

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



DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN

INFORME DE COMPETENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

CARLOS ENRIQUE AVALO TORRES

Lima – Perú

2015

A la eterna memoria de mi madre, quien con su ejemplo de amor, esfuerzo, trabajo, y superación supo inculcar los valores necesarios para que sus hijos realicen el camino de la vida.

Mi agradecimiento y estima personal al Ingeniero Denys Parra quien siempre estuvo dispuesto y apoyando la realización de este trabajo, a mi esposa por su apoyo y comprensión, a mi familia por el aliento, y a todas aquellas personas que me brindaron su apoyo a lo largo del camino.

INDICE

RESUMEN	4
LISTA DE TABLAS.....	6
LISTA DE SÍMBOLOS	7
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS.....	9
CAPÍTULO I : ASPECTOS GENERALES	10
1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	10
1.2 INFORMACIÓN PROPORCIONADA	10
1.3 CRITERIOS DE DISEÑO	11
CAPÍTULO II : GEOLOGÍA.....	14
2.1 GEOLOGÍA LOCAL	14
2.1.1 Formación Chimu (Ki-chi).....	14
2.1.2 Rocas volcánicas	14
2.1.3 Depósitos cuaternarios	14
2.2 GEOMORFOLOGÍA.....	15
2.2.1 Colinas	15
2.2.2 Laderas de mediana a fuerte pendiente	15
2.2.3 Terrazas aluvio - fluviales.....	16
2.2.4 Valles encañonados.....	16
2.2.5 Lecho fluvial	16
2.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	16
2.4 GEODINÁMICA EXTERNA.....	17
2.5 SISMICIDAD	17
2.5.1 Aceleración de diseño.....	18
2.5.2 Coeficiente sísmico	19
CAPÍTULO III : HIDROLOGÍA Y BALANCE DE AGUAS	20
3.1 HIDROLOGÍA	20
3.1.1 Información básica	20
3.1.2 Revisión de estudios anteriores	21
3.1.3 Hidrografía	22
3.1.4 Clima.....	24
3.1.5 Precipitaciones anuales y mensuales	25
3.1.6 Evaporación en la zona del proyecto	26
3.1.7 Eventos hidrológicos extremos	28

3.1.8	Cálculos hidráulicos	34
3.2	BALANCE DE AGUAS	35
3.2.1	Criterios de la simulación	35
3.2.2	Resultados del balance de aguas	37
	CAPÍTULO IV : INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE CAMPO	40
4.1	CALICATAS	40
4.2	PERFORACIONES	40
4.3	ENSAYOS DE CAMPO	41
4.3.1	Terraplén de prueba	41
4.4	ENSAYOS DE LABORATORIO	42
4.4.1	Ensayos densidad vs porosidad	42
4.4.2	Ensayos densidad vs altura	42
4.5	MAPEO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO	43
4.6	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA CIMENTACIÓN	43
4.6.1	Depósitos morrénicos (unidad geotécnica I)	44
4.6.2	Depósitos aluviales (unidad geotécnica II)	44
4.6.3	Suelos residuales (unidad geotécnica III)	44
4.6.4	Basamento rocoso (unidad geotécnica IV)	44
4.7	NIVEL DE AGUA	45
4.8	NIVEL DE CIMENTACIÓN	45
	CAPÍTULO V : CONSIDERACIONES DEL DISEÑO GEOTÉCNICO	46
5.1	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TALUDES	46
5.1.1	Metodología de análisis	46
5.1.2	Criterios de diseño	47
5.1.3	Condiciones analizadas	47
5.1.4	Propiedades de los materiales	48
5.1.5	Mineral	48
5.1.6	Resultados obtenidos	52
5.2	ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS	53
5.2.1	Asentamiento de la cimentación	53
5.2.2	Metodología del análisis	53
5.2.3	Propiedades de los materiales	55
5.2.4	Resultados del análisis	55
5.2.5	Asentamiento del apilamiento	55
	CAPÍTULO VI : DISEÑO CIVIL DE LAS INSTALACIONES	58

6.1	FASE 5 DEL PAD DE LIXIVIACIÓN.....	58
6.1.1	Plan de nivelación.....	59
6.1.2	Sistema de detección de fugas.....	59
6.1.3	Movimiento de tierras.....	60
6.1.4	Sistema de revestimiento del pad de lixiviación.....	61
6.1.5	Sistema de colección, conducción y distribución de solución.....	64
6.2	CAMINO DE ACCESO PERIMETRAL Y DRENAJE DE AGUAS SUPERFICIALES.....	68
6.3	APILAMIENTO DEL MINERAL.....	69
	CAPÍTULO VII : CANTIDADES Y COSTOS.....	70
7.1	MOVIMIENTO DE TIERRAS Y GEOSINTÉTICOS.....	70
7.2	MATERIALES.....	70
7.3	ESTIMADO DE COSTOS.....	71
	CAPÍTULO VIII : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
8.1	CONCLUSIONES.....	72
8.2	RECOMENDACIONES.....	74
	BIBLIOGRAFÍA.....	77
	ANEXOS.....	78

RESUMEN

El presente Informe de Competencia Profesional expone la metodología y los criterios utilizados en la actualidad que están de acuerdo con la tecnología convencional para realizar el diseño de ingeniería a nivel de detalle de pilas de lixiviación. Se toman en cuenta los criterios geotécnicos del área del emplazamiento, así como los criterios hidrológicos e hidráulicos que mitigarán el impacto al medio ambiente; asimismo, se consideran los requerimientos y la capacidad de producción de mineral del proyecto para el desarrollo del diseño civil de las instalaciones del pad de lixiviación.

Para la elaboración del presente informe de competencia profesional se eligió el desarrollo de la ingeniería de detalle de la fase 5 del pad de lixiviación de una mina ubicada en el norte del Perú, a una altitud aproximada de 3,600 msnm.

Debido a obligaciones contractuales del Diseñador con el Propietario del proyecto, todas las referencias al nombre de la mina, toponimia o ubicación de la proyecto han sido omitidas o cambiadas.

En el diseño civil de la fase 5 del pad de lixiviación se incluyen la configuración general del proyecto, el sistema de subdrenaje, el plan de nivelación, el sistema de revestimiento, el sistema de sobre revestimiento, el sistema de detección de fugas y el sistema de colección de solución. También se incluyen el análisis de estabilidad, la instrumentación geotécnica y el diseño hidráulico e hidrológico de los canales de derivación.

La fase 5 del pad de lixiviación, alcanzará la capacidad de 11 millones de toneladas, tendrá un ciclo de lixiviación de 60 días, una tasa de producción de 30,000 tmpd y una altura de capa de 8 metros. El mineral será acarreado utilizando camiones de carguío.

El sistema de subdrenaje ha sido diseñado para coleccionar los flujos de aguas subterráneas dentro del área de construcción de la fase 5 y está conformado por una red de tuberías perforadas de HDPE de pared doble, colocadas dentro de una trinchera rellena con grava y envuelta con geotextil no tejido.

El sistema de revestimiento del pad de lixiviación está conformado por una capa de geomembrana instalada sobre una base de suelo de baja permeabilidad de 300 mm de espesor. Sobre la geomembrana se colocará una capa de material seleccionado de sobre revestimiento (overliner) de 500 mm de espesor.

Asimismo, el pad de lixiviación contará con un sistema de detección de fugas consistente en una serie de capas de material distribuidas de la siguiente forma: 300 mm de suelo de baja permeabilidad, 300 mm de grava de drenaje envuelta con geotextil no tejido y finalmente 300 mm suelo de baja permeabilidad. Dentro de la capa de grava para drenaje se colocará una tubería perforada de 100 mm que descargará hacia una poza de colección de flujos de subdrenaje.

El sistema de colección de solución de la fase 5 del pad de lixiviación está conformado por una red de tuberías de HDPE de pared doble perforadas de 100 mm de diámetro que se conectan con las tuberías principales de colección, de HDPE de pared doble perforadas de 200 y 300 mm de diámetro.

La distribución del sistema de colección de solución es independiente por cada dos capas de mineral. Cada una de estas capas estará dividida en dos celdas, cuyas descargas serán conducidas a través de buzones de colección de solución independientes, que a su vez dirigirán el flujo hacia la caja de distribución de solución. A partir de este punto, la solución será transportada por medio de dos tuberías de HDPE sólidas hacia las pozas de PLS e ILS, según corresponda.

La solución rica obtenida de la lixiviación será colectada por el sistema de colección formado por tuberías de HDPE perforadas y luego será transportada hacia la poza de PLS a través de una tubería sólida de HDPE de 450 mm de diámetro. Asimismo, la solución intermedia será transportada hacia la poza ILS a través de una tubería sólida de HDPE de 450mm de diámetro.

Las pozas de PLS e ILS existentes de las fases anteriores se unirán mediante un aliviadero para formar un único y nuevo sistema PLS, calculado para almacenar los flujos provenientes del pad más un volumen de contingencia. El diseño civil del proyecto prevé también el diseño de una nueva poza de ILS para almacenar los flujos provenientes del pad de lixiviación más el volumen de contingencias.

El acceso perimetral de la fase 5 del pad de lixiviación se inicia en la zona sur este de las fases existentes hasta llegar a la caja de distribución de solución que se ubica aguas abajo del pad. Este acceso perimetral tendrá un ancho libre de 8 metros y una capa de rodadura de 200 mm de espesor, cuya superficie deberá mantener una inclinación de 2% hacia la parte exterior del mismo

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Criterios de Diseño.....	11
Tabla 3.1	Parámetros Hidrográficos.....	24
Tabla 3.2	Precipitación Típica Mensual Estimada en el Área del Proyecto	26
Tabla 3.3	Evaporación Mensual Estimada	28
Tabla 3.4	Precipitación Máxima en 24 Horas	30
Tabla 3.5	Modelo Precipitación Escorrentía - Parámetros.....	32
Tabla 3.6	Flujos Pico de Diseño.....	33
Tabla 3.7	Diseño de los Canales de Desvío - Pad de Lixiviación	34
Tabla 3.8	Resultados del Balance de Aguas.....	39
Tabla 4.1	Densidad vs Porosidad	42
Tabla 4.2	Densidades vs Altura del Botadero	43
Tabla 5.1	Resumen de Propiedades de Materiales - Pad de Lixiviación	51
Tabla 5.2	Envoltante no Lineal de Interfase Geomembrana / Suelo de Baja Permeabilidad - Fase 3	51
Tabla 5.3	Envoltante no Lineal de Interfase Geomembrana / Suelo de Baja Permeabilidad - Fase 4	52
Tabla 5.4	Resultados de los Análisis de Estabilidad - Pad de Lixiviación	53
Tabla 5.5	Propiedades de Materiales - Análisis de Asentamientos	55
Tabla 5.6	Resultados de Análisis de Asentamientos – Fase 5 del Pad de Lixiviación.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
Adimensional	adim.
Aseguramiento de la calidad de la construcción	CQA
Centímetro por segundo	cm/s
Control de la calidad de la construcción	CQC
Curva número	CN
Dólar norteamericano	\$
Exponente de esfuerzos	a
Factor de seguridad	F.S.
Grados	°
Grados centígrados	°C
Hora	hr
Kilo Newton por metro cúbico	kN/m ³
Kilo Pascal	kPa
Kilómetro	km
Kilómetro cuadrado	km ²
Litros por segundo	l/s
Litros por hora por metro cuadrado	lt/hr/m ²
Libra por pulgada cuadrada	psi
Metro	m
Metro cúbico	m ³
Metro cuadrado	m ²
Metros cúbicos por hora	m ³ /hr
Metros cúbicos por segundo	m ³ /s
Metro por segundo	m/s
Metros en la horizontal por cada metro en la vertical	H:1V
Milímetro	mm
Número de módulo	m
Peso específico	γ
Peak ground acceleration	PGA
Polietileno de baja densidad lineal	LLDPE
Polietileno de alta densidad	HDPE
Porcentaje	%
Run of mine (mineral después de la voladura)	ROM
Servicio de Conservación de Recursos Naturales (Natural Resource Conservation Service)	NRCS
Toneladas métricas por mes	t/mes
Toneladas métricas por año	t/año
Unidad	unid

INTRODUCCIÓN

El presente Informe de Competencia Profesional expone la metodología y los criterios utilizados en la actualidad que están de acuerdo con la tecnología convencional para realizar el diseño de ingeniería a nivel de detalle de pilas de lixiviación. Se toman en cuenta los criterios geotécnicos del área del emplazamiento, así como los criterios hidrológicos e hidráulicos que mitigarán el impacto al medio ambiente; asimismo, se consideran los requerimientos y la capacidad de producción de mineral del proyecto para el desarrollo del diseño civil de las instalaciones del pad de lixiviación.

Para la elaboración del presente informe de competencia profesional se eligió el desarrollo de la ingeniería de detalle de la fase 5 del pad de lixiviación de una mina ubicada en el norte del Perú.

Debido a obligaciones contractuales del Diseñador con el Propietario del proyecto, todas las referencias al nombre de la mina, toponimia o ubicación de la proyecto han sido omitidas o cambiadas.

Los trabajos de diseño de ingeniería de detalle de la fase 5 del pad de lixiviación incluyen la configuración general, el sistema de subdrenaje, el plan de nivelación, el sistema de revestimiento, el sistema de sobre revestimiento, el sistema de detección de fugas, el sistema de colección de solución, el análisis de estabilidad, la instrumentación geotécnica y diseño hidráulico e hidrológico de canales de derivación.

OBJETIVOS

El objetivo de este Informe de Competencia Profesional es proporcionar la información técnica necesaria para la ejecución del diseño a nivel de ingeniería de detalle de un pad de lixiviación, para ello es necesario realizar los siguientes trabajos:

- Revisión de la información de los estudios previos realizados en el proyecto.
- Realización de estudios básicos que permitan el desarrollo del proyecto, tales como hidrología, sismicidad, geología, entre otros.
- Realización de investigaciones geotécnicas en el área destinada para las diversas instalaciones y
- Desarrollo de la ingeniería de detalle de las obras a proyectarse, que permita ejecutar la construcción de las mismas.

CAPÍTULO I : ASPECTOS GENERALES

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Actualmente, la mina para la cual se elaboró el diseño de la fase 5 de pad de lixiviación, se encuentra explotando mineral aurífero a tajo abierto. Las instalaciones de lixiviación están conformadas por un pad de lixiviación construido en cuatro fases, poza de solución Pregnant (Pregnant Leach Solution, PLS), poza de solución intermedia (Intermediate Leach Solution, ILS), poza de mayores eventos, pozas de sedimentación y poza de monitoreo del subdrenaje.

El Propietario ha culminado la construcción de la fase 4 y teniendo en cuenta que las reservas estimadas de la mina ascienden aproximadamente a 80 millones de toneladas métricas de mineral ROM (run of mine), es decir, mineral explotado de la mina y que no es sometido a ningún proceso de chancado o trituración. Se estima que la capacidad total última de almacenamiento de mineral para las cuatro fases componentes del pad de lixiviación de la mina alcanzará los 35 millones de toneladas de mineral ROM, apilados sobre el área disponible para la construcción, por ello se contempla la necesidad del acondicionamiento de un espacio adicional para el apilamiento de mineral, siendo este, la fase 5 del pad de lixiviación, la cual forma parte de las etapas de crecimiento previstas para la mina.

1.2 INFORMACIÓN PROPORCIONADA

Para el desarrollo de la ingeniería de detalle de la fase 5, el Propietario proporcionó la información topográfica, con curvas de nivel cada 2 m y los parámetros de operación y de procesos necesarios para el desarrollo del proyecto, como los ciclos de lixiviación, tasa de producción, reservas, etc. Todos estos parámetros son presentados en la Tabla 1.1 “Criterios de Diseño” en el presente capítulo.

Adicionalmente, se revisó información de los estudios previos acerca de datos de hidrología y sismicidad. Toda esta información ha sido de esencial utilidad para el desarrollo de estudios básicos, tales como hidrología, sismicidad y geotecnia, los que a su vez han servido de base para el diseño de las instalaciones proyectadas.

1.3 CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño que han sido utilizados para el desarrollo de la fase 5 del pad de lixiviación de la mina, se pueden revisar en la Tabla 1.1 que se muestra líneas abajo. Esta información presenta la descripción del criterio utilizado en este estudio, la unidad de medida, y la fuente que proporcionó dicho criterio.

**TABLA 1.1
CRITERIOS DE DISEÑO**

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CRITERIO USADO	FUENTE
1.0	Producción del mineral			
1.1	Tiempo de operación	años	1.02	D
1.2	Producción promedio de mineral	t/mes	900,000	A
		t/año	10'800,000	A
2.0	Características del mineral de mina (ROM)			
2.1	Densidad ROM in-situ	t/m ³	2.5	A
2.2	Densidad del mineral	t/m ³	1.57	A
2.3	Humedad promedio en estación húmeda	%	3.0	A
2.4	Contenido de humedad residual	%	5.0	A
2.5	Absorción, retención de humedad	%	5.0	A
3.0	Sistema de transporte al pad de lixiviación			
3.1	Método de transporte	Camiones CAT 777		A
3.2	Capacidad de los camiones	m ³	100	A
3.3	Unidades	unid	10	A
3.4	Producto	Mineral ROM		A
4.0	Parámetros de diseño de la fase 5 del pad de lixiviación			
4.1	Período de retorno sismo de diseño	años	500	C
4.2	Evento sísmico de diseño ¹	g	0.32	C
4.3	Coefficiente sísmico		0.16	C
4.4	Estabilidad estática, mínimo	F.S.	1.5	C
4.5	Estabilidad pseudo-estática, mínimo	F.S.	1.0	C
4.6	Análisis de deformación ²	si FS Pseudo-estático < 1.0		C
4.7	Período de retorno evento tormenta de diseño del pad ³	años	100	C
4.8	Lluvia para el evento de diseño	mm	78	C
4.9	Sistema revestimiento del pad de lixiviación	simple/doble	simple	B
4.10	Revestimiento pad de lixiviación	tipo	LLDPE	B
		textura	simple texturada	C
4.11	Espesor del revestimiento	mm	1.5	C
4.12	Detección de fugas	S/N	Si	C
4.13	Sistema de subdrenaje	S/N	Si	C

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CRITERIO USADO	FUENTE
4.14	Capacidad total de la fase 5	tm	~11'062,220	C
		m ³	~7'046,000	C
4.15	Área total fase 5	m ²	~ 310,000	C
4.16	Altura típica de capa	m	8	A
4.17	Sistema de colección de la solución	S/N	Sí	A
4.18	Tipo de sistema de colección	gravedad/ bombeo	gravedad	A
4.19	Tuberías de colección de la solución	tipo	tubería pared doble perforada en capa base	C
			tubería pared simple perforada en demás capas	
4.20	Diámetro de tuberías principales de colección de solución	mm	200,300 y 450	C
4.21	Diámetro de tuberías laterales de colección de solución	mm	100	C
4.22	Espaciamiento de tuberías laterales	m	11	C
5.0	Parámetros de lixiviación			
5.1	Tasa de aplicación	lt/hr/m ²	10	A
5.2	Área bajo irrigación	m ²	44,000	A
5.3	Flujo de solución de lixiviación actual ⁴	m ³ /hr	340	D
5.4	Flujo de solución de lixiviación futuro ⁵	m ³ /hr	1,433	D
5.5	Ciclo de lixiviación	días	60	A
5.6	Pérdida de solución total	%	12	A
5.7	Contenido de humedad residual	%	5.0	A
5.8	Contenido de humedad bajo lixiviación	%	8.0	A
5.9	Porosidad del mineral	%	40	A
5.10	Tamaño de boquilla de aspersores	mm	3	A
5.11	Presión de trabajo de los aspersores	psi	12	A
6.0	Criterios para balance de aguas y pozas de procesos			
6.1	Parámetros hidrológicos			
6.1.1	Periodo de retorno de la tormenta de diseño	años	100	B
6.1.2	Tormenta de 24h - 100 años	mm	78.0	D
6.1.3	Periodo de simulación	mes	24	C
6.1.4	Factor de evaporación - pozas	adim.	0.8	C
6.1.5	Factor de evaporación - área en lixiviación	adim.	0.9	C
6.1.6	Factor de evaporación - área no lixiviada	adim.	0.10-0.70	C

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CRITERIO USADO	FUENTE
6.1.7	Pérdida por aspersión/goteo	%	3.0	A
6.2 Capacidades y condiciones iniciales				
6.2.1	Mes de inicio de simulación	Marzo		C
6.2.2	Duración de averías, tiempo de percolación libre	hr	24	B
6.2.3	Volumen mínimo de operación de poza PLS	m ³	2,000	C
6.2.4	Volumen de almacenamiento de sedimentos	m ³	3,800	C
6.2.5	Capacidad total de poza PLS (nueva)	m ³	20,000	A
6.2.6	Capacidad de pozas de procesos (existentes)	m ³	25,000	
6.2.7	Capacidad de total de poza de ME (existentes)	m ³	50,000	D
6.2.8	Volumen de poza de ME al inicio de simulación	m ³	25,000	C
6.2.9	Volumen total de almacenamiento	m ³	70,000	C
6.2.10	Borde libre	m	1.0	C
6.2.11	Coberturas impermeables (raincoats)	Si/No	no	A
6.3 Sistema de monitoreo ambiental				
6.3.1	Sistema de monitoreo ambiental independiente	Si/No	No	B
6.3.2	Planta de neutralización	Si/No	Si	A
6.3.3	Capacidad de planta de neutralización	m ³ /hr	300	A

Código Fuente	Descripción
A	Información o Criterio proporcionado por la minera.
B	Práctica Industrial Estándar.
C	Recomendaciones del diseñador.
D	Criterios a partir de Cálculos de Proceso.

Notas:

1. La aceleración atenuada en el lugar de la mina a nivel de roca basal es aproximadamente 0.32g, considerando un tiempo de exposición de 50 años y un período de retorno de 475 años. El coeficiente sísmico utilizado en el análisis pseudo-estático es de 0.16.
2. Ningún daño significativo deberá producirse en las instalaciones de procesos debido a la ocurrencia de un terremoto severo.
3. El evento de diseño es la tormenta donde el 100% de la escorrentía dentro del pad de lixiviación es transitada a través del pad de lixiviación y en las pozas de pregnant/barren/grandes eventos.
4. Acorde a la información recibida de la minera, el flujo de operación actual es de 340 m³/hr.
5. El flujo de operación futuro estimado es de 1433 m³/hr, según la información proporcionada por el Propietario.

CAPÍTULO II GEOLOGÍA

2.1 GEOLOGÍA LOCAL

En el área del proyecto, los afloramientos rocosos están conformados principalmente por la secuencia sedimentaria sílico-clásticas correspondiente a la formación Chimú (Cretácico inferior). Sobreyaciendo a esta unidad, se presenta una cobertura reciente constituida por potentes depósitos morrénicos, lechos fluvio-aluvionales y depósitos coluviales.

2.1.1 Formación Chimu (Ki-chi)

Los afloramientos de la formación Chimú se distribuyen principalmente en el flanco oriental del área de la fase 5 del pad de lixiviación, donde se extiende a manera de promontorios alargados un tanto aislados, alcanzando su mejor exposición en los sectores del Tajo Suro Norte y Suro Sur donde se presentan formando fuertes escarpas de paredes casi verticales.

Litológicamente, la formación Chimú en el área del proyecto, está constituida en sus niveles inferiores por una secuencia de lutitas, cuyo color varía del gris verdoso al pardo y al negro, las lutitas son friables, fisibles, con niveles de lutitas carbonosas intercalados con areniscas de color pardo a marrones, en estratos de 0.10 a 0.50 m, predominando estas últimas hacia la parte superior. Sobre esta secuencia, se presentan cuarcitas blanquecinas, de grano medio a fino, con niveles brechados y silicificados, de apariencia masiva, que destacan por su dureza y estructuras, que conforman grandes escarpas.

Los afloramientos rocosos presentan rumbo NE-SO con buzamiento general 25° a 30° hacia el E-SE, y dos sistemas de fracturamiento predominante, el principal de rumbo N-S y el segundo transversal a estas estructuras.

2.1.2 Rocas volcánicas

En el área de interés no se observan afloramientos de rocas volcánicas.

2.1.3 Depósitos cuaternarios

a) Depósitos morrénicos (Q-mo)

Los depósitos morrénicos se extienden ampliamente en el área de interés presentando un buen desarrollo en la confluencia del río Suro con la quebrada Paloquián donde se construirá la fase 5 del pad de lixiviación.

Estos materiales están constituidos por arcillas gravosas a gravas arcillosas, arenosas, con bolonería y bloques, encontrándose también materiales cohesivos areno arcillosos a arcillosos. En general se caracterizan por su color anaranjado, húmedo a saturado, con espesores de hasta 100 m.

b) Depósitos aluviales (Q-al) y fluvio aluviales (Q-fl)

Los depósitos aluviales y fluvio aluviales, se extienden a ambos márgenes del río Suro, configurando terrazas de diversa amplitud, los cuales están constituidos mayormente por gravas bien gradadas, con arcilla y arenas, bolonería y bloques de tamaño diverso. Los depósitos fluviales se restringen al cauce del río Suro.

c) Depósitos coluviales(Q-c)

Estos depósitos se hallan distribuidos mayormente en las laderas de los cerros adyacentes a los tajos Norte y Sur, donde alcanzan sus mayores espesores. Están constituidos por gravas con matriz arenosa, de clastos angulosos de areniscas y cuarcitas, estructura estratificada, con lentes de matriz escasa a nula.

2.2 GEOMORFOLOGÍA

El área de estudio está caracterizada por una topografía variada cuya configuración actual es el resultado del devenir de procesos geodinámicos internos y externos que afectaron esta zona del territorio peruano, como parte de su evolución geológica. Regionalmente, está comprendido dentro de las áreas glaciadas, actualmente sometidas a una intensa erosión, cuyo rasgo fisiográfico relevante es el valle interandino Huamachuco - Yamobamba. A continuación se describen las unidades morfológicas identificadas en el área de estudio.

2.2.1 *Colinas*

Geoforma que se encuentra ubicada en el flanco occidental del área de estudio entre la quebrada Tres Cruces y el río Suro. Está constituido por depósitos morrénicos y fluvio-glaciares con diversos grados de erosión. En esta unidad se encuentra emplazada la fase 4 del pad de lixiviación.

2.2.2 *Laderas de mediana a fuerte pendiente*

Unidad morfológica que se extiende en la margen derecha del río Suro frente a todo el pad de lixiviación, esta unidad se encuentra caracterizada por la presencia de afloramientos rocosos de lutitas y areniscas finamente

estratificadas y paquetes de areniscas que configuran pequeñas escarpas de deslizamiento escalonadas, que indican la ocurrencia de este fenómeno a nivel local.

2.2.3 Terrazas aluvio - fluviales

Esta morfología es originada por el proceso de erosión regresivo debido al levantamiento general de los Andes, con el consiguiente rejuvenecimiento de los valles. Se extiende a ambos márgenes del río Suro, presentando su mejor exposición aguas abajo de la zona industrial de la mina.

Están conformadas por sedimentos de arenas, gravas y cantos moderadamente seleccionados, con clastos redondeados, que han sido depositados y posteriormente erosionados, generando su aspecto actual.

2.2.4 Valles encañonados

Morfología configurada por la incisión profunda y acelerada de los ríos sobre formaciones rocosas dando lugar a la formación de acantilados de regular extensión en diversos tramos del río Suro y quebrada Paloquián. La exposición más representativa de esta geoforma se encuentra entre la zona de los tajos Norte y Sur.

2.2.5 Lecho fluvial

Los lechos fluviales se encuentran conformados por el cauce actual y la llanura de inundación del río Suro. Presenta un ancho de 50 a 100 m, donde discurre el curso actual del río y se le distingue por sus características de fondo medianamente amplio a moderado y de baja pendiente longitudinal, constituido por una grava arenosa que hacia sus bordes tiene una delgada cobertura areno-limosa. Lo que permite el desarrollo de una densa vegetación gramínea.

2.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El marco estructural del área de estudio está dado por la presencia de las siguientes estructuras principales:

Falla Yamobamba .- Estructura de carácter regional por su amplitud kilométrica, se extiende con un rumbo predominante NO-SE, siguiendo en parte el curso del río Suro del cual viene a ser su control estructural.

Fallas Alumbre y Central .- Estructuras importantes pero de carácter local, se extienden con rumbo predominante Norte - Sur al Oeste del área de estudio. La

falla Alumbre se caracteriza por ser una falla normal, de alto ángulo, en tanto que la falla Central ha sido descrita como falla de rumbo.

Transversal a las estructuras citadas, se presentan unos sistemas de fallas y fracturas entre las que destacan dos fallas de rumbo SO-NE emplazadas entre el extremo Suroeste (Río Suro) y el botadero Suro Norte. El sistema de fracturamiento de rumbo E-O, es evidente por un conjunto de escarpas conformadas por afloramientos de areniscas y cuarcitas separados por quebradas incipientes de rumbo predominante O-E.

2.4 GEODINÁMICA EXTERNA

En el área de interés se han encontrado evidencias de actividad geodinámica externa como escarpas de deslizamiento, erosión de riberas, inestabilidad y caída de rocas, entre otros agentes que a continuación se detalla:

Escarpas de deslizamiento.- Evidencias de estos fenómenos se presentan en las cabeceras de las pequeñas quebradas del flanco derecho del río Suro. Aquí se observa un desnivel de aspecto circular aunque cubierto de vegetación, cuya traza indica la ocurrencia de antiguos desplazamientos.

Erosión de riberas.- Este fenómeno se evidencia principalmente en el curso del río Suro, conformando terrazas originado por la dinámica del río. La presencia de una intercalación de gravas con niveles de turba indica periodos de relativa calma con eventos de crecidas y fuerte erosión.

Erosión de laderas.- No se han encontrado cárcavas o surcos profundos que muestren actividad considerable de los agentes erosivos.

2.5 SISMICIDAD

Dentro del territorio peruano se han establecido diversas zonas, las cuales presentan diferentes características de acuerdo a la mayor o menor presencia de sismos. Esta sismicidad es producto principalmente de la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Continental a lo largo de la costa peruana, con un índice de convergencia de aproximadamente 10 cm por año.

Según el Mapa de Zonificación Sísmica propuesto en la Norma de Diseño Sismorresistente E.030, del Reglamento Nacional de Construcciones (1997), el área de estudio se encuentra comprendida en la Zona 3, correspondiéndole una alta sismicidad, habiendo ocurrido en el área cercana al proyecto sismos de

intensidades de VI en la Escala de Mercalli Modificada, según la información de sismicidad histórica recopilada por Silgado (1978).

2.5.1 Aceleración de diseño

De acuerdo al estudio de riesgo sísmico realizado por Knight Piésold (2000) en un proyecto minero cercano a la zona del proyecto, se reporta que la mayoría de los sismos ocurridos en el área de influencia fueron eventos en zonas de subducción con pocos eventos superficiales provenientes de fallas activas en los alrededores. Los sismos más grandes de la historia, con una magnitud de $M_s=8.6$ en 1619 y $M_s=8.7$ en 1907, fueron eventos producidos en la zona de subducción. Desde 1619 hasta 1998 se reportaron un total de cuatro eventos en la zona de subducción de magnitud 7 ó mayor, dentro de un radio de 150 Km. del área de interés. Otro evento de magnitud 7 ó mayor ha sido reportado en un registro como un evento superficial ocurrido a una profundidad de 15 Km., mientras que en los alrededores del lugar fueron registrados pocos eventos indicando que existe poca actividad de fallas capaces de producir eventos superficiales en la región. El estudio de riesgo sísmico citado recomienda utilizar eventos de diseño de $M_s=7.2$ y aceleración de 0.20g para una vida del proyecto de 10 años y $M_s=7.5$ y aceleración de 0.25g para una vida de 20 años. No se establece criterios de diseño a largo plazo, considerando la etapa post-cierre de las instalaciones.

Por otro lado, según el Mapa de Fuentes Sismogénicas Superficiales, propuesto por Castillo y Alva (1993), la máxima magnitud que puede ocurrir en el área del proyecto asociada a estas fuentes es de 7.4. Asimismo, los mismos autores han presentado un mapa de isoaceleraciones determinadas a partir de criterios probabilísticos, considerando un porcentaje de excedencia de 10% para una estructura cuya vida útil será de 50 años, lo cual corresponde a un tiempo de retorno del sismo máximo probable de 475 años. Para el área en estudio, los autores proponen una aceleración máxima de 0.32g, tal como se ilustra en la Figura 2.1 del Anexo I.

El periodo de retorno antes indicado es consistente con lo estipulado por el Ministerio de Energía y Minas para el análisis sísmico de depósitos de relaves en condición de abandono y puede ser extrapolado para el caso de un pad de lixiviación, considerando el periodo de vida operativo y la etapa post-cierre. Por lo tanto, para el análisis sísmico de la fase 5 del pad de lixiviación se utilizó un

valor de 0.32g como aceleración máxima esperada (Peak Ground Acceleration, PGA) en la zona del proyecto.

2.5.2 *Coefficiente sísmico*

De acuerdo a la literatura técnica existente ampliamente aceptada internacionalmente, se recomienda que el coeficiente sísmico a ser considerado en el análisis en la condición pseudo-estática de diseño de taludes, sea obtenido como una fracción que varía entre 1/3 a 1/2 de la máxima aceleración esperada (PGA). Esta recomendación es consistente con las recomendaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, Hynes y Franklin, 1984), quienes sugieren el uso de un coeficiente sísmico pseudo-estático igual al 50% de la aceleración pico de diseño.

La recomendación del Cuerpo de Ingenieros está basada en la aplicación del método de Newmark para calcular desplazamientos permanentes en presas de tierra utilizando más de 350 registros sísmicos, concluyéndose que estas estructuras analizadas con el método pseudo-estático con factores de seguridad mayores que 1.0 utilizando un coeficiente sísmico horizontal de $0.5 \times \text{PGA}$ no desarrollan deformaciones mayores a 1 m, que es un valor arbitrario que puede ser tolerado por presas de tierra, sin representar una amenaza a la integridad de la estructura.

Por lo tanto, se recomienda utilizar un coeficiente sísmico de 0.16 para el análisis pseudo-estático en el diseño de taludes de la fase 5 del pad de lixiviación.

CAPÍTULO III HIDROLOGÍA Y BALANCE DE AGUAS

3.1 HIDROLOGÍA

Mediante el estudio hidrológico se evalúa la interrelación del agua con las condiciones propias del lugar y define parámetros que pueden emplearse en el cálculo del balance de aguas (precipitaciones y evaporaciones), y el sistema de drenaje del pad de lixiviación.

Acorde con los criterios de cierre establecidos en la Guía Ambiental para Proyectos de Lixiviación en Pilas del Ministerio de Energía y Minas, se estableció que para el diseño del sistema de encauzamiento del río Suro se debía utilizar la tormenta de 500 años de periodo de retorno.

En las determinaciones hidrológicas se utilizaron las precipitaciones máximas definidas en estudios anteriores desarrollados para el ámbito del proyecto.

Aprovechando los registros horarios de las precipitaciones máximas observadas en estaciones de minas cercanas al área de estudio se desarrolló un patrón temporal de tormenta. Para el cálculo de los caudales pico de diseño se elaboró un modelo de precipitación de escorrentía de acuerdo con la geomorfología y características hidrológicas locales.

3.1.1 Información básica

La información básica se obtuvo de registros de estaciones meteorológicas del SENAMHI cercanas al área del proyecto. En la Tabla C.1 del Anexo C se indican la posición, altitud y tipo de las estaciones consideradas. En la Figura 3.1 del Anexo I se muestra la posición geográfica del área de estudio y la ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas al área del proyecto.

En la Figura 3.2 del Anexo I se muestra las series de datos que se dispusieron de cada estación, para cada una de las variables mencionadas, incluyendo también las longitudes de registro consideradas no confiables. Previo al uso de la información se efectuó un análisis de consistencia de las series de precipitaciones. La información consistió en registros de precipitaciones mensuales, anuales, y máximas diarias, y datos climáticos de temperatura, vientos, etc.

También se aprovecharon los registros de precipitaciones horarias de las estaciones ESTM-01 en la mina Alto Chicama, y de las estaciones Pacchac y

Mina en la Mina Pierina, los que fueron utilizados en la definición de la forma de ocurrencia de las precipitaciones en periodos de corta duración.

Complementaron la información básica, las conclusiones indicadas en estudios hidrológicos regionales, sobre precipitaciones y evaporaciones, de los cuales cabe resaltar el Estudio de la Hidrología del Perú, UNI-IILA-SENAMHI y la Caracterización Hidrológica del Perú, Salzitter-ELECTROPERU (1984); así también la información registrada en los estudios previos sobre el proyecto de la mina.

3.1.2 *Revisión de estudios anteriores*

Los flujos máximos se estimaron en el estudio de línea base del proyecto (SGS, 1999) y en el Estudio Hidrológico del Área de Influencia del Tajo Abierto del proyecto (Hydro-Geo, 2002); habiéndose reportado estimados diferentes de $38 \text{ m}^3/\text{s}$ y $60 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, para la avenida de 100 años de periodo de retorno; y de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ para la avenida de 500 años (Hydro-Geo). Las diferencias se debieron a las distintas metodologías aplicadas, avenida índice en un caso y modelos de precipitación escorrentía en el otro.

Los puntos donde se evaluaron de flujos pico de cada estudio son distintos, incluso con el punto de interés actual. La evaluación de flujos del estudio de SGS fue realizada en la desembocadura del río Suro involucrando toda su área de drenaje (52.5 km^2); mientras que el estudio de Hydro-Geo evaluó los flujos en la confluencia con la quebrada Alumbre (abarcando 38.3 km^2).

En el último estudio se advirtió que los caudales pico fueron calculados con el método del hidrograma unitario pero sin ejecutar la transformación de convolución de precipitaciones requerida, ni integrar el modelo sumando los hidrogramas de cada subcuenca. En vez de ello se sumaron los picos, lo que no toma en cuenta el desfase entre picos provenientes de las subcuencas. Otra situación observada es que los flujos pico estimados para un periodo de retorno de 2 años son bajos ($1.7 \text{ m}^3/\text{s}$), habiéndose monitoreado flujos en situaciones normales, es decir, no precisamente en sucesos de tormentas, de 3 a $7 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto último puede explicarse por la falta metodológica indicada, y/o por una subestimación de las precipitaciones.

En el estudio del canal de derivación del río Suro, se superaron las omisiones identificadas en los estudios previos y se pone particular interés en la definición

de las precipitaciones de diseño, la concepción del modelo y en la caracterización hidrológica del suelo. Lo último tiene consecuencia en la evaluación de la precipitación efectiva relacionada con el volumen y pico de las esorrentías. Así, para el presente estudio, cuyo punto de interés está inmediatamente aguas arriba de la confluencia con la quebrada Paloquián (abarcando 39.3 km²), se toman en cuenta los parámetros y datos hidrológicos ya evaluados e identificados en la zona del proyecto, siendo lo más importante la evaluación ya realizada de la precipitación de diseño para el periodo de retorno de 500 años.

3.1.3 *Hidrografía*

Desde el punto de vista fisiográfico la mayor parte de las cuencas relacionadas con el estudio presentan en su tramo superior una configuración típicamente glacial con colinas onduladas, valles en "U", lagunas en rosario y depósitos de morrenas, las que han originado una topografía relativamente suave, ondulada y con taludes de baja pendiente que varían entre 15° y 25° como máximo. Valles en "V" se observan en los cursos bajos donde los cauces se han abierto paso a través de gargantas excavadas en afloramientos de rocas ígneas.

Se identifican dos grandes paisajes: planicie aluvial y montaña erosional, las cuales están definidos por las formas y características del relieve, litología y procesos de formación. Las formas de tierra varían desde planicies plano-onduladas (2 a 4% de gradiente), hasta montañas muy empinadas (mayores a 50%). En el área del emplazamiento, se ha identificado el paisaje de montañas de calizas y lutitas del Cretáceo Jurásico del gran paisaje montaña erosional.

Desde el punto de vista hidrográfico el área de estudio se encuentra ubicada en la cuenca del río Suro. Este curso de agua pertenece a la vertiente del Atlántico, cuenca hidrográfica del Maraón.

El río Suro se compone de las subcuencas Cuchicorral, Escalerilla, Paloquián y Alumbre. La extensión total de esta cuenca es de 52.5 km².

El río Suro tiene sus nacientes en un sistema de lagunas ubicadas en los 4,800 msnm; de las cuales descienden dos quebradas del mismo orden Escalerilla y Cuchicorral.

La naciente de la quebrada Escalerilla, se origina en un sistema de tres pequeñas lagunas en cascada, a una altitud aproximada de 3,950 msnm. Estas

lagunas son de origen glaciar y durante la época de estiaje se alimentan de filtraciones provenientes de los cerros Laguna Larga y Escalerilla, y durante la época de avenidas, de las precipitaciones en la parte alta.

La naciente de la quebrada Cuchicorral, se origina a partir de las filtraciones de la cordillera Cerro de Oro, ubicada a una altitud aproximada de 4,025 msnm. La confluencia de las quebradas Cuchicorral, por la izquierda, y Escalerilla, por la derecha, forman el tramo fluvial conocido como el río Suro.

El río Suro aguas abajo recibe los aportes de la quebrada Alumbre, por la margen izquierda, y de la quebrada Paloquián por la margen derecha, que constituyen las únicas fuentes de agua importantes después de la formación del río Suro. La quebrada Paloquián se ubica fuera del área de influencia del tajo abierto proyectado. Otras fuentes menores de alimentación son los manantiales u ojos de agua, localizadas principalmente en las colindancias de la parte baja de la quebrada Alumbre.

El río Suro, así como las quebradas Cuchicorral y Escalerilla, tienen un régimen intermitente, manteniendo un caudal base en la temporada seca del año y aumentando su caudal en respuesta directa a precipitaciones efectivas en la temporada húmeda (Octubre a Abril). Las quebradas menores Alumbre y Paloquián, tienen un régimen efímero, llegando a reducirse o agotarse en las temporadas secas, durante los meses de Agosto a Septiembre.

La parte alta de la cuenca, donde el relieve es muy accidentado no es extensa alcanzando 2 km² de cerros abruptos, quebradas y afloramientos rocosos. Al pie de esta zona predominan los pastos naturales de altura (ichu) y zonas planas con lagunas. En la parte más baja la topografía es más suave, presentándose bofedales, suelos erosionables, lomas cubiertas por pastos naturales y escasa vegetación arbustiva, y bosques residuales de ribera en las partes bajas del Río Suro.

La Tabla 3.1 presenta los principales parámetros hidrográficos de las cuencas naturales mencionadas. Puede notarse que presentan características geomorfológicas similares de elongación de las cuencas, lo que implica que cabe esperar hasta cierto punto similares tipos de respuesta hidrológica ante sucesos de precipitación.

**TABLA 3.1
PARÁMETROS HIDROGRÁFICOS**

ÍNDICES MORFOLÓGICOS	CUENCA				
	RÍO CUCHICORRAL	QDA. ESCALERILLA	QDA. ALUMBRE	QDA. PALOQUIÁN	RÍO SURO TODO
Área (km ²)	17.9	16.0	2.1	9.4	52.5
Perímetro (km)	21.2	19.6	6.0	14.9	33.5
Longitud de cauce (km)	9.4	7.2	2.3	6.6	15.0
Índice de Compacidad	1.41	1.38	1.17	1.37	1.30
Factor de Forma	0.20	0.31	0.40	0.22	0.23
Pendiente prom. del cauce	6.5%	6.9%	17.4%	10.1%	6.4%
Pendiente prom. del relieve	25.6%	17.7%	23.9%	15.4%	20.6%

Para los fines de cálculo hidrológico en el presente estudio, la cuenca de influencia se define por el punto localizado en una sección del río justo antes de la confluencia del río con la quebrada Paloquián, lugar donde termina el botadero de desmonte y el pad de lixiviación (ver Figura 3.3 de Anexo I), aguas abajo del proyecto de ampliación del tajo. La cuenca respectiva incluye a las subcuencas de las quebradas Cuchicorral (17.89 km²), Escalerilla (16.05 km²), y el área de la subcuenca del río Suro (5.46 km²) hasta el punto de confluencia antes referido. La quebrada Alumbre es actualmente desviada hacia la quebrada Tres Cruces, siendo materia de otro proyecto.

3.1.4 *Clima*

El clima de acuerdo a Thornthwaite, es subhúmedo seco, megatermal con pequeña ausencia de excedentes. Según Koeppen, es lluvioso, cálido y templado con invierno moderado y seco, de verano moderado y corto, con las siguientes características:

- En el área del proyecto la temperatura media anual fluctúa entre 10°C y 11°C, hacia el Sur-Oeste y en la parte central de la cuenca, alcanzan valores entre 9°C y 10°C; sin embargo, al Nor-Este y Nor-Oeste de la misma, a mayor altitud, se registran temperaturas medias anuales fluctuantes entre 7°C y 9 °C;
- La precipitación total promedio anual es de 1 262 mm;

- La evaporación anual es de 1 209 mm.
- La humedad relativa promedio mensual fluctúa entre 75% a 90%, registrándose los mayores valores en los meses de Enero, Febrero y Marzo y los menores valores en el mes de Agosto; y
- Los vientos registran dirección predominante Nor-Nor Oeste (NNO), con rangos de velocidad entre 1 y 12 km/h.

3.1.5 *Precipitaciones anuales y mensuales*

Hidrológicamente, el régimen de descargas tiene correspondencia directa con el régimen de ocurrencia de precipitaciones, así se tiene que el período de avenidas se inicia en el mes de octubre y termina en el mes de abril, presentando sus valores máximos en los meses de febrero y marzo.

Las precipitaciones anuales en la región del proyecto están influenciadas por el factor orográfico, advirtiéndose una relación creciente de la precipitación anual con la altitud (ver Figura 3.4 del Anexo I).

En los estudios correspondientes de las fases 1 a 4 del desarrollo de la pila de lixiviación, se desarrolló una relación precipitación media anual versus altitud, basada en los registros de estaciones cercanas al área de estudio, que conjuntamente con la aplicación de calibraciones efectuada con datos de volúmenes en las pozas de lixiviación, flujos de riego y precipitaciones durante la temporada 2004-2005, estima la precipitación media anual en el área del proyecto como el 90% de la precipitación media anual registrada en el pluviómetro de Shorey, la misma que fue seleccionada como característica de la región, por la cercanía en posición geográfica y altitud así como por la conveniencia de la longitud del periodo de registro. La Tabla C.2 del Anexo C, muestra la serie de precipitaciones mensuales calculadas para el área del proyecto. La Figura C.1 del Anexo C muestra la comparación de la variación de la precipitación anual en Shorey, Huangacocha y la estimada en el área del proyecto para el periodo común de análisis.

El régimen de las precipitaciones es estacional registrándose los valores más altos de octubre a abril originando el denominado periodo de lluvias. Los valores mínimos anuales ocurren en los meses de julio y agosto durante el periodo de estiaje. La Figura 3.5 del Anexo I muestra la distribución típica de las lluvias anuales en el sitio del proyecto, en términos de cantidades promedio, asimismo, la Tabla III.2 muestra las precipitaciones promedio, desviación estándar,

mínimas y máximas mensuales consideradas representativas para el área del proyecto.

TABLA 3.2
PRECIPITACIÓN TÍPICA MENSUAL ESTIMADA EN EL ÁREA DEL PROYECTO

MES	PROMEDIO (mm)	DESV. EST. (mm)	MÁXIMA (mm)	MÍNIMA (mm)	% ANUAL (mm)
Enero	150	68.9	333.9	47.7	12%
Febrero	182	72.8	416.7	45.9	14%
Marzo	205	61.6	338.1	89.1	16%
Abril	161	45.4	279.9	62.1	13%
Mayo	74	37.5	179.1	13.7	6%
Junio	33	22.4	91.4	0.0	3%
Julio	17	14.4	63.0	0.0	1%
Agosto	22	20.2	80.1	0.0	2%
Septiembre	69	40.7	177.3	0.0	5%
Octubre	126	52.7	239.4	23.4	10%
Noviembre	105	40.8	219.2	4.6	8%
Diciembre	119	54.2	217.8	0.0	9%
Anual	1262	205.9	1715.4	860.4	100%

3.1.6 Evaporación en la zona del proyecto

Se cuenta con datos de evaporación tipo Piché en caseta sólo en las estaciones de Huamachuco (1965-2001), Santiago de Chuco (1967-1981) y Cajabamba (1977-2003); presentando discontinuidades y poca longitud de registro. Las evaporaciones anuales oscilan entre 809 y 1336 mm, 1000 y 1774 mm, 721 y 1392mm, respectivamente.

En el estudio Evaluación del Potencial Hidroeléctrico Nacional (Consortio Lahmeyer-Salzgitter LIS, 1980) se condujo un extenso análisis de las evaporaciones observadas en el Perú, de tal manera que las evaporaciones medidas con evaporímetro Piché pueden convertirse a evaporaciones medidas en Tanque A.

Un evaporímetro Piché consta de un tubo cilíndrico de vidrio de 25 cm de largo y 1.5 cm de diámetro abierto por un extremo y cerrado por el otro, con un escala creciente grabada en milímetros. El evaporímetro se rellena de agua, se tapa con un disco de papel filtro normalizado y se cuelga con este en la parte inferior.

Al día siguiente se vuelve a medir la altura de la columna de agua y la diferencia de entre ambas lecturas es la evaporación potencial del día anterior.

Un evaporímetro de Tanque A consta de un tanque cilíndrico de lámina galvanizada, de 1.21 m de diámetro y 25 cm de profundidad, se coloca sobre una plataforma de madera de 10 cm de alto, perfectamente horizontal. En este tipo de evaporímetro se mide el nivel de agua para mantener el nivel constante, en una unidad de tiempo que puede ser 6, 12 o 24 horas. El volumen de agua consumido se transforma en milímetros de agua evaporada por unidad de tiempo.

La diferencia de las medidas de evaporación entre los evaporímetros de Tanque A y Piché provienen de distintos factores, por ejemplo la temperatura del ambiente la cual afecta al equipo de medición ya que el calor absorbido por las paredes del evaporímetro representa una entrada de energía adicional, una proporción de la cual se transforma en evaporación, conduciendo a una sobreestimación de la evaporación en zonas bajas y medianas y a una subestimación en zonas de altura debido al congelamiento y descongelamiento del agua en el evaporímetro, proceso que absorbe energía que de otro modo contribuiría a la evaporación.

En el estudio de Evaluación del Potencial Hidroeléctrico Nacional se determinó un factor de corrección de evaporaciones utilizando los datos de 35 estaciones que tenían ambos tipos de evaporímetros deduciéndose el valor de 1.1 para transformar los datos de Piché a estimados de Tanque A.

Debido a la proximidad en altitud entre Huamachuco, Santiago de Chuco y el área del proyecto se decidió utilizar el promedio de los registros de las estaciones mencionadas como el representativo del área del proyecto. A fin de emplear los registros de la estación Cajabamba, en los años en que ésta es la única estación con información, se utilizó un factor de corrección que permita poner los órdenes de magnitud de los registros de Cajabamba acordes con los asignados al área del proyecto. Es importante señalar que las series de tiempo de las evaporaciones anuales en las estaciones mencionadas, muestran una gran similitud en sus tendencias y oscilaciones.

El promedio conseguido coincide muy bien con las isolíneas del Mapa de Evaporación del Perú, (SENAMHI, 1993), que estiman la evaporación anual en el área del proyecto entre 1 000 y 1 200 mm (ver Figura 3.6 del Anexo I).

Cabe indicar que el mapa de evaporaciones se elaboró utilizando registros de 1972 a 1981, con cantidades correspondientes a evaporaciones en tanques Tipo "A". La Tabla III.3 y Figura 3.5 del Anexo I muestran las evaporaciones de tanque típicas estimadas para el sitio del proyecto. La Tabla C.3 del Anexo C muestra la serie generada, empleada para el balance de aguas.

TABLA 3.3
EVAPORACIÓN MENSUAL ESTIMADA

MES	PROMEDIO (mm)	DESV. EST. (mm)	MÁXIMA (mm)	MÍNIMA (mm)	% ANUAL
Enero	80.7	27.8	149.8	19.3	7%
Febrero	58.2	20.0	94.6	20.7	5%
Marzo	60.1	20.4	114.4	27.0	5%
Abril	67.5	23.7	130.2	16.1	6%
Mayo	96.6	29.1	149.1	32.5	8%
Junio	118.8	33.5	180.9	35.1	10%
Julio	147.9	31.3	235.4	99.6	12%
Agosto	149.3	30.5	214.8	63.1	12%
Septiembre	126.7	27.4	187.3	75.4	10%
Octubre	103.5	29.4	165.7	64.3	8%
Noviembre	103.8	30.5	173.9	31.6	9%
Diciembre	95.5	31.3	176.8	38.8	8%
Anual	1208.6	188.2	1605.8	861.7	100%

3.1.7 *Eventos hidrológicos extremos*

a) Precipitaciones máximas en 24 horas

Se revisaron las precipitaciones máximas en 24 horas asignadas al área del proyecto por estudios precedentes, se tomó en cuenta la recopilación de información de las estaciones cercanas y de estudios hidrológicos desarrollados para minas de la zona. Las series de precipitaciones máximas anuales se muestran en la Tabla C.4 del Anexo C.

Las series de máximas anuales fueron ajustadas a cuatro modelos probabilísticos (GEV, Lognormal-3, LogPearson III, Pearson III), seleccionándose el modelo GEV en base a índices estadísticos de bondad de ajuste, los cuales sin embargo no rindieron diferencia marcada de preferencia respecto a las demás distribuciones (ver Tablas C.5A a C.5H del Anexo C). Los registros con datos incompletos fueron adaptados utilizando métodos de umbrales históricos

(Historical Flow Threshold), asumiendo que la precipitación no registrada era del orden de la máxima precipitación medida en las estaciones cercanas en el mismo año.

Para obtener las precipitaciones máximas en 24 horas, las precipitaciones máximas diarias fueron ajustadas por el factor 1.13, con el fin de corregir los sesgos de subestimación de mediciones tomadas en intervalos fijos cada 24 horas. Cabe indicar que en estudios precedentes, fue verificada la aplicabilidad a la región de la relación de precipitaciones máximas en 24 horas a máximas diarias de 1.13 recomendada por la WMO (World Meteorological Organization). Estudios precedentes verificaron dicho factor, luego de analizar los registros horarios de precipitaciones de las estaciones Mina y Pachacc de la mina Pierina, y la estación ESTM-01 de Alto Chicama, seleccionadas debido a la disponibilidad de datos.

Las distribuciones de precipitaciones máximas diarias evaluadas en las estaciones cercanas se muestran de la Tabla C.5A a la Tabla C.5H, del Anexo C. Las Tablas C.6A y C.6B, muestran las precipitaciones máximas de 24 horas en 100 y 500 años, a la cual se prestó atención especial por ser la variable de diseño. Las Figuras 3.7 y 3.8 del Anexo I muestran las precipitaciones de 24h-100 y 24h-500 años evaluadas en cada estación versus la altitud correspondiente, junto con una banda que muestra el rango de predicción que cubren las diferentes funciones de distribución probabilísticas empleadas. Las Figuras 3.9 y 3.10 del Anexo I, muestran la distribución espacial de dichas variables.

De los resultados expuestos cabe hacer las siguientes observaciones:

- No hay tendencia clara de dependencia de las precipitaciones de 24h-100 ni de las precipitaciones de 24h - 500 años con la altitud y tampoco aparece un patrón marcado en la distribución espacial;
- Los índices de medición de mejor ajuste a distribuciones de frecuencia no indican una diferenciación marcada para preferir una distribución a otra. La distribución seleccionada, GEV, proporciona valores intermedios a los estimados por las demás distribuciones; y
- El mayor valor en la región con la distribución seleccionada lo proporciona de estación de Cajabamba con 78 y 90 mm para las precipitaciones 24h-100 y 24h y 500 años, respectivamente.

Para condiciones extremas (tormentas con altos períodos de retorno), la curva de Cajabamba se considera la más apropiada para caracterizar las precipitaciones de corta duración en el área del proyecto. De manera conservadora, es preferible utilizar los valores más altos de precipitación extrema, dado que los valores de precipitación máxima serán utilizados para el diseño de las estructuras de cierre cuya falla tendría impactos importantes.

La Tabla 3.4 muestra las precipitaciones máximas en 24 horas, para diferentes periodos de retorno.

**TABLA 3.4
 PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS**

PERIODO DE RETORNO	P_{MAX-24H} (mm)
2 años	40
10 años	58
50 años	72
100 años	78
200 años	83
500 años	90

b) Tormenta de diseño

La distribución temporal de la tormenta de diseño fue obtenida aprovechando datos de registros horarios de las estaciones en la región. Con el propósito indicado se usaron los registros de las estaciones meteorológicas en Alto Chicama (estación ESTM-01) y Pierina (estaciones Mina y Pacchac). Fueron analizados los eventos iguales o mayores de 30 mm diarias, las que corresponden de manera gruesa a tiempos de retorno de 2 ó más años (20 eventos).

Inspeccionando los hietogramas de las tormentas máximas se definió la duración de la tormenta de diseño en 6 horas. Cálculos estadísticos fijaron el cociente para determinar la fracción promedio de P_{máx-6h} con respecto a la P_{máx-24h} en 0.81 (Ver Tabla C.7 en el Anexo C).

El patrón temporal de la tormenta fue obtenido aplicando el método AVM (Average Variability Method, Pilgrim y Cordery, 1975). Esta metodología es la estándar en el diseño hidrológico de varios países y tiene una mejor precisión que los promedios simples. Consiste en un análisis de hietogramas basado en el

ordenamiento de los intervalos de tiempo de una tormenta teniendo en cuenta la profundidad de precipitación que ocurre en cada uno de ellos. Sumando el orden de cada intervalo puede obtenerse la forma típica del hietograma.

La parte de la distribución de duraciones menores a 1 hora, en la hora de precipitación más intensa, se infirió aplicando la fórmula de Bell (1969). Estudios recientes (Mauriño, 2004) reportan y confirman la eficacia de la fórmula para una gran variedad de zonas climáticas. Las Tablas C.8A y C.8B del Anexo C muestran la distribución temporal de la tormenta de diseño para periodos de retorno de 100 y 500 años respectivamente.

c) Descargas de diseño del canal de encauzamiento

La descarga de diseño para el río Suro fue calculada en base al evento de 24h - 500 años de periodo de retorno.

Se analizó la posibilidad de emplear distintos métodos para el cálculo de escorrentías en el área del proyecto, entre ellas el método racional, pero como la extensión de la cuenca es superior a los límites de aplicación que distintos autores atribuyen a este método (1 a 10km²) y como los resultados que este método arroja son sobreestimados se optó por buscar otra alternativa. Por esta razón se empleó el método del diagrama unitario en el modelamiento hidrológico del proyecto.

El modelo de sustracción hidrológica aplicado al modelo hidrológico seleccionado fue el del NRCS. Se prefirió este método porque depende de un solo parámetro llamado curva número (CN). En base a la clasificación de suelos del NRCS, despejada con ensayos de permeabilidad en el sitio, se asignó el parámetro CN = 82 para las zonas bajas e intermedias de cada subcuenca y el parámetro CN = 78 para las zonas altas de las quebradas Escalerilla y Cuchicorral a fin de considerar el efecto de los empozamientos y lagunas presentes.

El método del hidrograma unitario fue aplicado por cuanto su rango de aplicación concierne a cuencas de extensión mediana como es el caso. El tipo de hidrograma unitario aplicado fue el de Clark pues permite modelar el grado de difusión producido en la cuenca, que es obtenido empleando el tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento. El coeficiente de almacenamiento fue calculado siguiendo la metodología descrita en *Water-*

Resources Investigations Report 00-4184 (USGS, 2000) para cuencas medianas. Con propósitos de comparación se realizaron análisis empleando el hidrograma unitario del NRCS. En este caso el empleo del hidrograma del NRCS rinde picos ligeramente menores. Puesto que el hidrograma del NRCS es identificado con cuencas de muy pequeña difusión (recomendado preferentemente para cuencas urbanas), los coeficientes de almacenamiento estimados con la metodología indicada se consideran bastante conservadores. La Tabla C.9 del Anexo C muestra las características de las cuencas así como los tiempos de concentración estimados.

La distribución temporal de la tormenta empleada fue definida en base a la distribución de precipitaciones extremas observadas en la sierra del Perú.

El modelo incluyó la representación de las cuencas drenantes al río Suro con el fin de evaluar las descargas en cada una de ellas además de la descarga combinada de las laderas de la subcuenca del río Suro y de la zona del tajo hasta la confluencia con la quebrada Paloquián. El esquema del modelo hidrológico está graficado en la Figura C.2 del Anexo C. La Tabla 3.5 lista los parámetros considerados.

TABLA 3.5
MODELO PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA - PARÁMETROS

Modelo precipitación escorrentía	Hidrograma unitario
Modelo de sustracción hidrológica	NRSC (SCS)
Condición de humedad antecedente	II
Parámetro de sustracción hidrológica	CN = 78 (parte alta de cuenca) CN = 82 (parte intermedia y baja)
Tiempo de concentración Tc	Water-Resources Investigations Report 00-4184 (USGS,2000)
Coeficiente de almacenamiento R	Water-Resources Investigations Report 00-4184 (USGS,2000)
Tipo de hidrograma unitario	Clark
Distribución temporal de la tormenta de diseño	Definida en base a registros horarios de estaciones de la sierra central del país.

El flujo pico del río Suro en su confluencia con la quebrada Paloquián fue calculado en 111 m³/s. La Figura C.3 del Anexo C muestra el hidrograma de salida de la modelación hidrológica en el HEC-HMS.

d) Descargas de canales y conductos de derivación del pad

Para determinar el caudal de diseño de los canales y conductos de drenaje pluvial al interior de las plataformas se utilizaron las siguientes consideraciones:

- En los canales con tiempo de operación mayor a un año, así como para los canales temporales cuyo desarrollo se ubica sobre estructuras e instalaciones principales (pad, pozas, planta, etc.), se ha utilizado la precipitación máxima en 24 horas de un periodo de retorno de 100 años; y
- Los canales permanentes han sido diseñados para la precipitación máxima en 24 horas de un periodo de retorno de 500 años, acorde con los criterios para el cierre de mina.

La Tabla 3.6 presenta un resumen de las instalaciones, las situaciones de diseño y el evento de diseño por cada componente.

**TABLA 3.6
 FLUJOS PICO DE DISEÑO**

INSTALACIÓN	SITUACIÓN DE DISEÑO	EVENTO DE DISEÑO	
		PRECIPITACIÓN MÁXIMA	PERIODO DE RETORNO
Cunetas y canales de coronación temporales	Diseño para operación	24h	20 años
Derivación del pad de lixiviación, canales de coronación sobre estructuras	Revestimiento de geomembrana sin mineral encima.	24h	100 años
Canales de evacuación definitivos	Diseño para el cierre	24h	500 años

d.1) Flujos pico del pad

El escenario desfavorable de diseño considera que la lluvia máxima cae cuando parte del revestimiento esté recién colocado. De esta manera, el cálculo de los flujos dentro del pad se efectuó tomando un criterio conservador que prevé que se produzca la tormenta de diseño en el momento que el pad tenga expuesto 1/3 de su extensión sin mineral, pero con el revestimiento de geomembrana durante la etapa de construcción. Las escorrentías fueron calculadas mediante el método racional empleando un tiempo de concentración de 10 minutos. Para estas condiciones el flujo máximo calculado para el tramo del canal correspondiente a

fase 5 es de 1.00 m³/s mientras que para el tramo existente que sigue aguas abajo e involucra las fases anteriores es de 2.01 m³/s.

3.1.8 Cálculos hidráulicos

a) Diseño del drenaje del pad

La sección de los canales fueron determinados utilizando ecuaciones de flujo uniforme con el flujo pico que ocurra en el extremo aguas abajo de cada tramo. El borde libre en tramos de pendiente muy empinada fue definido de acuerdo con los criterios recomendados por el USBR (Small Channel Structures, Small Dams Design), y el USACE (USACE: EM 1110-2-1601), mas la elevación extra originada por las curvas. En los demás tramos el borde libre fue especificado en 0.30 m o el 20% de la energía específica del flujo más la elevación extra en curvas, el que fuese mayor.

El tamaño de las alcantarillas fue dimensionado para permitir el paso del flujo de diseño manteniendo una carga hidráulica menor o igual a 1.5 veces el diámetro en el extremo aguas arriba del elemento. Los tamaños de las alcantarillas se verificaron tanto en las dimensiones necesarias para que el flujo uniforme quepa en el interior en los tramos de menor pendiente, como las necesarias para que el ingreso no produzca remansos inconvenientes aguas arriba de la entrada.

Los revestimientos de los canales y alcantarillas, así como los tramos y empozamientos protegidos por empedrados y mampostería, han sido diseñados en función de la resistencia al efecto de las velocidades y fuerzas tractivas.

En la Tabla 3.7 se muestra el resumen de las dimensiones del canal de solución así como el tipo de revestimiento. En la Tabla C.10 presentada en el Anexo C, se muestra el cuadro general del cálculo hidráulico de cada uno de los canales, mostrándose además parámetros hidráulicos relacionados.

**TABLA 3.7
 DISEÑO DE LOS CANALES DE DESVIO - PAD DE LIXIVIACIÓN**

DE	A	TIPO DE SECCIÓN	BASE (m)	TALUD IZQ. (H:1V)	TALUD DER. (H:1V)	ALTURA (m)	TIPO DE REVESTIMIENTO	ESPESOR (mm)
TRAZO 1		CANAL SOLUCIÓN						
0+000	0+220	Trapezoidal	2.0	2	2	1.5	Geomembrana	1.5
0+220	0+480	Trapezoidal	2.0	1	1	1.5	Geomembrana	1.5

3.2 BALANCE DE AGUAS

Durante el desarrollo del balance de aguas del pad de lixiviación se determinó:

- Volúmenes de las pozas para condiciones húmedas extremas;
- Las cantidades de agua fresca o añadida, demandada para la continuidad de las operaciones; y
- Capacidad de la planta de tratamiento de agua, de suceder descargas de excedentes.

En el balance de aguas se ha tenido en cuenta los volúmenes de almacenamiento requerido para condiciones extremas, para ello se ha verificado la capacidad de la poza de mayores eventos.

Para alcanzar los propósitos indicados se desarrolló un balance global de la pila utilizando una hoja de cálculo que, como todos los modelos de balance de aguas en general, está basada en la siguiente ecuación:

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

El flujo entrante de agua y solución es producto de la precipitación que tiene lugar dentro del área revestida en la plataforma de lixiviación, y el flujo de agua fresca de reposición. El flujo saliente lo componen las evaporaciones (desde las áreas inactivas y bajo lixiviación, y desde las bermas y pozas, y las evaporaciones de las pérdidas en los goteros), y los flujos de purga de existir éstos.

Los cambios de almacenamiento son provocados por el contenido de humedad que queda almacenada en los vacíos del mineral, y las fluctuaciones en las pozas. Los flujos de circulación de las pozas de PLS y de mayores eventos se consideran flujos internos.

Debe notarse que las variables dependientes del cálculo presente, son el flujo de demanda de agua fresca y el flujo de purga. Tales flujos son establecidos para equilibrar las pérdidas en el sistema y mantener los niveles en las pozas dentro de los límites operativos y de contingencia al final de cada periodo mensual.

3.2.1 Criterios de la simulación

La simulación implementada cubre un periodo de 2 años de operación del pad, de los cuales el primer año corresponde al periodo de operaciones. Asimismo, se estableció como inicio de operación el mes de Marzo del año 2008. Se considera

para el cálculo, que ya se tendrán desplegadas al menos 14.83 ha de la geomembrana en el pad de lixiviación cuando acontezca la primera temporada de lluvias. Asimismo, se ha considerado que para el inicio de simulación el 50% de las capacidades de las pozas estarán ocupadas por volúmenes de las operaciones anteriores.

En el presente caso se ha establecido como criterio de diseño minimizar los flujos de purga. En la secuencia de cálculo se ha postulado primero el tamaño de la poza de grandes eventos; que luego de la verificación respectiva se concluyó la conveniencia de instalar una planta de tratamiento que maneje los flujos de purga.

Los datos climáticos básicos, precipitaciones y evaporaciones del sitio fueron determinados en las secciones previas. Fueron utilizadas cantidades de evaporaciones promedio mensuales y series de precipitaciones asignadas al sitio (1961-2005).

La capacidad de las pozas ha sido determinada para proporcionar lo siguiente en cualquier momento de la vida útil del proyecto:

- Volumen mínimo de operación, definida por la profundidad mínima necesaria para la operación de las bombas;
- Volumen de contingencia ante averías en el sistema, para almacenar la percolación libre proveniente de la pila durante el tiempo que toma la vuelta a operación del sistema de reciclado y aplicación de la solución; y
- Volumen de contingencia para la tormenta de diseño, o para la secuencia mensual de lluvias máximas de la temporada de lluvias, el mayor volumen.

La operación consistirá en lixiviar mineral procedente de los tajos en operación dentro de los límites del pad, desde donde la solución cargada será dirigida a la poza de PLS y eventualmente a la poza de mayores eventos. Los flujos provenientes de las precipitaciones dentro del pad, serán conducidos hacia la poza de mayores eventos. Por otra parte se ha adoptado 24 horas como la duración de la contingencia por averías y mal funcionamiento del sistema eléctrico en la mina; esta consideración es aceptable, debido a la proximidad con una de las ciudades de mayor importancia en el norte del país, donde recursos

técnicos y materiales podrían obtenerse con facilidad para restituir las operaciones.

El volumen de contingencia por parada de bombas, varía de 30,250 m³ a 40,350 m³ según avanza la lixiviación de las capas superiores. Los volúmenes indicados incluyen considerar las pérdidas del sistema.

La humedad que ingresa al pad corresponde a la humedad natural promedio del material que varía entre 3% y 5%, de temporada seca a temporada húmeda. La retención de humedad neta en la pila de lixiviación resulta entre 3% y 5%, lo cual constituye un valor conservador.

El volumen de contingencia por lluvias extremas ha sido establecido de acuerdo con los criterios inferidos de la Guía Ambiental para Proyectos de Lixiviación en Pilas (MEM, 1998), y expuestos en la referencia base de la misma (Van Zyl y Hutchinson, 1988). En las referencias mencionadas 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 un año promedio, y el segundo, utilizado en las evaluaciones de balance de agua el registros históricos de precipitaciones mensuales totales. Este último criterio ha sido implementado gracias a la amplitud de registros hidrológicos que se tienen a disposición. La extensión de los registros ha permitido llevar a cabo 60 series de simulaciones de balance de aguas de 24 meses de duración cada una.

En el presente caso no fue considerado el empleo de cubiertas plásticas impermeables (raincoats), que típicamente se colocan en las zonas ya lixiviadas o bajo lixiviación con la finalidad de reducir el ingreso de agua al sistema que afecta este balance de aguas y que además causa la dilución de la solución de lixiviación. En el caso de que la mina decida su utilización, se deberá diseñar durante la operación un sistema de derivación del agua de lluvias sobre las coberturas; asimismo, el balance de aguas deberá ser revisado.

El uso de los registros históricos ha permitido observar el desempeño del sistema en situaciones extremas: con el año más húmedo, y con el máximo mensual que se considera incluye el máximo en 24 horas.

3.2.2 *Resultados del balance de aguas*

Los resultados del balance de aguas se presentan en gráficos de series de tiempo de percentiles, de flujos o de volúmenes máximos por cada mes, sobre

las necesidades de agua fresca y sobre los volúmenes máximos conjuntos de operación y de contingencia. Los resultados que se señalan a continuación corresponden más a la condición de desarrollo final de 14.83 ha.

En la Figura 3.11 del Anexo I se muestra que las simulaciones indican que los balances de aguas mensuales son positivos excepto durante 3 a 4 meses en las temporadas secas del año, donde el balance es neutro o positivo.

Durante el estiaje el funcionamiento del sistema es del tipo llamado sin memoria, entendido como que los flujos de entrada y salida del sistema son independientes del resultado del periodo mensual anterior, puesto que puede mantenerse a voluntad niveles mínimos en las pozas, manejando los volúmenes de agua fresca que se añadan.

En las temporadas de lluvias, la situación de ingreso de volúmenes a la poza de grandes eventos en las pozas se presenta en más del 75% de los casos además del almacenamiento en la poza de grandes eventos, se requiere realizar tratamientos y descarga de flujos.

En la Figura 3.12 del Anexo I se muestra una serie de tiempo de percentiles del almacenamiento total, los resultados indican que los volúmenes máximos están relacionados con las secuencias prolongadas de precipitaciones máximas durante la temporada de lluvias, identificadas con el año de mayor precipitación anual en este caso.

De la misma manera en la Figura 3.13 del Anexo I se muestran las series de tiempo de percentiles para las necesidades de agua fresca, el modelo predice que éstas serán necesarias en el arranque, así como sólo en la primera temporada de estiaje. Las demandas puede que lleguen a un máximo de $80.2 \text{ m}^3/\text{h}$ al inicio de operaciones con un promedio de $39.5 \text{ m}^3/\text{h}$ en los 6 primeros meses. En el siguiente año se prevé un ligero incremento durante la temporada de estiaje.

En la Figura 3.14 del Anexo I se muestran las series de tiempo de percentiles de las descargas de purga.

La Figura 3.15 del Anexo I muestra las pérdidas de solución totales predichas por el modelo que alcanzan en promedio el 5.5% durante el periodo de operación del pad; sin embargo, durante el periodo de lavado (segundo año) esta se incrementa hasta un promedio de 11.5% aproximadamente.

En términos de cantidades para el diseño, la Tabla 3.8 “Resultado del Balance de Aguas” indica las capacidades pronosticadas por las simulaciones más desfavorables.

**TABLA 3.8
 RESULTADOS DEL BALANCE DE AGUAS**

VARIABLE	UNIDAD	MÍNIMO	PROMEDIO	MÁXIMO
Demandas de agua fresca en las pilas durante estiaje	m ³ /h	25.8	39.5	80.2
Meses por año con necesidades de agua fresca	meses/año	1.0	3.1	5.0
Descargas de purgas de agua o capacidad de planta de tratamiento requerida	m ³ /h	42.1	82.7	304.5
Meses por año con necesidad de purgas de agua	meses/año	4.0	5.9	8.0
Volumen máximo total	m ³	72,500	72,500	72,500
Volumen de la pozas de mayores eventos	m ³	50,000	50,000	50,000

CAPÍTULO IV INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE CAMPO

Para la ejecución de la ingeniería de detalle de la fase 5 del pad de lixiviación, se programó la investigación geotécnica complementaria del área de estudio que consistió en la realización de un terraplén de prueba, la excavación de algunas calicatas y en la evaluación de la información disponible de los estudios de ingeniería de detalle de la fase 4 del pad de lixiviación, efectuados anteriormente. Se describen a continuación las investigaciones desarrolladas y la información disponible utilizada.

4.1 CALICATAS

Se ejecutó un total de 06 calicatas convenientemente ubicadas en las áreas que se consideraba que no se tenía suficiente información, con la finalidad de evaluar las condiciones geotécnicas de los materiales de cimentación para la futura construcción de la fase 5 del pad de lixiviación. En cada una de las calicatas se llevó a cabo una detallada descripción de los tipos de suelos encontrados. Asimismo, se tomaron muestras disturbadas y no disturbadas representativas, que fueron identificadas y almacenadas con la finalidad de efectuar ensayos de caracterización física y mecánica.

El número limitado de calicatas se debió a que la mayor parte del emplazamiento de la fase 5 del pad se realizará sobre el material de desmonte del botadero, el mismo que se construirá sobre parte del lecho del río Suro. Las características y condiciones geotécnicas de los materiales aluviales del río son conocidas.

En el Anexo A.1 se presentan las calicatas realizadas durante la investigación geotécnica. Como se puede observar la profundidad máxima alcanzada fue de 6.0 m. En cada una de las calicatas se realizó un detallado registro y muestreo de los diferentes tipos de materiales existentes.

Las muestras fueron enviadas a Lima para la realización de ensayos índices y especiales en un laboratorio de Mecánica de Suelos.

4.2 PERFORACIONES

Durante la investigación geotécnica desarrollada en la fase 5 del pad de lixiviación, no se realizaron perforaciones adicionales; sin embargo, la información colectada de las perforaciones efectuadas durante el desarrollo de los estudios de ingeniería de detalle de la fase 4 del pad de lixiviación y el

botadero de desmonte sobre el que se construirá la fase 5 del pad de lixiviación, fue empleada como base para el desarrollo de los trabajos de ingeniería. En el Anexo A.2 se muestran las características de los sondeos realizados en la fase 4 del pad de lixiviación y en el botadero de desmonte.

4.3 ENSAYOS DE CAMPO

Con el propósito de evaluar las características geotécnicas de los materiales de cimentación de la fase 5 del pad de lixiviación, se realizó un terraplén de prueba compuesto de desmonte de mina, con el fin de determinar una relación entre la densidad del desmonte con respecto al grado de compactación. Los ensayos realizados y los resultados obtenidos se detallan a continuación:

4.3.1 *Terraplén de prueba*

Uno de los problemas geotécnicos principales en el desarrollo de la ingeniería de la fase 5 del pad de lixiviación es la evaluación de los asentamientos que se generarán en el botadero de desmonte por efecto de la carga litostática inducida por el peso del mineral a almacenar en el pad de lixiviación.

Para evaluar los asentamientos se empleó el método de Janbu o método del módulo tangente, según el cual los asentamientos dependen en gran medida de los esfuerzos de confinamiento y de la porosidad de los materiales. De esta manera se realizaron mediciones de densidad in situ de acuerdo con el grado de compactación aplicado al desmonte del terraplén. Dada la característica predominantemente gruesa del material del desmonte (GW-GM), las densidades in situ o densidades de campo fueron obtenidas a través de un equipo de cono de canicas de 12". Este equipo sigue el mismo procedimiento para el ensayo del cono de arena (ASTM-D 1556), y para tal efecto emplea canicas de cristal de 0.25" de diámetro en reemplazo de arena.

Los resultados obtenidos para cada ensayo de densidad in situ se muestran en el Anexo B en términos de densidad seca según el número de pasadas del equipo de compactación (rodillo liso de 6 toneladas), en régimen de vibración de alta frecuencia para una capa de material de desmonte de 0.50 m de espesor. De acuerdo con estos ensayos se ha estimado una densidad mínima del desmonte de 21.50 kN/m³.

4.4 ENSAYOS DE LABORATORIO

Las muestras representativas de suelo extraídas de las calicatas y del terraplén de prueba, fueron sometidas a un programa de ensayos de laboratorio con el objeto de determinar las propiedades índices y densidades bajo carga estática, y que fueron ejecutados en un laboratorio geotécnico de la ciudad de Lima. Asimismo, se realizaron 12 ensayos de contenido de humedad, 12 ensayos granulométricos y de límites de Atterberg, 01 ensayo de densidad natural. Los resultados obtenidos para cada ensayo de densidad in situ se muestran en el Anexo B.1 y en el Anexo B.2.

4.4.1 *Ensayos densidad vs porosidad*

Con la finalidad de confeccionar un modelo geotécnico que permita cuantificar la porosidad para distintos grados de esfuerzos que se producen en un rango lineal de densidades con respecto a la profundidad, se llevaron a cabo ensayos de densidad vs porosidad en el laboratorio. La Tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos para estos ensayos.

**TABLA 4.1
 DENSIDAD VS POROSIDAD**

DENSIDAD DE LA MUESTRA (kN/m ³)	DENSIDAD SECA (kN/m ³)	RELACIÓN DE VACÍOS	POROSIDAD (%)
18.54	18.04	0.51	33.62
19.69	19.15	0.42	29.50
20.27	19.72	0.38	27.43
21.01	20.44	0.33	24.78
21.40	20.82	0.31	23.38
21.67	21.08	0.29	22.42
21.80	21.21	0.28	21.95
22.81	22.19	0.22	18.33
23.11	22.48	0.21	17.26
23.27	22.64	0.20	16.69

4.4.2 *Ensayos densidad vs altura*

Para conocer la variación de la densidad con respecto a la altura de la estructura, se efectuó una simulación en laboratorio, empleando un terraplén compuesto por desmonte de mina compactado inicialmente a una densidad a una densidad 21.50 kN/m³, el cual fue sometido a cargas variables que simulan un incremento en la altura del terraplén.

La densidad inicial de compactación adoptada en esta simulación corresponde con la densidad mínima obtenida en los ensayos de campo desarrollados en un terraplén de prueba.

Los ensayos de densidad vs carga (altura de terraplén), son presentados en el Anexo B, la Tabla 4.2 resume los resultados de los ensayos.

**TABLA 4.2
DENSIDADES VS ALTURA DEL BOTADERO**

CARGA APLICADA (kPa)	DENSIDAD SECA (kN/m ³)	ALTURA DEL BOTADERO (m)	DENSIDAD SECA (kN/m ³)
0.0	21.88	0.00	21.43
150	22.00	6.96	21.55
300	22.04	13.90	21.59
450	22.08	20.81	21.63
600	22.12	27.69	21.67
750	22.16	34.56	21.70
900	22.20	41.39	21.74
1050	22.28	48.12	21.82
1200	22.32	54.89	21.86
1350	22.36	61.64	21.90
1500	22.44	68.25	21.98

4.5 MAPEO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO

Durante la investigación geotécnica se realizó el mapeo geológico-geotécnico del área que involucra la fase 5 del pad de lixiviación y de las áreas circundantes, con el fin de identificar los rasgos geológicos y unidades geotécnicas presentes.

4.6 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LA CIMENTACIÓN

Las unidades geotécnicas definidas en el área del pad de lixiviación, son:

- Depósitos morrénicos (Unidad Geotécnica I);
- Depósitos aluviales (Unidad Geotécnica II);
- Suelo residual (Unidad Geotécnica III); y
- Basamento rocoso (Unidad Geotécnica IV).

Estas unidades son descritas a continuación.

4.6.1 *Depósitos morrénicos (unidad geotécnica I)*

Esta unidad consiste en depósitos de naturaleza morrénica de granulometría predominantemente gruesa compuesto por grava limosa con arenas, y arcilla gravosa con arenas a arcilla arenosa con gravas, clasificadas como GM y CH en el sistema SUCS. La humedad varía de muy húmeda a saturada, con plasticidades que van de baja a media y alta. El color es predominante naranja a naranja violáceo, con presencia de gravas subangulosas, de tamaño variado y duras. Superficialmente esta unidad se encuentra cubierta por un suelo orgánico cuyo espesor varía desde 0.40 a 0.90 m. La resistencia a la compresión no confinada medida con penetrómetro de bolsillo varía de 1.0 - 3.0 kg/cm².

4.6.2 *Depósitos aluviales (unidad geotécnica II)*

Conformado por suelos cuya formación es producida por acción del acarreo de materiales realizado por el río Suro. Son de matriz predominantemente gruesa compuesta por gravas bien gradadas con arcilla a gravas bien gradadas, de plasticidad nula a baja, con compacidad suelta a medianamente densa y en condición húmeda a saturada. Este depósito dada sus características gruesas son adecuados para propósitos de cimentación, por lo que durante la construcción no necesariamente deberán ser removidos en su totalidad.

4.6.3 *Suelos residuales (unidad geotécnica III)*

Como su nombre lo indica esta unidad está compuesta íntegramente de suelos residuales y se localiza debajo de la unidad geotécnica I, consisten principalmente de arenas pobremente gradadas a arcillas y gravas arcillosas, cuya clasificación corresponde a SP, CL y GC en el SUCS, siendo de plasticidad nula a media, estos depósitos son producidos por la meteorización in situ de las areniscas, lutitas y lutitas carbonosas que intercalan en el basamento sedimentario.

Esta unidad geotécnica es adecuada para el nivel de desplante de la cimentación del botadero de desmonte y por consecuencia para la fase 5 del pad de lixiviación, dependiendo del grado de consistencia ó compacidad en el que se encuentre siendo necesaria primeramente la limpieza del terreno.

4.6.4 *Basamento rocoso (unidad geotécnica IV)*

Durante la investigación se determinó la presencia del basamento rocoso a través del mapeo de los afloramientos rocosos como también los encontrados

durante la campaña de perforaciones. De esta manera se determinó que esta unidad geotécnica subyace a profundidad en la totalidad de sectores en donde se emplazará el botadero de desmonte.

El basamento rocoso está compuesto por dos tipos de rocas de naturaleza sedimentaria: areniscas y limonitas. De acuerdo con las perforaciones realizadas durante la investigación geotécnica y con los registros de perforaciones de exploración efectuadas por la minera, el basamento es continuo y se ubica a gran profundidad por lo que se considera esta unidad geotécnica como adecuada para propósitos de cimentación.

4.7 NIVEL DE AGUA

De acuerdo a la naturaleza de los desmontes a disponer en el botadero, no se prevé que se formen niveles freáticos altos en el cuerpo de los desmontes, debido a la granulometría gruesa de estos materiales.

4.8 NIVEL DE CIMENTACIÓN

El nivel de cimentación para la fase 5 del pad de lixiviación estará definido por la disposición final de la cresta del botadero de desmonte de mina, sobre la cual se colocará un revestimiento de suelo de baja permeabilidad.

CAPÍTULO V : CONSIDERACIONES DEL DISEÑO GEOTÉCNICO

5.1 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TALUDES

Se presenta a continuación una descripción de las consideraciones del diseño geotécnico tomadas en cuenta para la ejecución de los análisis de estabilidad de la estructuras componentes del proyecto.

5.1.1 Metodología de análisis

Para el análisis de la estabilidad de taludes en general, se utilizó el programa de cómputo SLIDE (Rocscience, 2003) versión 5, que opera en una computadora personal. Este es un programa de análisis de estabilidad de taludes completamente integrado, que permite desarrollar la geometría del talud interactivamente y la definición de los tipos y propiedades de los materiales de manera muy amigable para el usuario.

El análisis para calcular el factor de seguridad se lleva a cabo en forma bidimensional usando el concepto de equilibrio límite, aproximando el problema a un estado de deformación plana. El programa tiene la opción de utilizar diferentes métodos de análisis de estabilidad de manera simultánea, sin embargo, para el presente análisis se ha utilizado el Método de Spencer que emplea dovelas para el cálculo de superficies de falla. La superficie de falla crítica, definida como aquella que proporciona el menor factor de seguridad, fue encontrada en forma interactiva modificando las condiciones de búsqueda de la misma. Se evaluaron superficies de falla tanto circulares, como en bloque.

Como hipótesis del análisis se consideran que las propiedades de los materiales que conforman las diferentes estructuras analizadas, son homogéneas e isotrópicas y que el colapso se produciría como resultado de fallas simultáneas a lo largo de la superficie de deslizamiento. Cada material tiene sus propiedades y características físicas y mecánicas.

Para el análisis pseudo-estático se considera que la masa involucrada en la falla está sometida a una aceleración horizontal igual a un coeficiente sísmico multiplicado por la aceleración de la gravedad, de modo de tomar en cuenta el efecto de las fuerzas inerciales producidas por el terremoto de diseño. El coeficiente sísmico horizontal utilizado fue de 0.16, de acuerdo a lo indicado en la sección 2.5.2.

5.1.2 Criterios de diseño

Los criterios de diseño establecidos para el presente análisis fueron los siguientes:

- Mínimo factor de seguridad estático a largo plazo igual a 1.4; y
- Mínimo factor de seguridad estático a corto plazo igual a 1.3; y
- Mínimo factor de seguridad pseudo-estático a largo plazo igual a 1.0 ó,
- Desplazamientos inducidos por sismo que no comprometan la seguridad del apilamiento ó la integridad del sistema de revestimiento.

Se debe indicar que un factor de seguridad pseudo-estático mayor que 1.0 no significa que el apilamiento de mineral no se moverá durante un terremoto. Lo que probablemente ocurrirá es que los desplazamientos serán mínimos y no se producirán daños permanentes en el sistema de revestimiento, asociados al terremoto de diseño.

5.1.3 Condiciones analizadas

Se ha tomado en cuenta las siguientes condiciones para el análisis:

- El análisis ha considerado la condición más crítica representada por la sección de mayor altura del pad de lixiviación y la de mayor pendiente en su base. En las Figuras 5.1 a la 5.6 se presenta la planta y secciones analizadas para la fase 5 del pad de lixiviación;
- Para el análisis del pad de lixiviación y siguiendo un criterio conservador para instalaciones revestidas que colectarán la solución lixiviada y no la almacenarán, se ha considerado que el nivel de la solución estará como máximo a 1.0 m por encima de la superficie nivelada. El nivel de solución actuará como un nivel piezométrico que afecta principalmente las propiedades del mineral y eventualmente la interfase suelo-geomembrana, criterio que conlleva a una condición de análisis conservador si se tiene en cuenta que la interfase es impermeable;
- Para el análisis, se ha asumido que el nivel freático estará como máximo a 3.0 m debajo de la superficie de nivelación proyectada del pad. Este nivel freático afectará principalmente a la cimentación

pero no al botadero de desmontes debido a la alta permeabilidad producto de sus características granulométricas gruesas;

- El análisis de estabilidad ha considerado la existencia de superficies de falla tipo circular para evaluar la estabilidad a través del mineral del apilamiento y fallas globales a través de la cimentación (desmonte de mina). Asimismo, debido a la presencia del revestimiento de geomembrana, se ha analizado superficies de falla no circulares o tipo bloque, con la finalidad de evaluar la estabilidad del apilamiento a través del sistema de revestimiento.

5.1.4 *Propiedades de los materiales*

Las propiedades de los materiales fueron obtenidas a partir de ensayos de laboratorio realizados en muestras representativas de cada uno de los materiales involucrados en los análisis. La descripción de los ensayos de campo y laboratorio, así como los resultados de los mismos se presentan en el Anexo B, respectivamente.

Cabe indicar que los materiales que controlan las condiciones de estabilidad en pilas de lixiviación corresponden al mineral que será apilado y a la interfase suelo/geomembrana más débil que generalmente corresponde al contacto entre la geomembrana y el suelo de baja permeabilidad. Por lo tanto, para la determinación de los parámetros geotécnicos de estos materiales se utilizó la información obtenida de los ensayos realizados para la ingeniería de detalle de la fase 4 del pad de lixiviación, en el cual se efectuaron ensayos de resistencia cortante a gran escala y ensayos de compresión triaxial, los cuales están incluidos en el Anexo B.

5.1.5 *Mineral*

Las propiedades de resistencia del mineral que será apilado fueron estimadas a partir del estudio de la fase 3 del pad de lixiviación. El mineral se caracteriza por tener una matriz gruesa con presencia de arenas, con clastos angulosos a subangulosos, de tamaño variable y duros. De acuerdo con esto, se define un ángulo de fricción conservador de 35° y cohesión nula.

a) *Interfase suelo de baja permeabilidad-geomembrana*

Las propiedades de resistencia cortante de la interfase entre geomembrana texturada/suelo de baja permeabilidad, fueron evaluadas a través de ensayos de

corte directo a gran escala, efectuados durante la realización de los estudios de la fase 3 y fase 4 del pad de lixiviación (ver Anexo B).

Para la ejecución de este ensayo en la interfase geomembrana/suelo de baja permeabilidad se utilizó una geomembrana HDPE texturada por un solo lado. El lado texturado fue ensayado en contacto con el suelo de baja permeabilidad, mientras que el lado liso fue colocado en contacto con el sobre-revestimiento. Los resultados indican que asumiendo un comportamiento lineal, el ángulo de fricción de la interfase conformada por el suelo de baja permeabilidad y el lado texturado de la geomembrana varía de 27° a 18° para las condiciones pico y post-pico, respectivamente, mientras que el ángulo de fricción entre el sobre-revestimiento y la geomembrana texturada, varía entre 31° y 24° para las mismas condiciones (ver resultados de ensayos del Anexo B).

Para el análisis de estabilidad se consideró utilizar una envolvente no lineal para la interfase geomembrana/suelo de baja permeabilidad y geomembrana/capa friccionante (sobre-revestimiento), permitiendo modelar las variaciones de esfuerzos que componen un análisis de estabilidad en pilas de lixiviación. Con la resistencia media obtenida de los rangos máximo y mínimo, se confeccionó la envolvente de esfuerzos, a 2" de desplazamiento, cuyos resultados se presentan en las Tablas 5.2 y 5.3. Este modelo de material fue utilizado en el análisis de estabilidad de las secciones geotécnicas 1, 2, 3 y 4, respectivamente (ver Figuras 5.1 a la 5.5 del Anexo I).

b) Desmante existente

El desmante que se colocará en el botadero presenta granulometría gruesa, cuya clasificación SUCS se ajusta principalmente a suelos GW-GM, GP, GW y GM, compuestos por clastos areniscos, cuarzosos y silíceos de poca matriz. De acuerdo con esta descripción se estimó un ángulo de fricción correspondiente a 35° y cohesión nula, en base a la experiencia con materiales en diversos proyectos.

c) Relleno estructural

Los parámetros de resistencia al corte del desmante de mina y rellenos estructurales, fueron obtenidos a partir de los estudios efectuados de la fase 3 del pad de lixiviación (ver resultados de ensayos en el Anexo B). De esta

manera, se empleó un ángulo de fricción conservador de 36° y cohesión nula para este material.

d) Depósitos morrénicos

En el mapeo geotécnico realizado en el área de estudio se determinó la existencia de depósitos de naturaleza morrénica de matriz variable (gruesa a fina), los cuales se encuentran estratificados de manera errática evidenciando diversos eventos de erosión producidos en el pasado. De esta manera se pudo delimitar en base a la información de las calicatas y perforaciones dos tipos de depósitos: uno de matriz predominantemente gruesa (grava arcillosa a grava pobremente gradada con arcilla) y el otro de matriz predominantemente fina (arcillas con arenas y/o limos a arenas arcillosas).

En base a la información disponible (fase 4 del pad de lixiviación, ensayos de LPT, que se muestran en el Anexo A.2.1), se determinó dos tipos de suelo de cimentación, considerando un suelo de cimentación 1 con un ángulo de fricción de 28° y un suelo de cimentación 2 con un ángulo de fricción de 30° . La cohesión que tiene este tipo de materiales es variable y depende de la humedad, el grado de consistencia o la densidad. Sin embargo, para fines de cálculo y con el objeto de tener un mayor grado de confiabilidad en los diseños se ha optado por considerar cohesión nula en este tipo de materiales.

e) Depósito aluvial y basamento rocoso

En el mapeo geotécnico realizado en el área de estudio se determinó la existencia de depósitos aluviales y rocas de naturaleza sedimentaria subyacentes. De esta manera se pudo delimitar en base a la información de las calicatas dos tipos de depósitos para la cimentación: uno de matriz predominantemente de gravas bien gradadas con arcillas a gravas bien gradadas y el otro de naturaleza propia del basamento rocoso (areniscas cuarzosas y lutitas).

De acuerdo a los ensayos de laboratorio y las perforaciones realizadas (ver Anexos A y B), se determinó dos tipos de cimentación, considerándose un suelo de cimentación 1 (depósito aluvial) con un ángulo de fricción de 32° y cohesión 20 kPa, y un suelo de cimentación 2 (basamento rocoso) con un ángulo de fricción de 36° y cohesión 20 kPa.

En general, para la ejecución de los análisis de estabilidad, las propiedades de resistencia al corte de los materiales ensayados han sido reducidas apropiadamente para tomar en cuenta la variabilidad espacial de las mismas. Las propiedades de los materiales utilizados en los análisis de estabilidad según las secciones geotécnicas analizadas son resumidas en las Tablas 5.1 al 5.3.

**TABLA 5.1
RESUMEN DE PROPIEDADES DE MATERIALES - PAD DE LIXIVIACIÓN**

MATERIAL	γ_{TOTAL} (kN/m ³)	$\gamma_{SATURADO}$ (kN/m ³)	COHESIÓN (kPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)
Mineral	17.0	18.0	0	35
Interfase geomembrana /suelo baja permeabilidad ^{1 y 2}	16.0	17.0	*	*
Desmante existentes	21.5	22.0	0	35
Relleno estructural	20.0	22.0	0	36
Cimentación 1	18.0	20.0	0	28
Cimentación 2	18.0	20.0	0	30
Depósito aluvial	18.0	20.0	20	32
Basamento rocoso	20.0	20.0	20	36

¹ Ver Tabla 5.2

² Ver Tabla 5.3

**TABLA 5.2
ENVOLVENTE NO LINEAL DE INTERFASE GEOMEMBRANA / SUELO DE
BAJA PERMEABILIDAD - FASE 3**

ESFUERZO NORMAL (kPa)	ESFUERZO CORTANTE (kPa)
0	0
172.4	102.5
344.7	176.7
689.5	290.63

TABLA 5.3
ENVOLVENTE NO LINEAL DE INTERFASE GEOMEMBRANA / SUELO DE
BAJA PERMEABILIDAD - FASE 4

ESFUERZO NORMAL (kPa)	ESFUERZO CORTANTE (kPa)
0	0
99.97	62.61
199.94	114.76
399.89	180.04
799.79	329.86

5.1.6 *Resultados obtenidos*

En el Anexo D se presentan las salidas del programa SLIDE, que ilustran los análisis de estabilidad realizados para el pad de lixiviación. Los resultados obtenidos contienen información de la sección geotécnica analizada, propiedades de los materiales, nivel freático, nivel de solución y ubicación de la superficie de falla crítica con el menor factor de seguridad.

En la Tabla 5.4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los análisis de estabilidad realizados para solicitaciones estáticas y pseudo-estáticas, considerando superficies de falla circular y en bloque, según correspondan.

Como se puede observar de los resultados obtenidos en las secciones analizadas del pad, los factores de seguridad son mayores que los mínimos recomendados en los criterios de diseño del presente estudio, tanto para la condición estática como pseudo-estática y para los dos tipos de superficies de falla analizadas (circular y bloque).

A partir de estos resultados, se puede concluir que la configuración del talud propuesto para la fase 5 del pad de lixiviación es estable.

TABLA 5.4
RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE ESTABILIDAD - PAD DE LIXIVIACIÓN

SECCIÓN GEOTÉCNICA ANALIZADA	CASO	FACTOR DE SEGURIDAD ¹	
		ESTÁTICO	PSEUDO- ESTÁTICO K=0.16
Sección 1	Falla circular	1.61	1.04
	Falla tipo bloque	1.60	1.05
Sección 2	Falla circular	1.77	1.16
	Falla tipo bloque	1.48	1.00
Sección 3	Falla circular	2.06	1.33
	Falla tipo bloque	1.68	1.06
Sección 4	Falla circular	1.88	1.21
	Falla tipo bloque	1.56	1.01
Sección 5	Falla circular	1.62	1.06

Fuente: Elaboración propia

1. Los modelamientos y el mecanismo de falla se muestran en el Anexo D.

5.2 ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS

5.2.1 *Asentamiento de la cimentación*

Según las condiciones geotécnicas existentes en la cimentación del pad proyectado, los asentamientos que puedan producirse se deberán a las deformaciones en el material de desmonte, en los depósitos morrénicos o en los depósitos aluviales. Los asentamientos de la superficie de nivelación o "grading" son críticos por dos aspectos principales: primero, el asentamiento global del revestimiento del pad de lixiviación debe garantizar un adecuado drenaje del sistema de colección de solución; y segundo, los asentamientos diferenciales no comprometan el sistema de revestimiento compuesto por la geomembrana y el material de baja permeabilidad.

De acuerdo con las perforaciones realizadas en el área del pad de lixiviación, se ha determinado que la potencia de los depósitos morrénicos (subyacentes en el área de la base del botadero de desmonte), no es mayor a 41 m, por lo que el modelo geotécnico considera una potencia media de 40 m para los depósitos morrénicos de cimentación.

5.2.2 *Metodología del análisis*

Los análisis de asentamientos a desarrollarse sobre un perfil estratigráfico deben considerar distintos factores, tales como:

- La distribución de los esfuerzos aplicados. La magnitud de los asentamientos estimados es directamente dependiente de la distribución de los esfuerzos aplicados. En este caso, el perfil de esfuerzos depende de la configuración geométrica de la pila de lixiviación y sus respectivos pesos unitarios totales.
- La no linealidad en el comportamiento esfuerzo-deformación en un amplio rango de esfuerzos.
- La no homogeneidad dentro de un perfil de suelo. Para el análisis, se ha asumido la homogeneidad tanto de los desmontes a ser dispuestos en el botadero, como la de los depósitos morrénicos o aluviales subyacentes a éstos.
- En el análisis no se considera el cálculo de las deformaciones en la cara del talud del pad, restringiendo el rango de trabajo a la estimación de los asentamientos verticales empleando el método de módulo tangente. El análisis se desarrolla en dos etapas:
 - > 1ra Etapa: Se calcula la distribución de los esfuerzos verticales en terraplenes aplicados en un punto determinado de acuerdo con la solución elástica presentada por Jurgenson (1934). De esta manera, la distribución de los esfuerzos fueron calculados en varios puntos debajo del pad de lixiviación para distintas secciones transversales representativas (ver Figura 5.7).
 - > 2da Etapa: Se aplica el concepto del módulo tangente para estimar los asentamientos en la base del pad utilizando la distribución de esfuerzos previamente calculada en la 1ra etapa.
- La teoría elástica proporciona una buena estimación de la distribución de esfuerzos, pero no consigue simular la no linealidad del comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales naturales. La aplicación del concepto del módulo tangente desarrollado por Janbu (1963, 1965 y 1967), incorpora un típico endurecimiento en deformación en compresión confinada que proporciona una mejor evaluación de los asentamientos para una estratigrafía determinada.

5.2.3 Propiedades de los materiales

El método de módulo tangente calcula los asentamientos inducidos sobre un terraplén en base a esfuerzos confinados, tales como el exponente de esfuerzos (α), que es función del tipo de suelo; y el número de módulo (m), que varía con la porosidad en un amplio rango de esfuerzos.

De acuerdo con las propiedades físicas de los materiales (granulometría, plasticidad, porosidad), con las recomendaciones de Janbu, y con la literatura técnica existente se determinaron los siguientes parámetros:

**TABLA 5.5
 PROPIEDADES DE MATERIALES - ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS**

MATERIAL	γ_{TOTAL} (kN/m^3)	EXPONENTE DE ESFUERZOS (α)	NÚMERO DE MÓDULO (m)
Mineral	17.0	no aplica	no aplica
Desmontes	21.5	0.5	220
Depósitos morrénicos	18.0	0.5	50
Depósitos aluviales	18.0	0.8	500
Basamento rocoso	20.0	0.8	1500

5.2.4 Resultados del análisis

Se calcularon los asentamientos en 9 secciones transversales típicas del pad de lixiviación, estas secciones fueron evaluadas con el fin de proporcionar una cantidad significativa de puntos que permitan definir las curvas de asentamiento en la superficie del pad y a su vez definir el estado final de la superficie de nivelación final inducido por la magnitud de estos asentamientos. Los puntos específicos evaluados se muestran en las secciones A-A al G3-G3 de la Figura 5.7. Los resultados de los análisis se muestran en la Tabla 5.6.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 5.6, la pendiente del sistema de colección de solución no se verá afectada y el sistema de revestimiento geosintético no se verá comprometido por la configuración prevista para la superficie de nivelación (grading) del pad de lixiviación.

5.2.5 Asentamiento del apilamiento

Durante las operaciones de apilamiento de mineral es de esperar típicamente la ocurrencia de deformaciones verticales (asentamientos) de la pila de lixiviación.

En la medida que las capas de mineral son apiladas una a continuación de la otra, las capas inferiores sufren asentamientos debido a la sobrecarga impuesta por las capas superiores, y debido además a que el mineral, por razones propias de la operación, no es sometido a un proceso de compactación cuando es apilado.

Sin embargo, en base a la experiencia en proyectos similares de pilas de lixiviación, algunos de ellos de hasta 180 m de altura, se considera que la ocurrencia de asentamientos en la pila de mineral no constituye un factor crítico para la operación del pad de lixiviación.

TABLA 5.6
RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ASENTAMIENTOS – FASE 5 DEL PAD DE LIXIVIACIÓN

SECCIÓN	ASENTAMIENTOS													
	PUNTO 1 (m)	PUNTO 2 (m)	PUNTO 3 (m)	PUNTO 4 (m)	PUNTO 5 (m)	PUNTO 6 (m)	PUNTO 7 (m)	PUNTO 8 (m)'	PUNTO 9 (m)	PUNTO 10 (m)	PUNTO 11 (m)	PUNTO 12 (m)	PUNTO 13 (m)	PUNTO 14 (m)
A-A	0.04	0.11	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.28	0.12	0.13	0.14	0.14	0.07	-
B-B	0.04	0.22	0.25	0.24	0.25	0.26	0.27	0.08	0.17	0.22	0.22	0.20	0.08	-
C-C	0.11	0.45	0.52	0.54	0.57	0.55	0.08	0.15	0.16	0.16	0.19	0.19	0.07	-
D-D	0.18	0.92	1.04	1.12	1.13	1.33	0.13	0.18	0.19	0.18	0.14	0.14	0.07	-
E-E	0.24	0.89	1.41	1.63	1.69	1.76	1.89	2.44	0.18	0.18	0.16	0.13	0.10	0.07
F-F	0.30	0.88	1.41	1.64	1.71	1.77	1.87	3.52	4.10	3.57	0.16	0.14	0.10	0.05
G1-G1	0.27	0.91	1.43	1.57	1.65	1.71	1.92	4.12	4.02	3.54	0.17	0.14	0.10	0.05
G2-G2	0.27	0.91	1.40	1.57	1.65	1.71	1.83	3.54	4.01	3.54	2.93	0.14	0.10	0.06
G3-G3	0.19	0.74	1.31	1.55	1.64	1.69	1.77	2.14	4.00	3.51	2.93	2.27	0.10	0.05

Notas:

1. Las secciones de asentamiento consideradas en el análisis pueden verse en la Figura 5.7 del Anexo I.

CAPÍTULO VI DISEÑO CIVIL DE LAS INSTALACIONES

El diseño civil de la fase 5 del pad de lixiviación, consta del sistema de subdrenaje, la nivelación de la superficie del pad, el sistema de revestimiento, el sistema de detección de fugas y el sistema de colección de la solución lixiviada (tuberías de colección y sobre-revestimiento). En el diseño civil se ha incluido también el camino de acceso perimetral.

Los criterios utilizados para el diseño civil de la fase 5 del pad de lixiviación han sido preparados con datos proporcionados por el Propietario, los cuales son incluidos en este documento en el Capítulo 3 de este Informe.

A continuación se presentan los principales aspectos desarrollados durante el diseño de las diversas estructuras antes mencionadas:

6.1 FASE 5 DEL PAD DE LIXIVIACIÓN

La fase 5 del pad de lixiviación está delimitada por las fases 3 y 4 del pad de lixiviación y por el río Suro, se apoya sobre el botadero de desmonte denominado Cauce Seco y se emplaza sobre un área de 30 ha aproximadamente, de los cuales 14.5 ha conforman la plataforma del botadero de desmonte Cauce Seco. En el Plano 100-02 se muestra un arreglo general de las instalaciones, y en el Plano 200-01 se muestran los límites aproximados de limpieza y desbroce para la construcción.

El diseño de la fase 5 del pad de lixiviación está basado en la tecnología convencional de lixiviación en pilas y fue realizado según los criterios de diseño proporcionados por el Propietario y complementados con las recomendaciones de diseño y experiencia de diseño de otros pads de lixiviación del Diseñador.

El ciclo de lixiviación será de 60 días, con una tasa de carguío de 30,000 toneladas diarias y una altura de capa de 8 m. El área del emplazamiento de la fase 5 fue determinada en base a la disponibilidad del terreno colindante al pad existente, siendo de propiedad de la minera; razón por la cual, el diseño se ha realizado tratando de optimizar las dimensiones de las estructuras con la finalidad de respetar el cauce del río Suro y alcanzar la máxima capacidad posible de almacenamiento, de aproximadamente 11 millones de toneladas métricas de mineral ROM (run-of-mine), con una altura máxima de apilamiento de 80 m.

6.1.1 *Plan de nivelación*

Previo a los trabajos de nivelación del área, se deberá remover la capa de material orgánico (topsoil y turba) existente dentro de los límites del emplazamiento de la fase 5. Asimismo, todos los materiales que no sean adecuados para cimentación, deberán ser excavados y eliminados del área del emplazamiento del proyecto hasta encontrarse una cimentación adecuada y competente, capaz de soportar las cargas que impondrá la pila de lixiviación.

El plan de nivelación ha sido diseñado para tener una pendiente mínima de 1% y pendientes máximas de 2.5H:1V. Se ha definido 1% como pendiente mínima, para garantizar un drenaje efectivo de la solución a través de las tuberías de colección principales hacia los buzones de solución propuestos, a partir de donde la solución será conducida hacia la caja de distribución de solución ubicada en la parte más baja del pad. Al lado izquierdo de esta caja de distribución, se adicionará un módulo que será utilizado para coleccionar y distribuir la solución de las fases existentes. La solución resultante será conducida mediante dos tuberías sólidas hacia las pozas de procesos según sea el caso. El pad de lixiviación será nivelado aproximándose en lo posible a la rasante del botadero de desmonte y al terreno existente (después de la remoción de la capa de material orgánico y materiales inadecuados); proporcionando a su vez, rutas adecuadas para el drenaje, en las cuales se instalarán posteriormente las tuberías de colección de solución principales.

6.1.2 *Sistema de detección de fugas*

El sistema de detección de fugas de la fase 5 del pad de lixiviación se encuentra ubicado debajo del sistema de revestimiento y tiene por finalidad interceptar los flujos de solución que eventualmente pudiesen presentarse dentro de los límites de la fase 5 y derivarlos por debajo del sistema de revestimiento hacia la poza de monitoreo de subdrenajes.

Este sistema de detección de fugas consiste en una red de subdrenes instalados debajo del sistema de revestimiento, dichos subdrenes se instalaron en una zanja la cual ha sido previamente revestida con una capa de 300 mm material de baja permeabilidad y estarán constituidos por una tubería de HDPE, de pared doble, perforada, de 100 mm de diámetro, sobre la que se colocará grava de drenaje hasta que la altura del subdren conforme los 300 mm de espesor, la

tubería y la grava así dispuestas estarán envueltas por un geotextil no tejido de 270 g/m² .

En las zonas de taludes, los subdrenes se instalarán en una zanja la cual ha sido previamente revestida con una capa de 300 mm material de baja permeabilidad y una geomembrana de LLDPE SST de 1.5 mm de espesor, sobre la que se colocará una tubería de HDPE, de pared doble, perforada, de 100 mm de diámetro, sobre la que se colocará un material de relleno selecto hasta que la altura del subdren conforme los 600 mm de espesor.

La disposición de los subdrenes descritos se ubicará en todas las zonas donde se encuentre tuberías principales de colección de solución de la capa base. En el Plano 200-02 se muestran la planta y detalles típicos de instalación de este sistema.

6.1.3 *Movimiento de tierras*

Antes de iniciar los trabajos de nivelación del pad de lixiviación (corte y/o relleno para nivelación), se deberán realizar trabajos previos de preparación de la superficie de cimentación del pad. Estos trabajos incluyen la limpieza de material orgánico (topsoil) y eliminación de materiales inadecuados para la cimentación del pad. Asimismo, el material orgánico (topsoil) acumulado dentro del área del emplazamiento de la fase 5 durante la construcción de fases anteriores, deberá ser reubicado a zonas destinadas por la minera; y el área deberá ser inspeccionada y aprobada por el Ingeniero de Aseguramiento de la Calidad de Construcción (CQA) antes de iniciar los trabajos de movimiento de tierras, de acuerdo con los planos de diseño.

En base a la información recibida de la minera (topografía del terreno existente al momento de iniciar el diseño), se ha estimado que antes de iniciar los trabajos de nivelación del pad de lixiviación, se debería eliminar un volumen aproximado de 210,750 m³ de materiales inadecuados para la cimentación, los cuales deberán ser depositados en áreas específicas por tipo de material. Estas áreas deberán ser determinadas por la minera antes de iniciar la construcción; debido a que en el estudio de la ingeniería de detalle de la fase 5 del pad de lixiviación, no se ha incluido el diseño de las áreas de acumulación necesarias para tal efecto.

Una vez concluida la eliminación de materiales inadecuados, se procederá al relleno del botadero de desmonte. Los trabajos de movimiento de tierras posteriores, que sean necesarios para la nivelación del pad de lixiviación (después de realizada la limpieza de materiales inadecuados, relleno del botadero e instalación del sistema de detección de fugas), incluyen los cortes y rellenos necesarios para proporcionar un drenaje adecuado de la solución a través de las tuberías de colección hacia el canal de solución y pozas de procesos, asimismo, estos trabajos incluyen los cortes y rellenos necesarios para la conformación del camino de acceso perimetral, tal como se muestra en el Plano de Nivelación (Plano 200-03). El volumen de corte total para la nivelación del pad de lixiviación es de aproximadamente 272,550m³ (incluyendo el corte en el pad y acceso perimetral); y el volumen de relleno total es de aproximadamente 146,190 m³ (incluyendo el relleno en el pad y acceso perimetral).

6.1.4 *Sistema de revestimiento del pad de lixiviación*

El sistema de revestimiento consistirá en la colocación de una capa de suelo de baja permeabilidad (soil liner) de 300 mm (mínimo) de espesor en la capa base y 100 mm de espesor alternando sobre las demás capas de colección (capas 2, 4, 6, 8, 10 y 12), esta distribución permitirá a la mina recuperar rápidamente solución lixiviada de alta ley en los primeros días del ciclo de lixiviación, pudiendo continuar el ciclo posteriormente a través de las capas o recirculando la solución de baja ley.

Sobre la capa base se colocará una geomembrana de polietileno de baja densidad lineal (LLDPE), de 1.5 mm (60 mil) de espesor, texturada por un solo lado (SST). Posteriormente se colocará sobre la geomembrana instalada una capa de sobre-revestimiento (material granular), de 500 mm de espesor, a manera de protección de la geomembrana. En el Plano 200-14 se muestran las secciones y detalles típicos del sistema de revestimiento del pad de lixiviación.

a) Suelo de baja permeabilidad

El material para revestimiento del suelo de baja permeabilidad (soil liner), será obtenido del material existente en la mina, consistirá en suelos arcillosos (arcilla, arena arcillosa, grava arcillosa), acondicionado a una humedad adecuada y compactado de acuerdo a los requerimientos indicados en las especificaciones técnicas del proyecto, Anexo E de este Informe.

Asimismo, se debe garantizar que los 100 mm superiores de esta capa de revestimiento de suelo, no presenten gravas angulosas de tamaño mayor a 25 mm, que podrían dañar la geomembrana durante su instalación o durante la descarga del mineral y las operaciones de lixiviado.

De acuerdo con la estimación de cantidades, el volumen necesario de material para revestimiento de baja permeabilidad es de aproximadamente 85,930 m³. Según las indicaciones de la minera, para la construcción de la capa de suelo de baja permeabilidad, se utilizará material proveniente de la cantera que se explotó para la fase 4.

b) Revestimiento con geomembrana

En el revestimiento de la fase 5 pad de lixiviación, está conformado por una geomembrana de polietileno de baja densidad lineal (LLDPE), texturada por un solo lado (SST) de 1.5 mm (60 mil) de espesor, instalada sobre una base de suelo de baja permeabilidad de 300 mm de espesor y 100 mm de espesor para las demás capas de colección de solución.

En base a los ensayos de punzonamiento realizados sobre este tipo de geomembrana estando en contacto tanto con el sobre-revestimiento como con el suelo de baja permeabilidad. Estos ensayos garantizan la integridad del sistema de revestimiento.

Los resultados de estos ensayos de punzonamiento realizados sobre la geomembrana en contacto tanto con el sobre-revestimiento como con el suelo de baja permeabilidad (que se incluyen en el Anexo B) muestran que la geomembrana de LLDPE de 1.5 mm se comportará adecuadamente ante la aplicación de altas cargas debido al apilamiento del mineral, con cierto grado de fluencia pero sin la ocurrencia de punzonamiento. El lado texturado deberá estar en contacto con el suelo de baja permeabilidad, mientras que el lado liso deberá ser colocado en contacto con el sobre-revestimiento. Los resultados de estos ensayos son presentados en el Anexo A de este Informe.

En el Plano 200-04, se muestran los límites del revestimiento con geomembrana para la fase 5, mientras que los detalles típicos de revestimiento simple son mostrados en el Plano 200-14.

El Contratista encargado de la instalación, deberá proporcionar anclajes temporales y permanentes a la geomembrana. El anclaje temporal podrá

consistir en sacos de arena u otros materiales de lastre, que son necesarios para que los materiales de revestimiento no se muevan significativamente durante las operaciones de despliegue, soldadura y otras actividades de construcción, que es cuando el revestimiento es más susceptible a la acción del viento, agua, y temperaturas extremas.

El anclaje permanente consistirá en material de sobre-revestimiento, materiales de colección de la solución, y trincheras de anclaje. La cobertura protectora o materiales de colección de la solución serán solamente colocados en áreas llanas en el centro del pad. En los planos de diseño se ilustran los detalles de construcción de la trinchera de anclaje.

Las trincheras de anclaje cumplen diferentes funciones, tales como: 1) anclaje del revestimiento para prevenir movimientos descendentes; 2) anclaje del revestimiento para prevenir movimientos excesivos causados por expansión y contracción debidos a cambios de temperatura; 3) anclaje para prevenir el levantamiento por acción del viento; 4) minimizar la infiltración lateral del agua bajo el revestimiento proveniente de fuentes externas tales como lluvia, ojos de aguas, etc.; y 5) establecer un límite fijo para la construcción (esto último no constituye un aspecto crítico en la mayoría de los casos).

c) Sobre-revestimiento

Sobre la geomembrana instalada en la capa base de la fase 5 del pad de lixiviación, se colocará una capa de material seleccionado a manera de sobre-revestimiento, con un espesor de 500 mm, sobre el revestimiento de geomembrana así como sobre el sistema de colección de solución instalados, con la finalidad proteger contra el punzonamiento, las rasgaduras o posibles daños ocasionados por el sistema de transporte y esparcido del mineral ROM en el pad de lixiviación.

Del mismo modo se considerará una capa de sobre-revestimiento de 500 mm sobre la geomembrana y el sistema de colección instalados en las capas 2, 4, 6, 8, 10 y 12 con la finalidad de proteger los materiales instalados. Asimismo, el sobre-revestimiento tiene la finalidad de facilitar la colección de la solución, actuando como un elemento de drenaje.

El material de sobre-revestimiento estará conformado por un mineral granular seleccionado, durable, con un coeficiente de permeabilidad relativamente alto.

Este material deberá ser colocado alrededor del sistema de colección de solución para la protección de las tuberías y del revestimiento de geomembrana instalada. Se obtendrá por zarandeo del material de desmonte de mina y deberá contar con la aprobación del Ingeniero de CQA. El material de sobre-revestimiento deberá cumplir con los requerimientos indicados en las Especificaciones Técnicas del Proyecto, incluidas en el Anexo E de este Informe.

6.1.5 Sistema de colección, conducción y distribución de solución

El propósito del sistema de colección de solución que será instalado en el área de apilamiento del mineral del pad de lixiviación, es proporcionar una evacuación rápida de la solución lixiviada y de la infiltración del agua de tormentas dentro del pad, así como para minimizar la carga de solución en el sistema de revestimiento del pad de lixiviación.

La solución lixiviada será captada mediante las tuberías laterales (secundarias) de HDPE de pared doblé, perforadas, de 100 mm de diámetro, que conducirán la solución hacia las tuberías principales de HDPE de pared doble, perforadas, de 200 mm y 300 mm de diámetro. Las tuberías principales y secundarias de la capa base irán colocadas directamente sobre la geomembrana instalada y tendrán una pendiente mínima de 1% (en la zona más baja del pad). Las tuberías principales y secundarias estarán rodeadas por un material de grava para drenaje (ver plano 200-14).

El sistema de colección de solución del pad es independiente cada dos capas (capa base, 2, 4, 6, 8, 10 y 12), ya que cada una de estas capas está formada por dos celdas independientes, cuyos sistemas de colección de solución descargan a buzones de colección de solución independientes, ubicados en las partes bajas y sobre las banquetas de sus respectivas capas, a partir de donde la solución es conducida a través de una tubería de HDPE sólida SDR 21 de 300 mm de diámetro hacia la caja de distribución de solución, ubicada aguas abajo de la base de la pila de lixiviación, desde la caja de distribución de solución saldrán dos tuberías sólidas de HDPE SDR 21 de 450 mm de diámetro hacia las pozas de PLS e ILS.

La solución pobre o barren será transportada hasta el pad a través de una serie de tuberías de HDPE. La solución rica obtenida de la lixiviación será colectada por el sistema de colección y luego será transportada hacia la poza de PLS. Asimismo, la solución intermedia será transportada hacia la poza ILS.

Las pozas de PLS e ILS existentes de las fases anteriores se unirán mediante un aliviadero para formar un único y nuevo sistema PLS, calculado para almacenar los flujos provenientes del pad más un volumen de contingencia representado por la interrupción de la energía eléctrica y de la operación de las bombas durante un período de 24 horas, además de los volúmenes operativos y de fluctuaciones. La capacidad neta del sistema de pozas PLS será 25,000 m³.

La poza ILS ha sido diseñada para almacenar los flujos provenientes del pad de lixiviación más el volumen de contingencias, los volúmenes operativos y de fluctuaciones. La capacidad neta de la poza ILS será 20,000 m³.

a) Tuberías de colección principales

Las tuberías de colección principales mostradas los Plano 200-05 al 200-11 han sido ubicadas en las rutas de drenaje conformadas durante la nivelación de las capas de colección del pad, con la finalidad de optimizar el drenaje de la solución. Las tuberías principales tienen un diámetro variable (200 mm y 300 mm) y han sido diseñadas para recibir y transportar el flujo de solución y de agua de tormentas colectado por las tuberías colectoras laterales. Al igual que las tuberías colectoras laterales, las tuberías colectoras principales han sido diseñadas para coleccionar y transportar el cien por ciento del flujo de solución y el flujo adicional debido a eventos de tormenta. Adicionalmente, el dimensionamiento de la tubería toma en consideración la reducción de la sección transversal del tubo debido al aplastamiento sufrido como consecuencia de la carga impuesta por el apilamiento del mineral. Tomando como base la experiencia en proyectos similares, se ha considerado que la capacidad de la tubería se reduce hasta en un 40% por las condiciones anteriormente indicadas. Cada tubería principal es dimensionada basándose en la pendiente de diseño, área efectiva de contribución y tasa de riego de la solución. En el Anexo C se incluye el dimensionamiento de las tuberías de colección principal y en los planos de diseño 200-05 hasta el 200-11, las áreas aportantes utilizadas para este efecto. Todas las tuberías principales serán de polietileno de alta densidad, de pared doble (dos paredes, pared exterior corrugada y pared interior lisa), de primera clase para la capa base, y pared simple para las capas superiores (una sola pared que forma una superficie exterior e interior corrugada). Asimismo, con la finalidad de minimizar la reducción de la sección transversal de las tuberías principales debido al aplastamiento del mineral, éstas serán instaladas con un

recubrimiento de grava para drenaje. En los Planos 200-15 al 200-17, se muestran las secciones y detalles típicos de instalación de las tuberías de colección de solución.

El material para drenaje (grava para drenaje), consiste en roca estable, no orgánica y libre de material deletéreo, y que cumpla con las Especificaciones Técnicas del proyecto. La grava para drenaje se colocará alrededor de las tuberías principales; en las dimensiones mostradas en los planos y asegurando una altura mínima de 500 mm sobre las tuberías de colección principal. La grava para drenaje, además de facilitar el drenaje de la solución hacia las tuberías de colección, provee protección al sistema de tuberías principales para disminuir las deflexiones en las mismas, producto del peso del mineral desde el carguío inicial hasta la configuración final de la pila (altura máxima del apilamiento). Los requerimientos de colocación y gradación para este material están incluidos en las Especificaciones Técnicas, Anexo E.

b) Tuberías de colección secundarias

Las tuberías de colección secundarias constituyen los ramales laterales del sistema de colección de solución para la capa base están conformados por tuberías perforadas de HDPE de primera clase, de pared doble (dos paredes, pared exterior corrugada y pared interior lisa), mientras que para las demás capas están conformados por tuberías perforadas de HDPE de pared simple (una sola pared que forma una superficie exterior e interior corrugada). En todas las capas las tuberías serán de 100 mm de diámetro y se colocarán a intervalos de 11 m. Estas tuberías han sido dimensionadas para coleccionar y transportar el 100% del flujo de solución y el flujo adicional debido a eventos de tormenta. El espaciamiento de 11 m entre colectores laterales ha sido seleccionado para reducir la carga hidráulica en el sistema de revestimiento. El espaciamiento de las tuberías laterales es función de los siguientes factores: carga hidráulica permisible sobre el revestimiento, permeabilidad del mineral y tasa de aplicación de la solución. Se asume que la máxima carga hidráulica permisible sobre el revestimiento durante las operaciones normales no debe exceder 1 m. Cargas mayores son tolerables pero sólo para periodos de corta duración.

Para el cálculo del espaciamiento de las tuberías de colección lateral se han asumido los mismos criterios utilizados durante el diseño de la fase 4; para lo cual se ha tomado como referencia los resultados de los ensayos de

permeabilidad realizados al mineral, cuyos resultados arrojan valores que varían entre 2.5×10^{-9} cm/s para una carga equivalente a 6 m de mineral, y 2.2×10^{-9} cm/s para una carga de mineral de 48 m. Estos valores de permeabilidad resultan relativamente altos y corresponden a las muestras de mineral obtenido del material apilado en un sector en actual proceso de lixiviación (fases existentes).

Se conoce que el mineral puede experimentar variabilidad a lo largo de la extensión del apilamiento y la posible degradación mecánica que sufrirá el mineral cuando será apilado, debido a lo cual se ha estimado en forma conservadora un valor del coeficiente de permeabilidad igual a 1.0×10^{-2} cm/s para el cálculo del espaciamiento de las tuberías laterales, similar valor al considerado en el diseño de la fase 4.

Adicionalmente, en el diseño de las tuberías de colección lateral también se ha tomado en consideración la tasa de aplicación de la solución sobre la parte activa del apilamiento de mineral. De acuerdo con la información recibida de la minera (incluida en la Tabla 1.1 de este informe), la solución será aplicada al apilamiento a una tasa de 10 l/hr/m^2 . En base a los cálculos efectuados se determinó que las tuberías de colección lateral deberán estar espaciadas 11 m como máximo para mantener una carga hidráulica máxima menor a 1 m bajo condiciones de operación normal. El cálculo del espaciamiento efectuado está basado en la Ley de Darcy y la ecuación elíptica (un procedimiento estándar en la industria minera). En el Anexo C se presenta una hoja de cálculo mostrando la relación utilizada, los parámetros de entrada y los resultados obtenidos.

El diámetro de las tuberías laterales requeridas es función del tamaño del área de colección y de su pendiente. Inicialmente, se ha asumido que la colección de la solución se daría a través de tuberías de 100 mm de diámetro, y que el flujo dentro de las tuberías de colección podría ser restringido por algún efecto asociado con el colapso, deflexión u obstrucción de la tubería, restringiendo el flujo hasta en un 50%. Por lo tanto, se calculó la capacidad de la tubería de 100 mm (4") para trabajar a un 50% de su diámetro. La capacidad de la tubería de 100 mm fue calculada utilizando la ecuación de Manning con el programa FlowMaster (Haested, 1997). La capacidad calculada fue de aproximadamente 3.96 l/s. Dado este valor así como la tasa de aplicación y el espaciamiento de la tubería (11 m), la máxima longitud permisible de la tubería lateral fue calculada

en 129 m, para una pendiente mínima de 2%. Los cálculos antes mencionados son mostrados en el Anexo C.

Las tuberías laterales serán colocadas directamente sobre la capa de revestimiento con geomembrana. No será necesaria la colocación de grava para drenaje alrededor de estas tuberías, ya que el material de sobre-revestimiento que cubrirá a las mismas, tiene alta permeabilidad, facilitando el ingreso y la conducción de la solución lixiviada. Los detalles de instalación de las tuberías de colección laterales son mostrados en el Plano 200-15.

6.2 CAMINO DE ACCESO PERIMETRAL Y DRENAJE DE AGUAS SUPERFICIALES

El acceso perimetral de la fase 5 comienza en el sector sureste de la fase 4, en donde se realiza el empalme entre ambos accesos; continuando por el perímetro del botadero hasta empalmar con el acceso perimetral de la poza ILS, aguas debajo de la fase 5.

El acceso perimetral ha sido diseñado con un ancho de rodadura de 8 m, con la finalidad de proporcionar un adecuado tránsito de los volquetes de carguío de mineral, asimismo se consideró la construcción de una berma perimetral en todo el contorno exterior del acceso y una berma de seguridad para los tramos en los cuales el talud de relleno tiene una altura mayor a 1 m, el radio mínimo de curvatura del acceso perimetral es de 30 m y posee una pendiente máxima de 18% (en un tramo considerado solamente para el tránsito de vehículos livianos, como camionetas), para incrementar la vida útil del acceso, se proveyó una capa de rodadura que tiene un espesor de 200 mm y su superficie mantiene una inclinación de aproximadamente 2% hacia el exterior de la misma, para derivar el agua de escorrentía superficial hacia los taludes de relleno y/o cunetas de derivación adyacentes al acceso.

El acceso perimetral tiene un desarrollo de 1102.19 m de longitud, y entre las progresivas 0+000 y 0+320, se ha consideró una tubería de 450 mm SDR 21 para drenaje de agua de escorrentía superficial, adyacente a la berma perimetral de la fase 5 del pad de lixiviación encargada de derivar los flujos de escorrentía superficial que se alojen entre la fase 4 del pad y la berma perimetral existente.

En el Plano 400-01 se muestran la planta y perfil; el control horizontal y secciones es mostrado en el Plano 400-02.

6.3 APILAMIENTO DEL MINERAL

En el Plano 200-12 se muestra el arreglo general del apilamiento para las fases 1, 2, 2A, 3, 4 y 5. Este plan ha sido elaborado en base a la información proporcionada por la minera. La fase 5 tiene una capacidad para almacenar 11 millones de toneladas de mineral ROM (run-of-mine) aproximadamente, que será dispuesto en una pila con altura máxima de 80 m.

Para la configuración de la pila se ha considerado que los taludes que no serán cubiertos por futuras ampliaciones (perímetros permanentes) tendrán un talud global de 2.5H:1V. Adicionalmente, el pie de talud de la primera capa en todas las fases tiene un retiro mínimo de 5 m con respecto a la berma perimetral interior del pad.

La geometría de la pila de lixiviación considera capas de 8 m de altura, con superficies planas y banquetas (retiros), intermedias entre capas de ancho variable. La configuración de cada capa se ha desarrollado asumiendo que el mineral se apilará con su ángulo de reposo de 1.34H:1V y que cada capa tendrá un retiro tal que permita obtener el talud global indicado en el párrafo anterior. Durante el carguío podrían requerirse ajustes si el ángulo de reposo no fuera 1.34H:1V o las banquetas podrían variar de ancho debido a deslizamientos de la cara del talud de mineral. Adicionalmente, se debe considerar apilar las capas con ligeras pendientes de modo tal que, se obtengan banquetas con pendiente longitudinal, facilitando la colocación de cunetas y por lo tanto, minimizando los costos durante la etapa de rehabilitación de la pila de lixiviación.

Tanto el diseño de los accesos para la descarga de mineral como el plan de carguío no forman parte del alcance de trabajo encomendado para la ingeniería de detalle de la fase 5, por lo que su diseño no es parte componente del presente informe.

CAPÍTULO VII CANTIDADES Y COSTOS

7.1 MOVIMIENTO DE TIERRAS Y GEOSINTÉTICOS

Con la finalidad de proporcionar al Propietario los costos de construcción aproximados y las cantidades de materiales a ser adquiridos para la construcción, se ha estimado de cantidades de movimiento de tierras, tuberías y geosintéticos, del diseño de la fase 5 del pad de lixiviación, los cuales son incluidas en el Anexo F del presente informe.

En la fase 5 del pad de lixiviación, el cálculo ha incluido la estimación de los volúmenes de movimiento de tierras requeridos para la conformación de la superficie nivelada de acuerdo con el diseño, como son remoción de escombros, excavación de material orgánico (topsoil), de material inadecuado, material común (material de corte a ser utilizado para relleno); y finalmente, volúmenes de relleno estructural compactado. Los volúmenes de excavación de escombros existentes, material orgánico y materiales inadecuados han sido estimados en base a la evaluación de los materiales encontrados durante la investigación geotécnica y la información recibida de la minera. Los materiales inadecuados consisten típicamente en suelos blandos, saturados, arcillas y horizontes de material orgánico, que no presentan características adecuadas de resistencia para una cimentación estable del pad de lixiviación.

Las cantidades fueron estimadas en base al estudio geotécnico, determinando profundidades de excavación de materiales inadecuados y material orgánico, respecto a la superficie del terreno existente, con lo cual se generaron las curvas de nivel representativas de la superficie de cimentación competente. Sin embargo, es necesario indicar que estos volúmenes son referenciales debido a la poca información disponible (número de calicatas y perforaciones relativamente pequeño respecto al área total del pad), y podrían variar debido a las condiciones reales del terreno durante el proceso constructivo.

7.2 MATERIALES

Como parte del proceso de adquisición de materiales asociado al diseño solicitado, se prepararon las cantidades de materiales a ser adquiridos para la construcción, con la finalidad de colaborar con la minera en la preparación de los requerimientos correspondientes.

Las cantidades se generaron para todos los materiales geosintéticos, tuberías, accesorios para tuberías y misceláneos, y son presentados en el Anexo F. Estas cantidades reflejan la totalidad de materiales los requeridos para completar la construcción de la fase 5 del pad de lixiviación.

7.3 ESTIMADO DE COSTOS

El costo total de construcción de la fase 5 ha sido estimado en \$ 8' 833,844.00. En el Anexo F, se presentan las tablas con el cálculo detallado de los costos de construcción y los materiales requeridos.

CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo ha permitido realizar la descripción del proceso de diseño de una pad de lixiviación en una mina de oro en el norte del Perú. El diseño de este tipo de instalaciones involucra diversas especialidades como: geología, sismicidad, geotecnia, hidrología y el diseño civil propiamente dicho. Las siguientes conclusiones se derivan del diseño de ingeniería de detalle llevado a cabo para la fase 5 del pad de lixiviación de un proyecto minero en el norte del Perú:

8.1 CONCLUSIONES

- El diseño de un pad de lixiviación es realizado tomando en cuenta todos los requerimientos y necesidades de la operación minera, expresados en la Tabla 1.1 Criterios de Diseño (página 13), previamente definidos y/o discutidos, entre el equipo de ingeniería y el propietario.
- Para proceder a una adecuada elaboración de las superficies digitales de diseño civil y modelamiento geotécnico de un pad de lixiviación necesariamente debe contarse con un levantamiento topográfico a detalle del área involucrada.
- El diseño de las estructuras componentes del pad de lixiviación se realiza principalmente sobre dos superficies digitales, la superficie topográfica y la superficie digital de cimentación. Para la construcción de esta última superficie, primeramente deberán culminarse los estudios geotécnicos.
- El material resultante de las excavaciones para obtener la superficie de cimentación, normalmente es considerado material inadecuado por ser suelos blandos, húmedos, arcillas o limos, no aptos para material de relleno, por lo que su disposición se deberá prever en un botadero para materiales de similares características.
- En ocasiones es necesario que sobre la superficie de cimentación aun es necesario realizar cortes de terreno, para darle estabilidad a las estructuras del pad de lixiviación, estos requerimientos son definidos en el análisis de estabilidad.
- La diseño civil del pad de lixiviación requiere de un proceso iterativo con el análisis de estabilidad, así, el pad concebido primariamente

va modificándose y completándose hasta culminar en una estructura final la cual es estable geotécnicamente.

- Las simulaciones realizadas en el balance de aguas son positivas excepto durante 3 a 4 meses en las temporadas secas del año, donde el balance es neutro o positivo.
- Durante el periodo de estiaje los flujos de entrada y salida del sistema pueden mantenerse a voluntad en niveles mínimos en las pozas, manejando los volúmenes de agua fresca que se añadan;
- En el periodo de lluvias, el incremento de flujo de ingreso a la poza de grandes eventos requiere realizar tratamientos al flujo antes de la descarga.
- Las simulaciones realizadas en el balance de aguas han permitido verificar la suficiencia de las capacidades de las pozas de PLS y de mayores eventos existentes, complementadas con la capacidad de la planta de neutralización, no requiriendo actualmente la ampliación de la capacidad de estas pozas;
- El tamaño de la poza de mayores eventos, se ha mantenido en 50,000 m³, asimismo, la probabilidad de ocurrencia de flujos de purga sea escasa, del orden inferior al 2%. En consecuencia, la utilización de la poza de mayores eventos de las fases anteriores ha conllevado a que se requiera una planta de neutralización de 300 m³/h.
- Las investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio desarrolladas para el diseño del pad de lixiviación, han permitido caracterizar de manera adecuada los materiales de cimentación, materiales de canteras para la construcción de las instalaciones y el mineral que será apilado en el pad. A partir de la obtención de las propiedades geotécnicas e hidráulicas de los materiales involucrados, se han realizado los análisis geotécnicos y diseño civil del pad de lixiviación.
- Los análisis de estabilidad realizados para diferentes secciones de la pila, indican que el diseño es estable para las condiciones estática y sísmica.
- El diseño de la fase 5 del pad de lixiviación se realizó de acuerdo los requerimientos de operación de la mina en el periodo

considerado, haciendo partícipe al propietario de las actividades de diseño de ingeniería de detalle.

- El diseño civil del pad de lixiviación se optimiza iterando los resultados de los análisis de estabilidad de las estructuras propuestas tantas veces como sea necesario, de tal manera que se obtengan estructuras estables.
- Los métodos del diseño civil se basó en la tecnología actual para el diseño de pads de lixiviación y las recomendaciones de la práctica industrial estándar.
- La información que se presenta en este informe está basada en calicatas, perforaciones e inspecciones visuales realizadas en campo, que intentan representar lo mejor posible las características de la zona en estudio, pudiendo haberse encontrado algunas condiciones distintas durante la construcción.

8.2 RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones se derivan del trabajo de diseño de ingeniería de detalle:

- Es necesario que el ingeniero diseñador realice una visita al área del proyecto para inspeccionar el terreno
- El diseño de las estructuras del pad de lixiviación conlleva a la aplicación de materiales geosintéticos los cuales deberán ser recomendados en función de lo que el mercado peruano está en la capacidad de proporcionar.
- Cuando sea necesario realizar cortes de terreno, para darle estabilidad a la pila de lixiviación, es recomendable realizar también terraplenes en relleno para compensar el material del corte con el material de relleno.
- Se recomienda no integrar los flujos de escorrentía superficial ni subterráneos con los flujos provenientes del pad de lixiviación, esto con el objetivo de monitorear los flujos que discurren aguas arriba y aguas abajo del pad de lixiviación.
- Mantener niveles mínimos en las pozas, regulando el ingreso de agua fresca en función de los volúmenes añadidos por las lluvias, puesto que uno de los supuestos del modelo hidrológico aplicado

ha sido esta forma de operación. Para esto se recomienda una estrecha coordinación con los operadores de las estaciones meteorológicas para que éstos informen rápidamente acerca de los datos diarios de precipitaciones máximas, de manera tal que se pueda proporcionar adecuadamente el ingreso de agua fresca al sistema.

- En situaciones en las que por disposición topográfica no sea posible el dimensionamiento de pozas PLS, ILS y de Mayores Eventos que satisfagan la demanda del balance de aguas, es necesario compensar esta carencia con el dimensionamientos de pozas raincoat y con plantas de destrucción de cianuro.
- Se recomienda que la construcción del pad de lixiviación sea realizado siguiendo un estricto control de calidad de la construcción, el cual debe ser llevado a cabo ya sea por el contratista encargado de las obras, o por una empresa especializada.
- Se recomienda que además del control de calidad, se realice un estricto programa de aseguramiento de la calidad de la construcción (CQA), el que debe ser realizado por una empresa especializada en este tipo de servicios. El programa de CQA debe verificar que la construcción se realice de acuerdo a lo indicado e los planos y especificaciones técnicas del proyecto.
- El nivel de cimentación debe ser determinado en campo como parte de los trabajos de movimiento de tierras, de acuerdo con las condiciones de compacidad/consistencia que presenten los materiales encontrados, y que deberán ser verificados por un ingeniero geotécnico o por el ingeniero CQA. El nivel de cimentación debe ser determinado después de haber realizado las labores de remoción de material orgánico como vegetales y raíces, así como la eliminación de materiales inadecuados, tales como suelos blandos, muy húmedos a saturados
- Uno de los aspectos importantes del CQA es el control de la compactación de los rellenos. Se deben emplear los métodos adecuados para este control, ya sea con el cono de arena o con el densímetro nuclear. Para los materiales de desmonte de mina es

más recomendable aplicar el método de reemplazo de agua, debido a su granulometría.

- Es necesario también un seguimiento estricto a los trabajos de despliegue y soldadura de la geomembrana. Las pruebas de costuras, ya sea de fusión o extrusión deben ser realizadas en el 100% de los casos.
- Para la instalación de las tuberías de pared doble del sistema de sub-drenaje o de colección de la solución se deberán emplear accesorios de fábrica, evitando su fabricación en campo.
- Cuando el mineral de la pila de lixiviación posee mucho material fino (pasante de la malla 200 es mayor que 20%), no es recomendable utilizar geotextiles en el sistema de colección de solución.
- Si la solución utilizada para la lixiviación del mineral posee ácidos de cualquier tipo, no es recomendable utilizar geotextiles en el sistema de colección de solución.

BIBLIOGRAFÍA

Castillo J. y Alva J. (1993). "Peligro Sísmico en el Perú", VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima, pp.409-431.

Consorcio Lahmeyer-Salzgitter (1973). "Evaluación del Potencial Hidroeléctrico Nacional - Volumen II: Metodología y Resultados". República del Perú, Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Electricidad.

Hynes, M.E. and Franklin, A.G. (1984). "Rationalizing the Seismic Coefficient Method", U.S. Army Corp of Engineers, Department of the Army, Waterways Experimental Station, Miscellaneous Paper GL-84-13, USA.

IILA-SENAMHI-UNI (1983). "La Hidrología del Perú".

Janbu, N. (1967). "Settlement Calculations Based on the Tangent Modulus Concept", Soil Mechanics and Foundation Engineering Bulletin N° 2, The Technical University of Norway, Trondheim, Norway, 20 pp.

Janbu, N., and E. I. Hjeldnes (1965). "Principal Stress Ratios and their Influence on the Compressibility of Soils", Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Canada, Vol 1, pp. 249-253.

Janbu, N. (1963). "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests", Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Weisbaden, Germany, Vol. 1, pp. 19-25.

Jurgenson, L. (1934). "The Application of Theories of Elasticity and Plasticity to Foundation Problems", Contributions to Soil Mechanics 1925-1940, Boston Society of Civil Engineers, Boston, Massachusetts, pp. 148-183.

MEM-Dirección General de Asuntos Ambientales (1997). "Guía Ambiental para Proyectos de Lixiviación en Pilas", Perú.

SLIDE (2003). "2D Limit Equilibrium Slope Stability for Soil and Rock Slopes". User's Guide. Rocscience.

Van Zyl, Hutchinson, Kiel; editors (1988). "Introduction to Evaluation, Design and Operation of Precious Metal Heap Leaching Projects". Society of Mining Engineers, Inc.