3</sup> /h)
Escenario 1: Sin cobertura impermeable	59.4	268.8	250
Escenario 2: 30% de cobertura impermeable	46.4	188.6	200
Escenario 3: 50% de cobertura impermeable	38.9	124.7	100
Escenario 4: 80% de cobertura impermeable	25.3	0	50

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.6. Volumen de poza Raincoats

El dimensionamiento de la poza Raincoats para los diferentes escenarios analizados ha sido determinado considerando una tormenta de diseño de 66.3 mm para un período de retorno de 100 años, áreas cubiertas de la pila de lixiviación correspondientes a porcentajes de 0, 30, 50 y 80% y una eficiencia de la cobertura impermeable de geomembrana de 90%.

En el Cuadro N° 4.6 presenta los volúmenes de poza Raincoats requeridos para los 4 escenarios evaluados.

**Cuadro N° 4.6: Dimensionamiento de la poza Raincoats**

Descripción	Unid.	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
		0%	30%	50%	80%
Área Total de la pila de lixiviación	m <sup>2</sup>	410 000	410 000	410,000	410,000
Porcentaje de cobertura impermeable utilizados	%	0%	30%	50%	80%
Eficiencia de cobertura impermeable	%	90%	90%	90%	90%
Area de cobertura impermeable	m <sup>2</sup>	0	123 000	205,000	328,000

Descripción	Unid.	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
		0%	30%	50%	80%
Precipitación máxima en 24 h (Tr=100 años)	mm	66.3	66.3	66.3	66.3
Volumen de poza Raincoats (calculado)	m <sup>3</sup>	0	7 339	12 232	19 572
<b>Volumen de poza Raincoats (diseñado)</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>0</b>	<b>8 000</b>	<b>13 000</b>	<b>20 000</b>

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El volumen es el producto del área de cobertura impermeable, la eficiencia y la precipitación máxima en 24 h.

#### 4.4. ESTIMACIÓN DE COSTOS

Para estimar los costos de los 4 escenarios analizados, se ha considerando los costos de construcción de la poza de emergencias y poza Raincoats, costos de instalación del sistema de cobertura impermeable durante la operación de la pila de lixiviación, costo de implementación de la planta de tratamiento y el costo del tratamiento de los volúmenes de agua que serán descargados al medio ambiente.

A continuación se presenta una descripción de las consideraciones asumidas para cada uno de estos.

- Costo por construcción de la poza de emergencias y poza Raincoats: El costo total ha sido estimado considerando los costos asociados al movimiento de tierras y los materiales geosintéticos.
- Costo de la cobertura impermeable: El costo ha sido realizado para cada año de operación de la pila y corresponde al costo por suministro e instalación de la geomembrana de HDPE de 1,5 mm de espesor. Adicionalmente, se ha considerado que la geomembrana puede ser recuperada o reutilizada e un 30% aproximadamente.
- Costo de la planta de tratamiento y del volumen de descarga: Para estimar el costo de la planta de tratamiento y el costo del tratamiento de los volúmenes de descarga se ha utilizado la información presentada en los cuadros N° 4 y 4.5, respectivamente. El costo aproximado para el tratamiento de aguas utilizado ha sido de US\$ 2.0/m<sup>3</sup>.

En el Anexo E se presentan los cálculos realizados para la estimación del costo por cada estructura y escenario evaluado, y en el Cuadro N° 4.7 un resumen de los resultados obtenidos.

**Cuadro N° 4.7: Costo estimado**

Descripción	Escenario 1: Sin cobertura impermeable (US\$)	Escenario 2: 30% de cobertura impermeable (US\$)	Escenario 3: 50% de cobertura impermeable (US\$)	Escenario 4: 80% de cobertura impermeable (US\$)
<b>Poza de emergencias</b>	<b>1 787 380</b>	<b>1 787 380</b>	<b>1 787 380</b>	<b>1 519 273</b>
Movimiento de tierras	1 630 000	1 630 000	1 630 000	1 385 500
Geosintéticos	157 380	157 380	157 380	133 773
<b>Poza Raincoats</b>	<b>0</b>	<b>399 124</b>	<b>417 912</b>	<b>437 040</b>
Movimiento de tierras	0	368 680	378 180	389 310
Geosintéticos	0	30 444	39 732	47 730
<b>Sistema de cobertura impermeable</b>	<b>0</b>	<b>2 780 037</b>	<b>4 633 395</b>	<b>7 413 432</b>
<b>Planta de tratamiento y volúmenes de descarga</b>	<b>15 056 365</b>	<b>10 129 525</b>	<b>5 198 418</b>	<b>1 000 000</b>
<b>Costo Total</b>	<b>16 843 745</b>	<b>15 096 066</b>	<b>12 037 105</b>	<b>10 369 745</b>

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el cuadro anterior los mayores costos para la operación de las pilas de lixiviación relacionadas con el manejo de flujos está en la implementación de la planta de tratamiento y el tratamiento de flujos que deberán ser descargados al medio ambiente, de ahí la importancia de realizar en este tipo de estructuras un análisis de los beneficios que se pueden obtener al incorporar cobertura impermeable sobre su superficie durante la etapa de operación.

Para la pila de lixiviación en estudio conforme se incrementan los porcentajes de cobertura impermeable sobre su superficie (30, 50 y 80%) se obtiene un ahorro económico de 10, 28 y 38% (US\$ 1 747 679, 4 806 640 y 6 474 000), respectivamente, en referencia al escenario 1 donde no se consideraba ningún tipo de cobertura (US\$ 16 843 745).

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo anterior y en base al análisis desarrollado para los 4 escenarios se presentan las siguientes conclusiones:

- Para caracterizar la precipitación de la zona en estudio se ha utilizado la información hidrológica de la estación Chinchayllapa, seleccionada dentro de las 8 estaciones meteorológicas operadas por el SENAMHI, debido a la distribución uniforme que presenta en el análisis estadístico.
- Para caracterizar la evaporación de la zona en estudio se ha utilizado la información hidrológica de la estación Coracora, seleccionada dentro de las 3 estaciones meteorológicas operadas por el SENAMHI, debido a que presentaba una data hidrológica más completa y una longitud de registro actualizada hasta el año 2010.
- Conforme se incrementan el porcentaje de cobertura impermeable sobre la pila de lixiviación, la tendencia del balance de agua pasa de positiva a negativa, es decir al inicio en la pila de lixiviación predomina el ingreso de aguas de lluvia y la necesidad de descargar el agua en exceso al medio ambiente; y al final predominan las pérdida y la necesidad de reponer agua al sistema para sostener el flujo de lixiviación.
- De los resultados obtenidos del balance de agua se observa que al incrementar el porcentaje de cobertura impermeable sobre la superficie de la pila de lixiviación los volúmenes de demanda de agua disminuyen, situación contraria a lo esperado, esto como consecuencia directa que la evaporación anual característica del proyecto (1328.9 mm) es 1.4 veces más que la precipitación anual (950 mm).
- La descarga de agua en exceso del sistema disminuye conforme se incrementa el porcentaje de la cobertura, hasta obtener una descarga de cero para el escenario 4 con 80% de cobertura impermeable.

- Conforme se incrementa el porcentaje de cobertura impermeable sobre la superficie de la pila de lixiviación en 30, 50 y 80%, el costo para el manejo de flujos disminuye en 10, 20 y 30%, debido principalmente a la reducción del tamaño de la planta de planta de tratamiento y los volúmenes de las aguas de purga del sistema que deben ser tratadas antes de su descarga al medio ambiente.
- Al incrementar el porcentaje de cobertura impermeable se puede optimizar el volumen de almacenamiento de la poza de emergencias para reducir los costos iniciales de construcción, sin embargo el impacto de este ahorro no es significativo dentro del costo total del manejo de flujos la pila de lixiviación, debido a que los costos operativos desarrollados en la planta de tratamiento son los que presentan mayor incidencia.
- En base a los resultados obtenidos del balance de aguas y a la evaluación económica desarrollada para los 4 escenarios analizados (0, 30, 50 y 80% de cobertura impermeable), para efectos del presente informe se concluye que el escenario más óptimo para la operación de la pila de lixiviación corresponde al escenario 3, el cual considera revestir el 50% de la superficie apilada con cobertura impermeable, y genera un ahorro económico de US\$ 4 806 640 respecto de la alternativa de no utilizar esta cobertura.
- Para proyectos de pilas de lixiviación, especialmente aquellas estructuras ubicadas en zonas lluviosas, es importante antes realizar un análisis del efecto del uso de las coberturas impermeables sobre su superficie, dado que permite un ahorro económico y la optimización de los costos asignados para el manejo de flujos de la pila de lixiviación.

- Conforme se incrementa el porcentaje de cobertura impermeable sobre la superficie de la pila de lixiviación en 30, 50 y 80%, el costo para el manejo de flujos disminuye en 10, 20 y 30%, debido principalmente a la reducción del tamaño de la planta de planta de tratamiento y los volúmenes de las aguas de purga del sistema que deben ser tratadas antes de su descarga al medio ambiente.
- Al incrementar el porcentaje de cobertura impermeable se puede optimizar el volumen de almacenamiento de la poza de emergencias para reducir los costos iniciales de construcción, sin embargo el impacto de este ahorro no es significativo dentro del costo total del manejo de flujos la pila de lixiviación, debido a que los costos operativos desarrollados en la planta de tratamiento son los que presentan mayor incidencia.
- En base a los resultados obtenidos del balance de aguas y a la evaluación económica desarrollada para los 4 escenarios analizados (0, 30, 50 y 80% de cobertura impermeable), para efectos del presente informe se concluye que el escenario más óptimo para la operación de la pila de lixiviación corresponde al escenario 3, el cual considera revestir el 50% de la superficie apilada con cobertura impermeable, y genera un ahorro económico de US\$ 4 806 640 respecto de la alternativa de no utilizar esta cobertura.
- Para proyectos de pilas de lixiviación, especialmente aquellas estructuras ubicadas en zonas lluviosas, es importante antes realizar un análisis del efecto del uso de las coberturas impermeables sobre su superficie, dado que permite un ahorro económico y la optimización de los costos asignados para el manejo de flujos de la pila de lixiviación.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Para el desarrollo del balance de aguas es importante contar con una data completa de precipitación y evaporación de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, esto con la finalidad que la caracterización climática sea lo más aproximada posible.
- Durante la etapa de operación de la pila de lixiviación es importante instalar dentro de la unidad minera instrumentos de medición de precipitación y evaporación, esto con el objetivo de obtener un registro hidrológico más confiable para actualizar y ajustar el balance de aguas durante la etapa de operación de la pila.
- Para el dimensionamiento de la planta de tratamiento se recomienda utilizar la condición más crítica considerando los valores máximos de descarga de agua.
- En base a los resultados obtenidos, en proyectos de lixiviación que se encuentren en zonas lluviosas como es el caso de estudio, se recomienda el uso de cobertura impermeable, dado que permite minimizar los volúmenes de agua de purga del sistema y por ende disminuir el tamaño y costos de la planta de tratamiento de aguas, los cuales como han sido observado en el presente informe representan un porcentaje importante del costo asignado al manejo de flujos de la pila de lixiviación del proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anddes Asociados S.A.C.; Ingeniería de Detalle Pad de Lixiviación, Botaderos y Pozas – Balance de Aguas. Lima, Perú, 2013.
- Bartlett Robert; Solution Mining: Leaching and Fluid Recovery of Materials. The Netherlands, 1998.
- Breitenbach Allan; Heap Leach Pad Design and Construction Practices in the 21st Century. Colorado, 2000.
- Breitenbach Allan y Smith Mark; Geomembrane raincoat liners in the mining heap leach industry. Geosynthetics, 2007.
- Breitenbach Allan y Smith Mark; La Historia de la Geomembrana en la Industria Minera. Minería & Medio Ambiente, 2007.
- Cesar Carlos, Mendoza Javier y Parra Denys; Heap Leach Pad Design in Very Aggressive Terrain, Heap Leach Conference, Lima, 2014.
- Chow Ven Te, Maidment David y Mays Larry; Hidrología Aplicada. Bogotá, Colombia, 1994.
- Espinoza Jhan; El Método del Vector Regional de Índices Pluviométricos. Perú 2005.
- Pulcha Daniel, Cesar Carlos y Parra Denys; Evaluación de Costos para diferentes Escenarios incorporando Coberturas Impermeables (Raincoats) en la Operación de Pads de Lixiviación. Lima, Perú, 2012.
- Searcy James y Hardison Clayton; Double-Mass Curves Manual of Hydrology: Part 1 - General Surface-Water Techniques. Washington, USA, 1960.

- Van Zyl, Hutchinson y Zyel; Introduction to Evaluation Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Project. Estados Unidos, 1988.
- Villón Máximo; Hidrología. Lima, Perú 2002.