

RESUMEN EJECUTIVO

El Proyecto Tambogrande será desarrollado mediante el desarrollo de una mina a tajo abierto para la explotación de óxidos de oro con una tasa de 7,500 tpd durante los primeros cuatro años y luego será ampliada para la explotación de sulfuros de cobre, que serán trabajados a una tasa de 20,000 tpd durante el tiempo restante de la vida de la mina, que se estima en aproximadamente 9 años adicionales. Se evaluaron nueve zonas potenciales para el almacenamiento de los relaves y se seleccionaron dos para ser estudiados más detalladamente. El lugar seleccionado se ubica directamente al noreste de la mina y fue escogido por ser el que permite ocupar la menor extensión de terreno, ofrece la suficiente capacidad para el almacenamiento conjunto de roca estéril conteniendo sulfuros, relaves y la facilidad de su cierre, debido a que no se ubica en una cuenca natural principal.

La mina está localizada a una altitud de 60 msnm, cerca de límite entre el desierto costero y zonas de uso agrícola, estando rodeada por cerros de baja altura. La geología regional consiste de arenas eólicas recientes hacia el sur del río Piura y material aluvial reciente al norte del mismo, que yacen sobre las arenas bentónicas densas, gravas de la formación Tambogrande. La formación Tambogrande descansa sobre una base de rocas volcánicas (dacitas y andesitas). La mediana de la precipitación anual es de 147 mm, mientras que la media anual es de 379 mm. La precipitación se ve muy influenciada por el fenómeno de El Niño. El evento de tres meses para un periodo de retorno de 1,000 años es de 4.3 m, mientras que la Precipitación Máxima Probable (PMP) puede alcanzar hasta 12 m para un evento similar. La evaporación promedio en el área del proyecto es del orden de 1,800 mm/año.

La mina está ubicada en una zona de sismicidad moderada alta, en la que el sismo máximo creíble (SMC) utilizado para el diseño tendría una aceleración pico de terreno de 0.4 g, con M_m 7.

Se perforaron siete taladros, 23 calicatas y 2 taladros con auger manual para evaluar las condiciones de cimentación de las presas. Estas consisten, en general, de gravas y arenas limosas de la Formación Tambogrande. Se identificaron varios depósitos de material aluvial suelto en las áreas bajas de la presa. La napa freática se ubica generalmente entre 3 y 5 m por debajo del nivel del terreno.

El depósito de relaves será construido en dos etapas, (1) Depósito de Óxidos, para almacenar los relaves provenientes de la cianuración de los minerales de oro durante cuatro años; y (2) Depósitos de Sulfuros, para almacenar los relaves sulfurados y la roca estéril con potencial de generar aguas ácidas. La disposición conjunta de la roca estéril con potencial de generación de aguas ácidas con los relaves, es el plan de manejo ambiental más efectivo para el almacenamiento de la roca estéril.

La altura final del depósito de relaves será de aproximadamente 40 m y cubrirá una área de 180 ha. La presa será construida usando material de cubierta y roca estéril no generadora de aguas ácidas, proveniente del tajo abierto. La presa será construida utilizando el método de línea central y la pendiente del talud aguas abajo será de 2H:1V, con una sección que tendrá una pendiente de 9H:1V en la zona en la que se ha detectado la presencia de suelos aluviales profundos y sueltos de hasta 250 m de extensión. En esta sección, los suelos sueltos son demasiado profundos como para excavarlos de manera segura o para hacer la compactación in situ de los mismos.

El depósito de relaves y las presas serán revestidas en sus bases para minimizar las pérdidas potenciales por filtración al ambiente. El sistema de revestimiento consistirá de una geomembrana HDPE texturizada de 60 mil, colocada sobre una capa de 300 mm de espesor de suelo mejorado con bentonita. Las pérdidas potenciales estimadas por filtración, con este sistema de revestimiento, se estiman en menos de 0.1 L/s. Durante las operaciones, las filtraciones discurrirán hacia el tajo abierto. Una vez finalizado el cierre, la filtración discurrirá hacia el río Piura. El modelamiento de la concentración de contaminantes y de la filtración del agua subterránea indica que,

con el sistema de doble revestimiento, la carga de contaminantes que podría eventualmente llegar al río Piura no afectará la calidad del agua del río.

Se construirán canales de derivación a lo largo de los lados norte y este del depósito de relaves, para derivar la escorrentía superficial. Estos canales tendrán normalmente 4 m de ancho. El agua será recuperada del depósito y recirculada hacia la planta. La tasa de recuperación del agua variará entre 64 L/s para la etapa de Óxidos y 356 L/s para la etapa de Sulfuros. El índice también variará durante los periodos secos y húmedos. El depósito contará con suficiente capacidad de almacenamiento para retener el caudal de una crecida que podría presentarse durante un evento de tres meses, para un periodo de retorno de 1 en 1,000 años para el depósito de Óxidos y para un evento de un mes de duración, correspondiente a un periodo de retorno de 1 en 1,000 años para el depósito de Sulfuros. Se requerirá descargar el agua de proceso diluida durante estos eventos, con el fin de garantizar el mantenimiento de un borde libre adecuado para la seguridad de la presa.

El excedente de la roca estéril no generadora de ácido y de los suelos de cubierta serán almacenados en pilas a ubicarse entre el depósito de relaves y la planta concentradora. Se construirán tres pozas de control de sedimentos para recolectar la escorrentía proveniente de los taludes de la presa, de las pilas de material de cubierta y del depósito de roca estéril.

Se rehabilitarán las instalaciones de almacenamiento de relaves y de roca estéril para permitir el uso futuro de esos terrenos y garantizar la estabilidad física y química de dichas instalaciones. El diseño del cierre comprende los siguientes componentes:

- Colocación del sistema de revestimiento inicial, diseñado para minimizar la filtración del agua de los relaves y la desaturación de los mismos. Esto reducirá el potencial de oxidación y de transporte de drenaje ácido de los relaves a través de la base del depósito.
- Cobertura de los taludes de la presa y de las pilas de roca estéril con vegetación.

- Saturación a largo plazo de los relaves sulfurados con una capa de cubierta saturada, de material granular impermeable y arena, con siembra de vegetación en la superficie superior.
- Las instalaciones no están ubicadas en una cuenca natural principal y el manejo de avenidas sólo será necesario para la precipitación directa sobre el área del embalse. Se construirá un vertedero de emergencia, con cobertura de protección (rip-rap) para el manejo del caudal pico máximo probable.

TABLA DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN EJECUTIVO	I
1. INTRODUCCION	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Criterios generales de diseño	3
1.3 Selección del área	4
1.4 Generalidades de la instalación.....	9
1.5 Recomendaciones para trabajos futuros.....	12
2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA.....	13
2.1 Generalidades.....	13
2.2 Clima 13	
2.2.1 Generalidades.....	13
2.2.2 Precipitación	14
2.2.3 Precipitación extrema para diferente duración de lluvia y periodos de retorno	17
2.2.4 Evaporación y evapotranspiración.....	19
2.2.5 Velocidad y dirección del viento	20
2.3 Geología.....	21
2.3.1 Geología regional.....	21
2.3.2 Geología superficial.....	24
2.4 Sismicidad.....	25
2.4.1 Generalidades.....	25
2.4.2 Sismicidad histórica	27
2.4.3 Evaluación de riesgo sísmico.....	27
2.4.4 Resumen.....	30
2.5 Hidrogeología	30
2.5.1 Flujo y descarga de agua subterránea regional	30
2.5.2 Recarga del acuífero	31
2.5.3 Recursos de agua subterránea cerca de Tambogrande.....	34

3.	INVESTIGACIONES DE CAMPO	35
3.1	Investigaciones anteriores	35
3.2	Mapeo de geología	35
3.3	Perforación y Pruebas in situ	36
3.3.1	Generalidades	36
3.3.2	Prueba SPT	38
3.3.3	Instalación de los piezómetros	40
3.3.4	Observaciones del nivel de agua en los piezómetros	40
3.3.5	Pruebas de conductividad hidráulica	40
3.3.6	Calicatas	41
3.3.7	Investigación geofísica	42
4.	PRUEBAS DE LABORATORIO	43
4.1	Suelos naturales	43
4.1.1	Distribución del tamaño de partículas y plasticidad	43
4.1.2	Compactación Proctor estándar	44
4.2	Relaves	44
4.2.1	Distribución del tamaño de las partículas y gravedad específica .	45
4.2.2	Pruebas de consolidación	46
4.2.3	Pruebas de sedimentación de relaves	46
4.2.4	Prueba de celda de Tempe	47
4.2.5	Pruebas geoquímicas	47
4.3	Calidad del agua de proceso	48
4.4	Roca Estéril	50
4.4.1	Pruebas geoquímicas	50
4.4.2	Pruebas de carga puntual	62
4.5	Calidad del agua subterránea	62
4.6	Material de préstamo de arcilla bentonítica	64
5.	CRITERIOS DE DISEÑO Y PARÁMETROS DE DISEÑO	67
5.1	Generalidades	67
5.2	Cantidades de material	68
5.2.1	Relaves	68
5.2.2	Roca de desecho	68

5.3	Criterios sobre la calidad del agua	72
5.4	Parámetros de diseño para los materiales	72
5.4.1	Relaves	72
5.4.2	Roca Estéril	74
5.4.3	Resistencia al corte	74
5.4.4	Materiales de Construcción	75
5.5	Parámetros de diseño para los materiales de cimentación y de construcción	76
5.5.1	Parámetros de resistencia de diseño	76
5.5.2	Parámetros de diseño de conductividad hidráulica	76
6.	DISEÑO DE LA PRESA	78
6.1	Generalidades	78
6.2	Dimensión del depósito	78
6.3	Diseño de Secciones	81
6.4	Asentamientos	82
6.5	Presión de poros en la cimentación	83
6.6	Análisis de licuefacción	84
6.7	Análisis de estabilidad del dique de arranque	85
6.8	Estabilidad de la cara aguas arriba para el recrecimiento por línea central	86
6.9	Dique final	87
6.10	Respuesta sísmica del dique	87
7.	DISEÑO DEL REVESTIMIENTO	89
7.1	Generalidades	89
7.2	Pérdidas potenciales de filtración – ausencia de sistema de revestimiento	90
7.3	Opciones de revestimiento	92
7.3.1	Materiales de revestimiento	92
7.3.2	Sistemas compuestos de revestimiento	94
7.4	Evaluación del sistema de revestimiento	95
7.5	Evaluación de la influencia de la filtración en el Río Piura	98
7.6	Diseño del revestimiento	104
8.	MANEJO DE ROCA ESTERIL Y MATERIAL DE CUBIERTA	106

8.1	Generalidades.....	106
8.2	Botadero para suelo de cubierta.....	106
8.3	Botadero de roca estéril	107
8.4	Co-disposición de roca de desecho que genera ácidos, dentro del depósito de relaves	107
9.	MANEJO DE AGUA Y DE LOS RELAVES.....	111
9.1	Canales de derivación	111
9.2	Manejo del agua.....	111
9.3	Pozas de sedimentación	112
9.4	Balance de agua y recuperación.....	113
10.	PLAN DEMANEJO AMBIENTAL Y PLAN DE CIERRE.....	116
10.1	Plan de Manejo ambiental.....	116
10.2	Plan de cierre.....	118
	10.2.1 Depósito de relaves.....	118
	10.2.2 Botaderos de roca estéril y de material de cubierta	123
10.3	Evaluación de riesgos	123
11.	CONSTRUCCIÓN	128
11.1	Generalidades.....	128
11.2	Preparación de cimentación y drenaje	128
11.3	Programa de construcción y cantidades.....	130
12.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
12.1	Conclusiones	132
12.2	Recomendaciones	134
	PROTECCIÓN MUTUA.....	136
	REFERENCIAS.....	137

TABLAS

Tabla 1.1	Zonas potenciales para almacenamiento de relaves (de Klohn Crippen, 2000)	8
Tabla 2.1	Mediana de precipitación anual, anual media, mensual media.....	16
Tabla 2.2	Precipitación esperada para el área del Proyecto Tambogrande.....	17
Tabla 2.3	Análisis de frecuencia de la serie de precipitación POT de Chulucanas (Usando la distribución modificada de Gumbel I).....	18
Tabla 2.4	Estimados de PMP en base a la serie de precipitaciones POT en Chulucanas	19
Tabla 2.5	Datos de evaporación.....	20
Tabla 2.6	Parámetros sismológicos para las zonas sísmicas.....	28
Tabla 2.7	Evaluación probabilística de la Aceleración Pico de Terreno (APT) usando las relaciones de atenuación reciente y zonas de fuente de Castillo &	29
Tabla 2.8	Evaluación determinística de la Aceleración Pico de Terreno (APT) para los tres escenarios de sismos máximos creíbles considerados (SMC).....	30
Tabla 3.1	Pruebas de resistencia compresiva no confinada y prueba al corte in situ en Calicatas	41
Tabla 3.2	Capas inferidas del perfil sísmico	42
Tabla 4.1	Resultados de la distribución del tamaño de partículas y de plasticidad	44
Tabla 4.2	Resultados de la prueba de compactación Proctor estándar	44
Tabla 4.3	Resumen de la distribución del tamaño de partículas y gravedad específica de las muestras de relaves	45
Tabla 4.4	Resumen de las pruebas con odómetro en las muestras de relaves	46
Tabla 4.5	Resultados de la prueba de sedimentación– Muestras de relaves	46
Tabla 4.6	Resultados de la prueba de celda de Tempe– Muestras de relaves 47	
Tabla 4.7	Resumen de los resultados de las pruebas estáticas para los relaves de sulfuros.....	48
Tabla 4.8	Resumen de los resultados de las pruebas cinéticas para relaves de sulfuros.....	48

Tabla 4.9	Análisis del agua de solución tratada, del procesamiento de óxidos	49
Tabla 4.10	Análisis de agua en ciclo cerrado – Proceso de sulfuros	50
Tabla 4.11	Resumen de los resultados de pruebas estáticas para la roca estéril 52	
Tabla 4.12	Concentraciones medidas en los lixiviados mediante la prueba de agitación en frasco en muestras de óxido TG-1	54
Tabla 4.13	Resumen de los resultados de las pruebas cinéticas para roca estéril 56	
Tabla 4.14	Calidad del agua subterránea (Programa de Muestreo de Pozos 2001) 63	
Tabla 4.15	Mineralogía de la bentonita	65
Tabla 4.16	Resumen de los resultados de la prueba de absorción	66
Tabla 5.1	Criterios de Diseño	67
Tabla 5.2	Programa de entregas de relave	68
Tabla 5.3	Programa de entrega de roca estéril	69
Tabla 5.4	Detalle del destino de los materiales.....	70
Tabla 5.5	Parámetros de diseño de los relaves.....	73
Tabla 5.6	Parámetros de la resistencia al corte de la roca estéril.....	74
Tabla 5.7	Estimación de la densidad seca de la roca estéril	75
Tabla 5.8	Densidad de roca estéril y relación de vacíos	75
Tabla 5.9	Parámetros de resistencia natural del material.....	76
Tabla 6.1	Requerimientos de almacenamiento para el depósito de relaves.....	80
Tabla 6.2	Tamaño de diseño de los embalses	80
Tabla 6.3	Resumen de evaluación de licuefacción por debajo del dique	84
Tabla 6.4	Resumen del análisis de estabilidad - Sección A-A'	86
Tabla 6.5	Resumen del análisis de estabilidad– Sección B-B'	86
Tabla 6.6	Resumen del análisis de estabilidad - Sección A-A'	87
Tabla 6.7	Resumen de análisis de estabilidad – Sección B-B'	87
Tabla 6.8	Desplazamiento estimado del dique.....	88
Tabla 7.1	Resultados de la simulación de filtración.	97
Tabla 7.2	Aproximaciones de la calidad del agua en el Río Piura después del cierre debido a un régimen de filtración fugitiva de 1L/seg desde la poza de óxidos.....	100

Tabla 7.3	Aproximaciones de la calidad del agua en el Río Piura después del cierre debido a un régimen de filtración de 1L/seg desde la poza de sulfuros	102
Tabla 8.1	Resumen de los materiales de desecho	106
Tabla 9.1	Parámetros de diseño del canal de derivación	111
Tabla 9.2	Parámetros de diseño de la poza de sedimentación	113
Tabla 9.3	Balance de agua del depósito de relaves para la fase de óxidos	113
Tabla 9.4	Balance de agua del depósito de relaves para la fase de sulfuros.....	114
Tabla 10.1	Parámetros de entrada de HELP	120
Table 11.1	Lista de cantidades.....	131

FIGURAS

Figura 1.1	Ubicación del Proyecto	2
Figura 1.2	Ubicación de Alternativas para los Depósitos de Relaves.....	7
Figura 1.3	Disposición general.....	11
Figura 2.1	Geología regional.....	23
Figura 3.1	Sección Geotécnica Longitudinal - Presa Oeste	37
Figura 3.2	Valor SPT (N ₁) ₆₀ Vs Altitud	39
Figura 6.1	Diseño de la Presa de Relaves – Planta, secciones y detalles.....	79
Figura 8.1	Planteamiento de la Disposición de Relaves y Roca Estéril.....	110
Figura 10.1	Plan de Cierre – Planta, sección y detalles	121
Figura 10.2	Esquema de la cobertura	122

ANEXOS

Anexo I	Informe de Investigación del Emplazamiento
Anexo II	Resultados de Ensayos de Laboratorio
Anexo III	Sismicidad
Anexo IV	Análisis de la Estabilidad

PLANOS

B-33001	Ubicación de Estaciones Meteorológicas
B-33002	Disposición General
B-33003	Geología Regional
D-33004	Sección Geotécnica Longitudinal – Presa Oeste
D-33005	Sección Geotécnica Longitudinal – Presa Sur
D-33006	Sección Geotécnica Longitudinal – Presa Este
D-33007	Análisis de Estabilidad de la Presa de Arranque
D-33008	Análisis de Estabilidad de la Presa Final
B-33009	Disposición del Sistema de Revestimiento del Dique de Arranque de Óxidos y de Sulfuros
D-33010	Diseño del Vertedero de Cierre – Planta, Secciones y Detalles
D-33011	Diseño de la Presa de Relaves – Planta, Secciones y Detalles
B-33012	Disposición del Botadero de Roca Estéril
B-33013	Obras de Derivación – Planta y Secciones
B-33014	Plan de Cierre – Planta, Sección y Detalles

1. INTRODUCCION

1.1 Generalidades

Este informe presenta el diseño a nivel de factibilidad, de los depósitos de relaves y manejo de roca estéril para el depósito TG-1 del Proyecto Tambogrande. La mina a tajo abierto de oro y sulfuros masivos está ubicada al norte del Perú, aproximadamente 45 km al noreste de la ciudad de Piura, (ver Figura 1.1). Los principales componentes de este estudio son el diseño del depósito de relaves y el de los botaderos de roca estéril.

La capa de óxido con contenido de oro será explotada durante los primeros cuatro años, a un ritmo de 7,500 tpd. Ello generará relaves con un potencial insignificante de generación de aguas ácidas. Los materiales de desecho producidos durante este periodo consisten básicamente de suelos de sobrecarga y roca estéril no generadora de ácido. El resto de la vida de la mina comprenderá una operación de extracción de sulfuros a una tasa de 20,000 tpd. Los relaves de sulfuros y la roca estéril con sulfuros tienen un alto potencial de generar ácidos y ambos productos serán almacenados en el depósito de relaves. La roca estéril con potencial de generar ácidos también será almacenada en el depósito de relaves. La roca estéril que no sea generadora de ácido se usará para la construcción de la presa de relaves.

Este informe fue elaborado por Klohn Crippen Consultants Ltd. para Manhattan Sechura Compañía Minera S.A. El material contenido en este informe refleja el mejor juicio de Klohn Crippen a la luz de la información disponible al momento de su elaboración. Cualquier uso por terceros de este informe, o cualquier decisión que se tome en base a éste, será responsabilidad de dichos terceros. Klohn Crippen no admite responsabilidad por daños, si los hubiere, que pudieran sufrir por terceros como resultado de las decisiones o acciones tomadas en base a este informe.

Figura 1.1 Ubicación del Proyecto

1.2 Criterios generales de diseño

Las instalaciones de relaves y roca estéril para el proyecto Tambogrande han sido diseñadas para almacenar todo el volumen de relaves y roca estéril generadora de ácido del tajo abierto TG-1 a lo largo de los 12 años de la vida de la mina. El depósito de relaves comprende dos celdas revestidas de HDPE. Una para el almacenamiento de relaves de óxidos de la fase de extracción de oro y la más grande para el almacenamiento de relaves de la fase de sulfuros. La roca estéril generadora de ácido también será almacenada en celdas y encapsulada con los relaves para minimizar la oxidación de los sulfuros.

El depósito de relaves ha sido diseñado de acuerdo a las siguientes normas internacionales:

Diseño sísmico y de crecidas

Las pautas de la Asociación Canadiense de Presas (The Canadian Dam Association) clasifica a las presas de acuerdo a su tamaño y consecuencia de su falla. La falla de la presa de relaves de Tambogrande tendría un importante impacto ambiental y por lo tanto, se clasifica como estructura de alto riesgo.

Los *criterios de diseño sísmico* se basan en las pautas de la Comisión Internacional de Grandes Presas (International Commission on of Large Dams - ICOLD) para estructuras de alto riesgo. El sismo base de operación (operating basis earthquake - OBE) tiene una probabilidad anual de 1 en 475 años, y una aceleración pico de terreno de 0.25 g. El sismo base de diseño (design basis earthquake - DBE) se aplica al cierre y es el máximo sismo creíble, con una aceleración pico de terreno de 0.4 g. Si el DBE se produce durante las operaciones, la presa experimentaría ciertas deformaciones significativas, pero no fallaría. Las deformaciones permisibles durante las operaciones son del orden de 0.5 m, para minimizar el rasgado del revestimiento.

Los *criterios de diseño de avenidas* se basan en las pautas del ICOLD y las normas de Seguridad de Presas de Canadá. La precipitación de un periodo de tres meses de 1,000 años de retorno se almacenaría en la poza de óxidos y la precipitación de un evento de 1 mes de 1,000 años de retorno se almacenaría en la poza de sulfuros. Al cierre, se construiría un vertedero para manejar la crecida máxima probable.

Criterios ambientales

La instalación de relaves está diseñada para almacenar relaves de óxidos y sulfuros y toda la roca estéril que sea potencialmente generadora de ácido. La instalación será revestida con una combinación de geomembrana HDPE compuesta y suelo de bentonita de baja permeabilidad. El modelamiento de la filtración del sistema de revestimiento ha sido realizado usando los modelos HELP de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA) para sistemas de revestimiento. El modelo HELP fue desarrollado por la Estación Experimental de Cursos de Agua del Ejército de EE.UU, en virtud de un contrato cooperativo con la EPA. La EPA recomienda el uso del modelo HELP, el mismo que es exigido por muchos estados para la evaluación de diseños de cierre de instalaciones de manejo de desechos peligrosos y no peligrosos.

1.3 Selección del área

Se realizó un estudio para la selección del área con el objeto de determinar la zona más favorable. Se identificó un total de nueve zonas potenciales para el almacenamiento de relaves, en un radio de 25 km del proyecto Tambogrande, en base a mapas topográficos con curvas de 25 m y reconocimiento de la zona (Klohn Crippen, 2000). Estas zonas se presentan en la Figura 1.2. La Tabla 1.1 proporciona un resumen de las nueve zonas, junto con las condiciones de distancia a la mina y el uso de tierras existente. Muchas de las zonas se eliminaron por las siguientes razones:

- La Zona R-1, al sur del río, era demasiado pequeña.

- Las Zonas R-5, y R-7 están ubicadas en áreas de cultivo, y los conflictos por uso de terrenos podrían ser importantes. Asimismo, las inspecciones de R-7 indicaron que el levantamiento topográfico con curvas de 25 m disponible, no definía con precisión los límites del depósito y que las zonas potenciales de contrafuerte de la presa eran significativamente elevadas, de manera que la construcción de la presa no era posible.
- La Zona R-6 está ubicada 17 km al noroeste de la mina, en un área de uso de terreno agrícola/ pastoreo. La zona fue descartada por el uso de tierras existente y la distancia a la mina.
- Las Zonas R-8 y R-9 estaban ubicadas a más de 16 km al Este de la mina y requerirían del transporte de los relaves y probablemente, de la roca de desmonte a estas zonas. Esta zona no representaba ventaja alguna en términos de eficiencia de almacenamiento. Las zonas estaban ubicadas en un área de poco uso de tierras, pero, estaban cerca de la quebrada San Francisco.

La evaluación para la selección de la zona redujo las alternativas potenciales a tres, las mismas que fueron investigadas en más detalle. Las tres zonas comprendieron R-1, al sur de la mina, (al sur del río Piura), y R-3 y R-4, adyacentes a la mina (al este y oeste).

Se evaluó una serie de alternativas de almacenamiento en cada uno de los tres lugares. Estas fueron: (1) almacenamiento de los relaves sólo en zonas potenciales al sur del río Piura, almacenando toda la roca estéril en los botaderos de desmonte adyacentes al tajo abierto, (2) almacenamiento al interior del dique de anillo cerca del tajo abierto con co-almacenamiento de la roca estéril generadora de ácido dentro del depósito de relaves y (3) almacenamiento de la roca estéril no generadora de ácido en botaderos adyacentes al tajo abierto.

Las tres alternativas principales se evaluaron con más detalle, en base al uso de terreno, (impacto social), riesgo ambiental, adecuación geotécnica, adecuación hidrogeológica y costo (costos totales y de arranque). La opción de co-almacenamiento en la zona al norte del río Piura fue seleccionada como la mejor

opción, en base a las siguientes consideraciones (en comparación al lugar al sur del río Piura):

1. ***La capacidad de tratar efectivamente los temas de drenaje ácido de roca.*** El co-almacenamiento de roca estéril de sulfuros con los relaves elimina la necesidad de manejo ambiental de drenaje de ácido de los botaderos de desmonte con alto contenido de sulfuro. Todo el sulfuro es encapsulado en un depósito revestido de relaves saturados de baja permeabilidad. El almacenamiento de la roca estéril de la mina en un lugar al sur del río Piura requeriría el transporte de roca estéril y de los relaves a lo largo del río Piura.
2. ***Zona para depósito más pequeña.*** El depósito propuesto cubre un área de 180 Ha.
3. ***El depósito propuesto no se ubica en una zona de drenaje principal*** Ello reduce de manera significativa los riesgos potenciales relacionados con las crecidas y los fenómenos de El Niño, en especial, en el cierre. El área de captación para el depósito de relaves propuesto al sur, tiene una área de captación de aproximadamente 20,000 ha.
4. ***Capacidad mejorada para monitorear y controlar la filtración.*** Durante las operaciones de la mina, toda la filtración llegará al tajo abierto, lo que proporcionará una garantía de monitoreo adicional y tiempo para evaluar el funcionamiento del sistema de revestimiento, antes del cierre.
5. ***Uso de tierras existente comparable:*** El uso de terrenos en el área de embalse propuesto comprende cultivos combinados con poca irrigación. El uso de tierras para el embalse alternativo comprende algarrobos y pastoreo limitado.

La zona seleccionada tiene el impacto potencial más bajo en el ambiente y proporciona una contención segura de los relaves y de la roca estéril, tanto durante las operaciones como al momento del cierre.

Figura 1.2 Ubicación de Alternativas para los Depósitos de Relaves

Tabla 1.1 Zonas potenciales para almacenamiento de relaves (de Klohn Crippen, 2000)

ZONA	UBIC.	DIST. A LA PLANTA (km)	ALT. DE CRESTA. (m)	VOLUMEN DE ALMAC. (Mm ³) VA	VOLUMEN DE LA PRESA (Mm ³) VP	RELACION DE (VA / VP)	CONDIC. DE CIMIENTACIÓN	FUENTES DE PRÉSTAMO	USO DE TIERRAS (1)	MAYOR ESTUDIO & COMENTARIOS
R-1	Sur del río	4	100	60+	2	30	80 m de arena	Arena (posiblemente roca estéril)	Muy limitado, sin embargo, parte de la comunidad de Locuto	Sí
R-2	Sur del río	2	100	8	1	8	60 m de arena	Arena & roca estéril	Cerca de Locuto,	No, demasiado pequeña.
R-3	Este de TG-1	1	100	60	8	7	40 m de arena	Arena & roca estéril	Parte del área de la mina	Sí
R-4	Oeste de TG-1	1	100	60	8	7	40 m de arena	Arena & roca estéril	Parte del área de la mina	Sí
R-5	Norte de TG-1	10	175	60	3	20	Arena, limo, roca intemperizada	Roca intemperizada y arena	Mucha Irrigación y uso de terreno.	Baja prioridad debido al uso de terreno/agua y distancia a la planta.
R-6	Noroeste de TG-1	17	200	60	3	20	Arena & grava, roca intemperizada	Arena/Grava & roca intemperizada	Pastos/cultivos	Baja prioridad, deficiente topografía
R-7	Este de TG-1	8	175	30	2	15	Arena	Arena y roca intemperizada	Intenso cultivo de mango	Baja prioridad, deficiente topografía
R-8	Este de TG-1	16	200	40	2	20	Roca, arenas & grava	Roca intemperizada, limitada	Uso limitado	Baja prioridad, bajo volumen de almacenamiento y lejos de la planta
R-9	Este de TG-1	20	200	40	2	20	Roca, arena & grava	Roca intemperizada, limitada	Uso limitado	Baja prioridad, bajo volumen de almacenamiento y lejos de la planta

NOTA: Todos los volúmenes son estimados preliminares en base a una escala de 100,000, levantamiento topográfico con curvas de nivel a valor de 25 m.

1. El uso del terreno fue tomado como un indicador del impacto social.

1.4 Generalidades de la instalación

El depósito de relaves estará ubicado en un área de bajas colinas, de menos de 100 m de altura. La vegetación comprende arbustos y pastos con algunos árboles. Los diques de arranque tendrán un relleno de arena homogéneo y serán levantados usando roca estéril no generadora de ácido (NGA) obtenida de la explotación de la mina. Los trabajos propuestos aparecen en la Figura 1.3 y comprenden dos depósitos, el botadero de roca estéril externo y la pila de suelo orgánico:

- Depósito *de relaves de óxidos*: Este será el depósito inicial y estará formado de un dique de anillo de relleno de toca de desmonte y tierra de hasta 20 m de alto. El depósito será revestido con una combinación de geomembrana HDPE de 60 mil compuesta, un revestimiento de suelo de bentonita de baja permeabilidad. Las pendientes laterales del dique varían de 2 horizontal: 1 vertical (2H:1V), a 9H:1V, de acuerdo a las condiciones del terreno de cimentación. La poza de óxidos será usada durante 3 años.
- Depósito de relaves de sulfuros: Este comprende un dique de relleno de roca estéril /tierra de hasta 40 m de altura que será construido inmediatamente al lado y contiguo al depósito de relaves de óxidos. El depósito estará protegido con el mismo revestimiento que el depósito de óxidos. El dique de arranque será construido de manera tal, que esté listo para el Año 3. Las presas serán levantadas por etapas durante la vida de la mina usando roca estéril NGA y suelos de sobrecarga obtenidos de la explotación de la mina. La roca estéril con sulfuros y la roca estéril potencialmente generadora de ácido (PGA) será “co-almacenada” con los relaves.
- Pila de *roca de mina*: Al este del tajo abierto se formará una pila externa que contendrá hasta 5.5 Mm³ de roca de mina NGA y de sobrecarga. Se calcula que la altura total de la pila, entre 15 m y 20 m, cubrirá el área del botadero designada. En la medida de lo posible, este material se usará para la cubierta de cierre y la rehabilitación. El material que no sea adecuado para la construcción será recontorneado y rehabilitado.
- Pila de suelo orgánico: Aproximadamente 400,000 m³ de suelos de sobrecarga de la mina serán colocados en una pila separada para la posterior rehabilitación y cierre.

Los canales de derivación (norte y este) serán construidos para derivar los recursos de agua sulfurada alrededor del depósito. Se construirá una zanja de recolección de filtración a lo largo de la base de aguas abajo de la presa, para conducir la filtración a la poza de recolección de sedimentos. Se construirán dos pozas de recolección de sedimentos para las áreas de relaves y las áreas de roca estéril.

Figura 1.3 Disposición general

1.5 Recomendaciones para trabajos futuros

El diseño de la presa de relaves presentado en este informe ha sido elaborado en base a las investigaciones en el lugar y a nuestra evaluación del diseño y condiciones de operación. El diseño de detalle de la instalación puede optimizar algunos aspectos que comprenden lo siguiente:

- Se deben realizar investigaciones en el lugar que comprendan taladros de perforación y estudios sísmicos, para definir mejor la profundidad y extensión de los depósitos de suelos de sobrecarga sueltos. Ello puede reducir los requerimientos de excavación y nivelación de laderas.
- Se ha identificado una fuente de bentonita como material de revestimiento. La bentonita es un mineral arcilloso que tiene el potencial de atenuar/adsorber contaminantes metálicos del depósito de relaves. Las pruebas preliminares indican que la bentonita tiene una permeabilidad muy baja (3×10^{-10} cm/s) y una alta capacidad de intercambio catión/ión. Se recomienda mayores pruebas para cuantificar de manera más precisa las propiedades de la bentonita. Se debe realizar la optimización adicional del sistema de revestimiento.
- Se debe realizar pruebas geoquímicas adicionales de la roca estéril para optimizar aún más la extracción y colocación de roca estéril no generadora de ácido y el almacenamiento de roca estéril generadora de ácido en el depósito de relaves.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

2.1 Generalidades

El área del proyecto está ubicada a una altitud de entre 50 m y 100 m, cerca del borde este del desierto costero del norte del Perú. El clima es generalmente muy seco, con lluvia durante la temporada húmeda (noviembre a abril). Se presenta una mayor precipitación pluvial durante los años en los que ocurren el fenómeno de El Niño. El río Piura separa la topografía de dunas de arena costera (al sur) de la topografía de cerros bajos (al norte). El área del depósito de relaves está ubicada en un área de cerros bajos (una altura menor a 100 m), justo al norte del río Piura, tal como se muestra en el Plano B-33001. Esta área es un terreno agrícola que parcialmente contiene árboles, con arbustos y pastos, El área se encuentra al sur de los canales de riego del reservorio de San Lorenzo. El uso de tierras en el área del depósito de relaves comprende tierras de cultivo de baja producción, y es atravesada por la carretera de acceso a Chulucanas.

2.2 Clima

2.2.1 Generalidades

La cuenca del río Piura cuenta con una amplia red de estaciones meteorológicas e hidrológicas. La principal fuente de información hidrometeorológica para la cuenca del río Piura es el Proyecto Chira-Piura (“Proyecto Especial Chira-Piura” PEChP), que tiene 14 estaciones meteorológicas y 40 estaciones pluviales con información que se remonta a 1972. También hay estaciones administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y otras instituciones, con información que se remonta a 1932. Asimismo, hay estudios regionales como el Estudio de Hidrología del Perú (IILA-SENAMHI-UNI, 1983) y el Atlas de Evaporación en el Perú (SENAMHI, 1994).

Existen nueve estaciones meteorológicas que registran la temperatura, la velocidad del viento, la humedad y/o evaporación en el área del Proyecto Tambogrande. La

temperatura media anual en Tambogrande es aproximadamente 24 °C. El mes más caluroso es febrero, con una temperatura promedio diaria de aproximadamente 27°C, y el mes más frío es julio, con una temperatura promedio diaria de aproximadamente 21°C.

2.2.2 Precipitación

Gran parte de la precipitación en las áreas costeras del Perú se produce durante eventos de lluvia extraordinarios y no frecuentes. Como consecuencia, la precipitación media anual es más alta que la mediana. De manera más específica y en base a una investigación (por Douglas, et al., no publicado, 2000), en relación a las consecuencias del fenómeno de El Niño, las lluvias relacionadas que caen en las regiones costeras del norte del Perú y sur de Ecuador representan una de las anomalías climáticas más dramáticas encontradas en el mundo.

A pesar de que todos los fenómenos de El Niño no se traducen necesariamente en precipitaciones mayores a las promedio, las lluvias más intensas se han producido durante los años en que ha habido fenómeno de El Niño, según la clasificación de Wolter (1998). La precipitación anual para los fenómenos de El Niño de 1982/83 y 1997/98 se presentó de manera muy aislada, con precipitaciones que fueron por lo menos tres veces el valor del siguiente año más húmedo.

La mediana de precipitación anual en el área de Tambogrande varía entre 26 mm y 232 mm, con una tendencia general de mayor precipitación de oeste al este (véase Tabla 2.1). La ubicación de estas estaciones se presenta en el Plano B-33001.

Dado que la información sobre precipitación ha sido reunida de manera esporádica en el pueblo de Tambogrande, no existe suficiente información para determinar el factor correcto con el cual convertir la precipitación regional mensual o anual a precipitación en la zona. Por lo tanto, los valores de precipitación mensual media y anual mediana esperados se han basado conservadoramente en la estación de Chulucanas (Tabla 2.2).

Dado que Chulucanas está ubicada al este de Tambogrande, el efecto de la precipitación orográfica puede ser mayor en Chulucanas que en el área del proyecto.

En enero del 2000 se instaló una estación meteorológica automatizada en el campamento de Manhattan al extremo norte del pueblo de Tambogrande. Conforme se cuenta con mayor información, es posible que se reduzca la precipitación mensual y anual en Tambogrande a partir de los estimados actuales.

Tabla 2.1 Mediana de precipitación anual, anual media, mensual media

	Montegrande	Miraflores	CORPAC- Piura	San Joaquín	Partidor	Hualtaco ¹	Curbán ¹	Chulucanas	Morropón
Elevación, m	27	30	49	210	220	100	75	95	140
Periodo de registro	1972-1987	1971-1998	1957-1996, 1998	1973-1986	1963-1973, 1996-1999	1968-1978	1964-1978	1942-1967, 1972-1989	1952-1999
Enero	17.9	46.1	23.2	51.9	77.5	27.0	32.4	54.2	35.3
Febrero	17.3	39.2	29.9	45.0	115.2	43.4	46.0	93.7	68.2
Marzo	31.4	62.3	43.1	76.6	178.1	120.1	114.0	142.8	133.9
Abril	35.1	42.9	22.8	82.5	65.0	11.1	16.9	58.4	65.0
Mayo	17.0	16.5	13.2	54.8	8.3	1.3	2.9	19.9	12.2
Junio	1.4	8.3	4.4	15.1	1.0	0.3	0.0	5.6	2.6
Julio	0.2	0.1	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2
Agosto	0.2	0.1	0.0	0.3	0.0	0.1	0.3	0.3	0.4
Septiembre	0.6	0.2	0.0	0.7	0.5	0.0	0.0	0.2	0.3
Octubre	0.8	0.9	1.0	0.5	2.4	0.8	1.0	0.9	1.2
Noviembre	0.8	1.4	0.9	0.8	2.0	0.3	1.4	0.6	1.2
Diciembre	0.9	7.4	1.2	5.6	34.0	2.2	2.4	4.0	9.9
Media anual	122	216	139	330	461	207	219	379	327
Mediana anual	26	39	36	74	232	116	161	147	186

¹El periodo de registro para las estaciones de Hualtaco y Curbán no comprende información de los fenómenos de El Niño en 1982/83 ni 1997/98.

² La precipitación se expresa en mm.

Tabla 2.2 Precipitación esperada para el área del Proyecto Tambogrande

CRITERIO DE DISEÑO	VALOR	%
Mediana de precipitación anual (de la estación de Chulucanas)	147 mm	
Precipitación anual media (de la estación de Chulucanas)	379 mm	
Precipitación mensual media (de la estación de Chulucanas)		
Enero	54.2 mm	14
Febrero	93.7 mm	25
Marzo	142.8 mm	38
Abril	58.4 mm	15
Mayo	19.9 mm	5.0
Junio	5.6 mm	1.5
Julio	0.2 mm	<0.1
Agosto	0.3 mm	<0.1
Setiembre	0.2 mm	<0.1
Octubre	0.9 mm	0.24
Noviembre	0.6 mm	0.16
Diciembre	4.0 mm	1.0
1 precipitación anual de sequía en 10 años de retorno (Chulucanas)	49 mm	
Número de años consecutivos con menos precipitación que la precipitación anual de sequía de 10 años de retorno para el periodo de registro		
Chulucanas (39 años)	1	
Morropón (45 años)	1	
Precipitación anual de sequía de 5 años de retorno (Chulucanas)	65 mm	
Número de años consecutivos con menos precipitación que precipitación anual de sequía de 5 años de retorno para el periodo de registro		
Chulucanas (39 años)	2	
Morropón (45 años)	2	
Precipitación de 24 horas de 100 años de retorno (de la estación de Chulucanas)	235 mm	
Precipitación máxima probable en 24 horas (de la estación de Chulucanas)	731 mm	

2.2.3 Precipitación extrema para diferente duración de lluvia y periodos de retorno

Con la finalidad de determinar los valores representativos de la precipitación extrema para diferentes duraciones de lluvias y periodos de retorno, se ha seguido el método de pico mayor al límite (Peak over Threshold – POT) o series de duración parcial. El criterio usado para establecer la serie POT fue, en todos los casos, seleccionar todos los eventos de tormenta independientes sobre un tope definido como el promedio de la serie máxima anual. El uso de la tormenta anual más grande en años secos puede llevar a confusión, por lo tanto, se usa más el de una tormenta independiente durante los años húmedos (El Niño) en el análisis.

Se calcularon los valores representativos para larga duración y los periodos de retorno, en la estación de Chulucanas y que corresponden a la serie POT aplicable a una distribución Gumbel modificada. Los resultados se presentan en la Tabla 2.3. Se realizó un análisis de lluvia de 4 meses como una aproximación de la lluvia anual. Se encontró que, debido al efecto de Oscilación Sur de El Niño (ENSO), la información sobre lluvia anual estaba extremadamente alterada, pero la información de los 4 meses encajó mejor con el análisis de frecuencia. En armonía con los análisis de lluvias de duración menor, se usó la metodología POT. Es razonable asumir que la lluvia extrema de 4 meses es representativa de la lluvia anual, pues hay poca lluvia y alta evaporación en los 8 meses restantes del año. En el Informe de Línea Base Ambiental (Klohn Crippen, 2002) se proporcionan los datos iniciales.

Los fenómenos de El Niño 1982/83 y 1997/98 tienen periodos de retorno de aproximadamente 50 años para duraciones de tormenta de 7 días o más, mientras que el periodo de retorno es de alrededor de 100 a 200 años para duraciones de tormenta de 3 días. Estos resultados son coherentes con la clasificación de registros de precipitación, en los que los días húmedos consecutivos son generalmente 4 ó 5.

Tabla 2.3 Análisis de frecuencia de la serie de precipitación POT de Chulucanas (Usando la distribución modificada de Gumbel I)

PERIODO DE RETORNO	DURACION DEL EVENTO				
	3-DIAS (mm)	7-DIAS (mm)	1-MES (mm)	3-MESES (mm)	1 AÑO* (mm)
10 años	242	143	842	1716	1895
50 años	336	569	1263	2661	3045
100 años	377	634	1442	3061	3530
500 años	469	786	1854	3984	4651
1000 años	509	851	2031	4381	5130

*El evento de 1 año se basa en la precipitación POT de 4 meses.

La precipitación máxima probable (PMP) se calculó usando el método estadístico Hershfield (WMO, 1986). La PMP es definida por la Sociedad Meteorológica Norteamericana (1959) como la mayor intensidad teórica de precipitación para una duración determinada que es físicamente posible en un área de drenaje particular, en un periodo de tiempo determinado del año. Los resultados de estos cálculos se

muestran en la Tabla 2.4, que incluye una columna para los valores máximos mundiales de precipitaciones registrados hasta el año 1967 (Todd, 1970). La mayor parte de los valores máximos corresponden a zonas tropicales expuestas a huracanes o monzones que se ubican en Asia Meridional. Cuando se trata de una zona como el área del Proyecto Tambogrande, la cual se ve afectada por fenómenos climáticos anómalos (los ciclos ENSO), el método preferido de estimación de la PMP es la evaluación meteorológica de los frentes climáticos potenciales que pueden provocar eventos de fuertes e intensas tormentas.

Tabla 2.4 Estimados de PMP en base a la serie de precipitaciones POT en Chulucanas

DURACION DE PMP	CHULUCANAS (mm)	MÁXIMA EN EL MUNDO (mm)
1 día	731	1900
3 días	1337	3400
7 días	2137	4950
1 mes	5669	9600
3 meses	12101	16350

¹Actualizado en 1967 de Foster (1948) por UNECAFE (Todd, 1970). Esta relación magnitud-duración para el mundo es probable que esté actualizada hasta el año 2000.

2.2.4 Evaporación y evapotranspiración

Según el Atlas de Evaporación en el Perú (SENAMHI, 1994), la evaporación anual promedio (en bandeja) para Tambogrande es de aproximadamente 2300 mm. Este valor es comparable al valor anual medio de 2172 mm medido en la estación de Tejedores entre 1970 y 1980. La ciudad de Piura, ubicada aguas abajo en una región más árida de la cuenca del río Piura, tiene un coeficiente de evaporación en bandeja de aproximadamente 2600 mm (SENAMHI, 1994). Usando un coeficiente de bandeja de 0.7, la evaporación promedio anual se estima en 1600 mm en Tambogrande, 1500 mm en Tejedores, y 1800 mm en Piura.

La evapotranspiración potencial fue estimada por Tello Vargas (1991) usando el método Thornthwaite, que va de 1285 mm en Morropón (140 msnm) a 1449 mm en

CORPAC-Piura (49 msnm). Se estima que la evapotranspiración real varía de 50 mm en CORPAC-Piura a 300 mm en Morropón, debido a la estacionalidad de la lluvia.

Tabla 2.5 Datos de evaporación

PARÁMETRO	VALOR
Evaporación anual media	1600 mm
Evaporación mensual media	
Enero	148
Febrero	134
Marzo	134
Abril	127
Mayo	118
Junio	100
Julio	111
Agosto	129
Setiembre	144
Octubre	156
Noviembre	158
Diciembre	164

2.2.5 Velocidad y dirección del viento

La velocidad promedio mensual del viento registrada en la estación Tejedores fue 2.6 m/s para el período de 1972 hasta 1980. La dirección del viento que prevaleció fue del suroeste. Los datos de la estación meteorológica de Manhattan instalada en el extremo norte del pueblo de Tambogrande también muestran esa dirección de viento del sur oeste para los meses de febrero y marzo del 2000. La dirección prevaleciente del viento registrada en la estación Manhattan fue del oeste para los meses de enero a abril del 2000. La velocidad promedio del viento registrada en la estación Manhattan para el periodo de enero a abril del 2000 fue 1.4 m/s. En la estación Manhattan se registró una velocidad de viento menor que en la estación Tejedores. Esto se debe a que Tejedores está ubicada más cerca a los Andes y se ve más afectada por el relieve topográfico.

En el área sur de Tambogrande, la escasa vegetación permite una fuerte refracción solar sobre la arena. En consecuencia, en la tarde (alrededor de las 4 pm), se

desarrollan áreas localizadas de baja presión, dando lugar a vientos de tipo remolino que de alguna manera enfrían el área al mismo tiempo que levantan grandes cantidades de polvo. Este fenómeno diurno se ve consistentemente a lo largo de todo el año. La fuerza y el volumen de estos vientos es considerable. Los vientos disminuyen alrededor de las 8 pm, hora en que se convierten en brisa. Un resumen de los datos de la estación Tejedores para el período de 1958 hasta 1970 muestra una velocidad promedio anual del viento desde menos de 0.3 m/s a las 7 a.m., a 2.1 m/s a la 1 p.m. y hasta 3.2 m/s a las 7 p.m. (Espinoza, 1987).

2.3 Geología

2.3.1 Geología regional

Los depósitos de sulfuros masivos en Tambogrande están ubicados en la secuencia volcánica basal de la Cuenca de Lancones al noroeste del Perú. La cuenca se desarrolló como una depresión continental de arco posterior, en respuesta a una subducción de dirección sureste a lo largo de la costa norte de América del Sur durante la época Jurásica a Cretácea. La estratigrafía en la Cuenca Lancones que se extiende al noreste, consiste de rocas volcánicas bimodales con predominancia de máficos, que evolucionan a volcánicas intermedias a félsicas y rocas sedimentarias químicas y marinas continentales clásticas.

Estrato del Cretáceo o probablemente más antiguos, de aproximadamente 4,900 m de espesor llena la Cuenca de Lancones. La sección bimodal basal que alberga los depósitos de sulfuro macivo tiene un espesor mínimo de 500 m, y probablemente sea más potente.

Las rocas cretáceas en la región Tambogrande están expuestas en un amplio anticlinal con una exposición limitada que cubre un área de 40 km de ancho y 70 km de largo, al norte del río Piura. Las rocas más antiguas están expuestas en el núcleo del anticlinal, centrados aproximadamente al oeste del Tambogrande. Adyacente al río Piura y al sur de éste, las rocas del cretáceo están cubiertas por la Formación

Tambogrande del Terciario (bentonitas y material aluvial) recubiertas con depósitos de arena eólicas. El espesor de la sobrecarga al sur del río varía desde aproximadamente 20 m cerca al río, hasta más de 150 m en los depósitos eólicos profundos. Las rocas del Cretáceo al norte del río Piura están cubiertas principalmente por la Formación Tambogrande, con depósitos aluviales recientes en la parte superior. El espesor de la sobrecarga varía entre 0 m a 30 m, al norte del río, en el área del depósito TG-1.

La geología del basamento rocoso local consiste principalmente de rocas volcánicas y volcanoclásticas intercaladas con intrusivos predominantemente félsicos a intermedios. La Figura 2.1 (Plano B-33003) muestra la geología del área del proyecto. El basamento rocoso en el área muestra una baja conductividad hidráulica y escasa evidencia de zonas de falla altamente transmisivas. Sobre el lecho de roca se encuentra la Formación Tambogrande y depósitos ribereños y aluviales recientes. La Formación Tambogrande es una unidad heterogénea, muy densa, de arena limosa y grava, con capas de arcilla bentonítica y bentonita diseminada. La calidad geotécnica es similar a la de una roca débil/suelo muy denso.

Figura 2.1 Geología regional

2.3.2 Geología superficial

Las principales unidades del suelo comprenden:

- arenas eólicas;
- depósitos fluviales del río Piura;
- depósitos ribereños y aluviales de quebrada; y
- la Formación Tambogrande (que también podría ser considerada como basamento rocoso). Las propiedades geotécnicas de estos materiales se describen en las siguientes secciones.

Arena eólica

Al sur del río Piura se encuentran depósitos de arena eólica de grano fino, que yacen sobre depósitos de arena de grano fino similares, relacionados con el río. Los depósitos eólicos tienen una potencia variable, que puede cubrir hasta varios cientos de metros. La arena es de grano fino a medio, con aproximadamente 5% a 10% de limos. La densidad es generalmente mediana, con registros de golpes SPT no corregidos del orden de 20 a 30 golpes por 300 mm.

Depósitos fluviales del río Piura

El río Piura es el río principal en el área del Proyecto Tambogrande. Se origina en la Sierra, a alturas de hasta 3000 m y pasa por la zona de la mina potencial. Los depósitos fluviales contenidos dentro del cruce del río y áreas adyacentes son arenas de grano fino y yacen tanto sobre la Formación Tambogrande, o la roca de basamento de permeabilidad moderada a baja. Las arenas fluviales del río Piura son generalmente de una densidad media.

Depósitos ribereños y aluviales de la quebrada

La Quebrada Carneros, y los depósitos ribereños ambos relacionados tanto con la Quebrada Carneros como con el río Piura, se encuentran por encima de la Formación Tambogrande, que es más densa, en el área de la presa de relaves propuesta y los botaderos de desmonte, justo al noreste del tajo abierto. Los depósitos varían desde arena suelta, impermeable a limos suaves, con cierta arcilla. La profundidad varía, con una máxima observada de 20 m. Los depósitos de arena están ubicados en los existentes canales ribereños antiguos y se encuentran depósitos ribereños más finos en las áreas bajas adyacentes a los ríos.

Formación Tambogrande

La Formación Tambogrande consiste principalmente de arenas densas, aluviales de bentonita y grava intercalada con arcillas de bentonita de baja permeabilidad con depósitos aluviales antiguos intercalados. El espesor de la Formación Tambogrande es hasta 50 m, haciéndose más delgado hacia los flancos de los afloramientos del lecho de roca. Los depósitos aluviales de la Formación Tambogrande han sido interpretados como depósitos de quebrada antiguos con tendencia en dirección noroeste hacia la cadena de montañas, y/o depósitos antiguos de playa.

Lecho de roca

El lecho de roca que subyace los depósitos superficiales en las áreas propuestas para el almacenamiento de roca estéril y relaves consiste de flujos máficos y dacíticos intercalados y brechas que contienen una serie de fracturas sub-verticales a sub-horizontales. Las rocas dacíticas predominan dentro de la roca madre.

2.4 Sismicidad

2.4.1 Generalidades

El proyecto está ubicado a una latitud de 4° 55' 44" S y una longitud de 80° 20' 18" W. La distribución de los hipocentros sísmicos históricos en el área indica que el

segmento de la placa de Nazca con corrimiento hacia el centro norte del Perú tiene una subducción parcial a una profundidad de quizás 150 km y luego continúa horizontalmente al este por cientos de kilómetros. Gutscher et al. (1999a, 1999b y 2000) sugieren que el patrón sísmico está relacionado con el efecto de flotación de la subducción de una plataforma oceánica perdida, “Plataforma Inca”, por debajo del norte del Perú.

Las tres fuentes principales de actividades sísmicas relacionadas con el lugar del proyecto parecen ser las siguientes (Moreano 1994):

- La poco profunda corteza de la placa sudamericana superior (sismos corticales);
- La interfaz entre las placas Nazca inferior y Sudamericana superior (sismos de interplaca); y
- La losa de subducción más profunda de la placa Nazca inferior (sismos intra-losa).

Mitouard et al. (1990) realizaron un estudio paleomagnético de las formaciones post-paleocénica y temprana oligocénica al sur de Ecuador y al norte de Perú, mostrando evidencia de un patrón de rotaciones en direcciones opuestas en ambos lados de la deflexión Huancabamba: la amplitud de la rotación es de aproximadamente 25° en el sentido de las agujas del reloj de la deflexión y de aproximadamente 20° en el sentido opuesto a las agujas del reloj al sur de la misma.

La principal falla activa en el área del proyecto es la falla Chaquilbamba, ubicada entre los pueblos de Chaquilbamba y Marcabal (Departamentos de Cajamarca y La Libertad) en la Cordillera Occidental del norte del Perú (Leureiro, et al., 1991).

Los detalles de la evaluación de sismicidad se presentan en el Anexo III y los resultados se resumen en las siguientes secciones.

2.4.2 Sismicidad histórica

La información sobre sismos ocurridos en aproximadamente 300 km de la mina fue extraída del catálogo de sismicidad del Centro Nacional de Información Geofísica de EE.UU. (NGDC), el Catálogo Compuesto del Sur de América del Sur para el periodo de 1587 a 1995 contenido en CD-ROM (NGDC, 1996). También se realizó una búsqueda en Internet en la base de datos PDE del Centro de Información de Sismos Nacionales de EE.UU. para cubrir el periodo comprendido entre agosto de 1995 y noviembre de 2000 (NEIC, 2001). Los detalles se presentan en el Anexo III.

2.4.3 Evaluación de riesgo sísmico

Se realizó una evaluación del riesgo sísmico en el área del proyecto, usando métodos probabilísticos y determinísticos.

Las relaciones de atenuación seleccionadas para el análisis de riesgo sísmico se presentan en el Anexo III. Las relaciones fueron seleccionadas de manera que representen tres fuentes sísmicas: sismos corticales dentro de la Placa sudamericana superior; sismos intra-losa dentro de la Placa Nazca inferior y sismos entre placas (en la interfase entre las dos placas superiores a una profundidad de aproximadamente 50 km).

Evaluación probabilística

Se realizó un análisis probabilístico del riesgo sísmico para la zona de Tambogrande usando el modelo Castillo y Alva (1993) en el programa EZ-Frisk (Ingeniería de riesgo, 1997). La Tabla 2.6 presenta las zonas de fuentes sísmicas empleadas en el modelo (Castillo, 1994).

Tabla 2.6 Parámetros sismológicos para las zonas sísmicas

ZONA	M _{MIN}	M _{MAX}	INDICE	BETA	PROFUND. (km)
F1 (s)	4.8	8.1	1.49	2.51	50
F2 (s)	4.8	7.9	3.28	2.60	40
F3 (s)	4.8	8.0	6.43	3.14	30, 60
F4 (s)	4.8	8.2	3.79	3.24	40, 60
F5 (s)	4.8	8.2	3.95	2.82	60
F6 (c)	4.9	7.4	0.44	2.67	50
F7 (c)	4.9	7.4	0.17	3.57	40
F8 (c)	4.9	7.0	0.19	2.42	65
F9 (c)	4.9	7.5	0.88	3.30	60
F10 (c)	4.9	7.3	0.71	2.57	50
F11 (c)	4.9	7.1	3.60	3.55	40, 60
F12 (c)	4.9	7.1	0.75	4.55	50
F13 (s)	4.9	6.9	0.18	2.52	100
F14 (s)	4.9	6.5	0.86	4.75	100
F15 (s)	4.9	7.2	1.64	2.69	100
F16 (s)	4.9	7.2	3.09	3.76	115
F17 (s)	4.9	7.5	12.82	3.69	90, 125, 160
F18 (s)	4.9	7.5	2.43	2.29	110, 180
F19 (s)	4.9	7.0	2.87	3.33	120, 160
F20 (s)	4.9	7.5	0.75	1.69	610

Notas:

- (s) zona de fuente sísmica de subducción
- (c) zona de fuente sísmica cortical

El análisis se realizó usando relaciones de atenuación recientemente desarrolladas. Se usó la relación Abrahamsen y Silva (1997) basada en datos internacionales de los eventos corticales poco profundos en regiones activas para las zonas de fuentes corticales. Se usó la relación de atenuación intra-losa de Youngs et al. (1997), en base a los eventos intra-losa en todo el mundo, para las zonas de fuentes de subducción. Para limitar los valores de la aceleración de terreno calculados a bajas probabilidades, la incertidumbre estuvo limitada dentro del rango de $\pm 2.5\sigma$ de los valores medios (donde σ es la desviación estándar relacionada con los valores APT de la relación de atenuación). Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Evaluación probabilística de la Aceleración Pico de Terreno (APT) usando las relaciones de atenuación reciente y zonas de fuente de Castillo &

Periodo de retorno (años)	APT (g)
100	0.15
475	0.25
1,000	0.31
2,000	0.36
10,000	0.51

Nota: La relación Abrahamsen y Silva (1997) para sismos corticales y la relación de Youngs et al. (1997) para sismos de subducción (incluyendo eventos intra-losa y entre placas) con $\pm 2.5\sigma$ de truncación.

Evaluación determinística

Se incluyeron tres escenarios de Sismos Máximos Considerados, también denominados Sismo Máximo Creíble, (SMC) en la evaluación determinística. No se implican probabilidades para los siguientes escenarios considerados:

- Evento sísmico cortical – Magnitud 7, Distancia del epicentro 0 km, y Profundidad 15 km;
- Evento sísmico entre placas – Magnitud 9, Distancia del epicentro 0 km, y Profundidad 30 km; y
- Evento sísmico intra-losa – Magnitud 7.5, Distancia del epicentro 0 km, y Profundidad 40 km.

Estos escenarios fueron seleccionados luego de la revisión de eventos históricos importantes y del escenario sismo-tectónico del lugar. Los parámetros de fuentes sísmicas conservadoras asumidos en estos escenarios con los valores medios evaluados de Aceleración Pico de Terreno horizontal (APT) se presentan en la Tabla 2.8. La magnitud a la que se hace referencia en la tabla es la magnitud del momento (M_w), y esta magnitud es convertida a una magnitud apropiada pertinente, para cada una de las relaciones de atenuación.

Tabla 2.8 Evaluación determinística de la Aceleración Pico de Terreno (APT) para los tres escenarios de sismos máximos creíbles considerados (SMC)

ESCENARIO DE SISMO	MAGNITUD DEL MOMENTO	DISTANCIA DEL EPICENTRO (km)	PROFUNDIDAD FOCAL (km)	RANGO DE APT (g)
Escenario 1 Cerca al evento cortical	7	0	15	0.24-0.34
Escenario 2 Evento interplacas	9	0	30	0.27
Escenario 3 Cerca al evento intra-losa	7.5	0	40	0.25

2.4.4 Resumen

Para el estudio de factibilidad del proyecto, se seleccionó una aceleración pico de terreno de diseño de 0.4 g para SMC, en base a los resultados de la evaluación probabilística (Tabla 2.7) y la evaluación determinística (Tabla 2.8).

2.5 Hidrogeología

2.5.1 Flujo y descarga de agua subterránea regional

La geología del lecho de roca local consiste principalmente de rocas volcánicas y volcano-clásticas intercaladas con rocas intrusivas félsicas a intermedias. La roca en el área tiene una conductividad hidráulica baja, con escasa evidencia de zonas de fallas altamente transmisivas. Sin embargo, se espera que la zona intemperizada superior del basamento rocoso (cuyo espesor estimado es de 10 m a 30 m) tenga una conductividad hidráulica moderada. Se espera que un 40 a 50% de la recarga del lecho de roca total sea interceptado por esta característica transmisiva y que ésta filtre en dirección suroeste, hacia el valle del río Piura. Se espera que el agua percolada restante recargue los acuíferos de lecho de roca regionales más profundos. Se considera que la filtración de la zona del lecho de roca fracturado es un componente de recarga para los acuíferos en la base de la cadena de montañas y del flujo base del

río Piura y quebrda San Francisco. No existe evidencia del uso de agua subterránea dentro del terreno montañoso o de las áreas bajas.

De acuerdo con los registros oficiales de 1968, la producción anual de los pozos de agua subterránea aguas arriba Tambogrande fue de aproximadamente 250 millones $m^3/año$ u $8 m^3/seg$ (International Engineering, 1968). La mayoría del agua subterránea es extraída de los acuíferos aluviales del Cuaternario y Terciario y es usada para irrigación de tierras de cultivo dentro de las áreas de Solsol, Cruz Pampa, Chulucanas, y Morropon. Los registros de bombeo recientes para el área, muestran sin embargo, que la producción anual es del orden de sólo 2 a 3 m^3/seg (Ministerio de Agricultura, 2001).

Los caudales medianos del río Piura en Tambogrande para años normales y de El Niño son de aproximadamente $11 m^3/seg$ y $240 m^3/seg$, respectivamente. En base al modelo de balance de agua para la captación superior, los índices de recarga promedio del acuífero estimados durante años normales y años con fenómeno de El Niño son de aproximadamente $5 m^3/seg$ y $32 m^3/seg$, respectivamente. Se calcula que la explotación de los acuíferos en la cuenca superior para los años normales y húmedos producirá entre $3 m^3/seg$ y $0.5 m^3/seg$, respectivamente. El excedente de agua subterránea en los acuíferos es el balance – aproximadamente $2 m^3/seg$ y $31 m^3/seg$. Dado que la capacidad de transferencia de los acuíferos del valle del río Piura es baja (se estima en menos de $0.1 m^3/seg$), la mayoría de este excedente de agua subterránea debería descargar al río Piura, proporcionando un flujo base durante los años secos y un caudal adicional durante las temporadas de lluvias.

2.5.2 Recarga del acuífero

La recarga del acuífero en la cuenca del río Piura, es en general baja durante la temporada seca debido a la menor cantidad de lluvias y los altos índices de evapotranspiración. Durante la temporada húmeda y los años del fenómeno de El Niño, la humedad y las precipitaciones aumentan de manera considerable, por lo que,

aumenta la recarga del acuífero. La temporada húmeda se extiende generalmente entre enero y abril. Durante un año normal, la precipitación es más alta en las montañas (promedio de 500 mm/año) y más baja en el Desierto de Sechura (70mm/año). Durante un año con el El Niño, los patrones de lluvia en toda la cuenca cambian dramáticamente, ocurriendo normalmente la lluvia más alta en el valle del río Piura cerca de Tambogrande (aproximadamente 3000 mm/año). Las lluvias para los años con fenómeno de El Niño, en las montañas y en el desierto, son de aproximadamente 1000 mm y 1500 mm, respectivamente.

Los acuíferos profundos de lecho de roca regionales, son recargados dentro de la cadena de montañas volcánicas, ubicada a aproximadamente 15 km al noreste de Tambogrande. La cadena de montañas está ubicada completamente dentro de la Cuenca del río Piura superior (aguas arriba de Tambogrande). Existen un par de afloramientos volcánicos aislados y pequeños dentro del área del proyecto, que permiten una limitada recarga potencial de las unidades superficiales y de lecho de roca poco profundo. El índice de infiltración del lecho de roca dentro del área de captación del río Piura es difícil de estimar, debido a la compleja geología y topografía. No obstante, el índice usual sería de aproximadamente 5 a 10 % de la mediana de precipitación anual.

El estimado de la recarga del acuífero dentro de las áreas bajas es aún más difícil debido a las operaciones de bombeo de agua subterránea y las prácticas de irrigación. Los acuíferos superficiales, recubrimiento, ubicados dentro de las áreas bajas de la Cuenca del río Piura, son recargadas a través de los siguientes mecanismos:

- Precipitación (infiltración directa de precipitación en suelos superficiales impermeables),
- Filtración de los ríos (pérdida de agua de superficie hacia los acuíferos – es decir, corrientes que se pierden),
- Pérdida de transferencia de agua de irrigación,

- Infiltración de agua de irrigación de las fuentes de agua superficial y subterránea, y
- Descarga de infiltración de la base rocosa hacia los acuíferos superficiales.

Se espera que la recarga del acuífero debido a la precipitación únicamente dentro de las áreas de arenas eólicas sea alta durante los años con fenómeno de El Niño, debido al bajo relieve topográfico y a la granulometría de los depósitos de superficie. No obstante, durante un año normal, se espera que la mayor parte de la infiltración dentro de las áreas desérticas se evapore antes de filtrarse a los reservorios de agua subterránea.

Los depósitos de agua superficial restantes dentro de la cuenca inferior comprenden depósitos aluviales terciarios al lado de la cadena montañosa y depósitos fluviales recientes relacionados con los canales de drenaje (principalmente el río Piura). Se espera que los índices de recarga debido a la precipitación dentro de estos depósitos, sean similares a los de las arenas eólicas. Se espera también que la evapotranspiración sea mayor en el valle del río Piura, debido a la alta napa freática y a las tierras de cultivo irrigadas. Otros datos sobre el agua subterránea comprenden las pérdidas de transferencia de agua de irrigación y el flujo de retorno del agua de superficie e irrigación hacia el agua subterránea. Estos datos son importantes durante las temporadas normales y secas, pero insignificantes durante los años de El Niño. Se espera que la recarga del acuífero debido a la infiltración del agua de escorrentía de los ríos sea alta durante los periodos de lluvia en años normales. También se espera que la recarga de los acuíferos de lecho de roca profundo sea alta, debido a los altos índices de infiltración durante los años normales.

Existen varios pozos de agua subterránea en el valle del río Bajo Piura, que tienen un efecto importante en los sistemas de flujo regionales dentro de la cuenca inferior. La ciudad de Piura emplea grandes volúmenes de agua subterránea para usos domésticos

y agrícolas. En los últimos años, se ha extraído más agua subterránea que la recargada al sistema de los acuíferos, tal como se demuestra en el área de Piura, donde el nivel de agua en algunos pozos ha disminuido hasta 30 m en un periodo de 10 años entre 1984 a 1994 (INGEMMET, 1994). En los alrededores del pozo de agua de la Universidad de Piura, se afirma que la superficie piezométrica estaría inclusive por debajo del nivel del mar (Chavez, 1999). El agua subterránea contenida en los acuíferos superficiales que se ubican cerca de la ciudad de Piura es salina, similar a la de los acuíferos superficiales en el área de Tambogrande. El agua subterránea se extrae también de acuíferos aluviales confinados más profundos, relacionados principalmente con la Formación Zapayal (Terciaria).

2.5.3 Recursos de agua subterránea cerca de Tambogrande

La relación entre los usuarios de agua subterránea y usuarios de agua superficial en el área inmediata a Tambogrande es muy baja, debido a la existencia de una amplia red de canales de irrigación. Sin embargo, los recursos de agua subterránea se concentran en áreas en las que no existen canales de irrigación. Los recursos de agua subterránea en el área de Tambogrande, usados para suministrar agua para fines de consumo humano, ganado e irrigación a pequeña escala, provienen principalmente de pozos excavados manualmente, de poca profundidad y perforaciones hechas tanto en depósitos aluviales recientes como antiguos. Se informa que la producción anual de agua subterránea de los pozos en el área de Tambogrande sería de aproximadamente 450,000 m³ o aproximadamente 15 L/seg (Ministerio de Agricultura, 2001). La mayoría de esta agua subterránea se extrae de acuíferos aluviales antiguos relacionados con la Formación Tambogrande, que con frecuencia es de naturaleza salobre a salina. El basamento rocoso en el área es relativamente impermeable comparado con los acuíferos superficiales en el área y el agua subterránea relacionada con este es con frecuencia salina. No se han reportado casos de pozos en el área que lleguen hasta el basamento rocoso.

3. INVESTIGACIONES DE CAMPO

Las investigaciones de campo para el depósito de relaves, el botadero de roca estéril, la derivación de la Quebrada Carneros y el dique de deflexión del río Piura se realizaron en dos etapas. En abril del 2000, se hizo un estudio con radar de tierra y sondeo hidráulico en un taladro de exploración. En enero y febrero del 2001, se realizó un estudio geofísico sísmico y de perforación en un taladro de exploración. Los resultados de estos estudios se incluyen en el Anexo I. A continuación se resume la información más importante.

3.1 Investigaciones anteriores

En 2000, Klohn Crippen realizó investigaciones de la zona para el Proyecto Tambogrande como parte del Estudio de Selección de la Zona para la ubicación del Botadero de Roca Estéril y el Depósito de Relaves (Klohn Crippen, 2000).

Se excavaron un total de 15 calicatas y 11 taladros alrededor del área del proyecto. El Anexo I incluye los registros de los taladros de perforación y de las calicatas. Se realizaron pruebas de carga descendente en las calicatas, con muestras de materiales recuperados cerca de la superficie, mediante pruebas de laboratorio. Las pruebas de carga descendente se realizaron en 7 de los taladros y se extrajeron muestras SPT para las pruebas de laboratorio.

Se trazaron líneas del Radar en Tierra (GPR) en dos zonas en abril del 2000. El trabajo estuvo a cargo de la empresa Geofísica Aplicada. Sin embargo, al parecer el GPR no pudo distinguir la geología de la zona.

3.2 Mapeo de geología

Se realizaron mapeos geológicos superficiales y reconocimientos de campo entre el 9 y 12 de enero del 2001 en el área del dique de embalse propuesto y dentro del área del depósito de relaves para confirmar que la ubicación del pozo de exploración y los

taladros, la accesibilidad y las condiciones del terreno era la apropiada. Se excavaron calicatas de poca profundidad (a aproximadamente 0.6 m) a mano, a intervalos de 50 m a lo largo de la extensión de las alineaciones de dique propuestas, y la geología superficial fue registrada. Las observaciones del mapeo geológico y del reconocimiento de campo se usaron para elaborar un plano de geología superficial y secciones geotécnicas para la zona. La Figura 3.1 (Plano D-33004) y los Planos D-33004 y D-33004 muestran las condiciones geotécnicas para las presas.

3.3 Perforación y Pruebas in situ

3.3.1 Generalidades

El programa de investigación en la zona para los diques de contención de relaves y los botaderos de roca estéril comprendieron 7 perforaciones, 23 calicatas, y 2 excavaciones de registro con auger en las zonas indicadas en la Figura 1.2. Los detalles de las calicatas y los orificios de perforación se incluyen en el Anexo I. La perforación en el 2000 se realizó usando un equipo de sondeo hidráulico portátil, y la perforación en el 2001 se realizó con un equipo de perforación CS-1000 que usa registro con barrenos. El objetivo del programa de perforación fue definir la profundidad y propiedades de los suelos sueltos por encima de los más antiguos, y de los más densos en, la Formación Tambogrande.

Figura 3.1 Sección Geotécnica Longitudinal - Presa Oeste

3.3.2 Prueba SPT

Las pruebas SPT se realizaron a intervalos de 1.5 m dentro de cada taladro de perforación. Las SPT se realizaron a 600 mm en comparación con las convencionales que se realizan a 450 mm con el fin de permitir la maximización de la recuperación de los materiales más sueltos suaves.

La información de SPT de todos los orificios de perforación se convirtió a valores $(N_1)_{60}$, normalizando los golpes por 0.3 m a una carga de 100 kPa, usando los métodos detallados en el procedimiento NCEER (NCEER, 1998). Se asumió que la potencia del martillo sería de 60% que es el extremo inferior del rango más probable de valores para el tipo de martillo de caída libre utilizado. Los resultados de las pruebas SPT para todos los orificios de perforación se incluyen en la Figura 3.2.

El análisis de licuefacción realizado se trata posteriormente, en la Sección 6.6 de este informe.

Cuando se aplicaron distribuciones del tamaño de partículas en las muestras de SPT, se corrigió el contenido de finos. Se usaron los valores $(N_1)_{60-cs}$ para evaluar el potencial de licuefacción de los materiales de los cimientos.

Figura 3.2 Valor SPT (N_1)₆₀ Vs Altitud

3.3.3 Instalación de los piezómetros

Se instalaron piezómetros verticales de tubos en los taladros DH-01-07 y DH-01-08, usando hasta tres piezómetros dentro de cada uno de ellos. En general, las tuberías verticales comprendieron tuberías de PVC de 25 mm de diámetro con una sección cribada de 1.5 m. Se colocó un filtro, que comprendía arena aluvial nivelada gradada localmente, con un tamaño de grano normal entre 1 mm y 5 mm, alrededor de la sección de cribado. Se colocó un sello de bentonita (de una longitud mínima de 1 m) por encima de la arena, para minimizar la influencia de la migración vertical del agua dentro del taladro. El anillo fue llenado con arena gradada y grava entre las secciones analizadas, con sellos de bentonita colocados aproximadamente cada 5 m. Los detalles de la instalación se presentan en los registros de los taladros en el Anexo I.

3.3.4 Observaciones del nivel de agua en los piezómetros

Se midieron los niveles de agua subterránea varias veces en cada uno de los pozos de monitoreo usando un medidor eléctrico del nivel de agua. Los resultados de las observaciones del nivel de agua se presentan en el Anexo I.

3.3.5 Pruebas de conductividad hidráulica

Se realizaron pruebas de conductividad hidráulica que usan tanto los métodos de carga descendente como ascendente dentro de los piezómetros de la tubería vertical. Los resultados de las pruebas de conductividad hidráulica se presentan en el Anexo I.

Se realizaron un total de 66 pruebas de permeabilidad en los pozos de prueba auger manual de poca profundidad en zonas de pozos de exploración seleccionadas, usando un permeámetro de Guelph.

3.3.6 Calicatas

Los objetivos de las calicatas fueron caracterizar los materiales de superficie y determinar su conveniencia tanto para cimientos como para fuentes de préstamo potenciales. Se recolectaron muestras para la clasificación de laboratorio.

3.3.6.1 Prueba de resistencia al corte no drenada

Se realizó la prueba de resistencia al corte no drenada en las calicatas usando una veleta de corte y una prueba de resistencia no confinada ($S_u \times 2$) usando un penetrómetro de bolsillo. Los resultados de las pruebas se resumen en la Tabla 3.1. Se observa que los suelos de baja resistencia corresponden a las arcillas y limos de las riberas del río.

Tabla 3.1 Pruebas de resistencia compresiva no confinada y prueba al corte in situ en Calicatas

POZO DE EXPLOR	UBICACION	PROF. (m)	TIPO DE SUELO	RESISTENCIA AL CORTE (kPa)		RESISTENCIA A LA COMPRESION CONFINADA (kg/cm ²)
				PICO	RESIDUAL	
TP-01-18	Area de relaves norte (Canal de drenaje este)	1.0	Arcilla limosa firme.	17.5	9.0	0.25
		2.0	Limo suave, con algo de arcilla.	9.0	6.0	0.0
TP-01-21	Area de relaves norte (Canal de drenaje oeste)	1.0	Arena limosa y arena fina firmes.	26.0	9.0	0.9
TP-01-22	Area de relaves norte (lado occidental)	5.0	Limo muy rígido a duro de la Formación Tambogrande.	No falla por corte	-	2.7
TP-01-23	Area de relaves norte (lado occidental)	4.7	Limo muy rígido a duro de la Formación Tambogrande.	No falla por corte	-	3.0
TP-01-24	Area de relaves norte (Canal de drenaje occidental)	1.0	Limo rígido con algo de arcilla.	23.0	10.0	1.5
		2.0	Limo suave a firme.	13.0	7.0	0.3
TP-01-30	Area de relaves norte – lado oriental de potencial préstamo de arcilla	1.0	Arcilla muy rígida a dura, limo.	No falla por corte	-	3.5
		5.0	Arcilla muy rígida a dura, limo.	No falla por corte	-	2.8

3.3.7 Investigación geofísica

Se trazó una línea sísmica a lo largo del trazo propuesto para el dique occidental del depósito de relaves el 17 de enero del 2001, trabajo que estuvo a cargo de Geoline S.A. El estudio se realizó con el fin de determinar la estratigrafía por debajo del trazo del dique propuesto, incluyendo la profundidad del basamento rocoso. Se identificaron tres capas distintas tal como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Capas inferidas del perfil sísmico

UNI.	DESCRIPCION	ESPESOR MÁXIMO (m)	VELOCIDAD TÍPICA (m/s)
Valle de la zanja – TG-7			
1	Material aluvial no saturado	4 – 5	300
2	Material aluvial saturado	10 – 22	1550
3	Basamento rocoso intemperizado y/o capa de material triturado dentro de la secuencia aluvial (Formación Tambogrande)	-	2865

4. PRUEBAS DE LABORATORIO

Se realizaron pruebas de laboratorio en las muestras seleccionadas de materiales naturales y relaves. Las pruebas geotécnicas se realizaron en las muestras de relaves y en las rocas de desmonte.

4.1 Suelos naturales

Las pruebas de laboratorio se realizaron en las muestras seleccionadas de materiales naturales a partir de los barrenos y calicatas en el área de relaves. Las pruebas realizadas comprendieron:

- Distribución del tamaño de partículas;
- Límites de Atterberg; y
- Contenido de humedad.

4.1.1 Distribución del tamaño de partículas y plasticidad

La Tabla 4.1 presenta un resumen de la distribución del tamaño de partículas y de la plasticidad de los suelos.

Tabla 4.1 Resultados de la distribución del tamaño de partículas y de plasticidad

BARRENO NO.	PROF. (m)	TAMAÑO DE GRANO			USCS	Gs	Hum (%)	LIMITES ATTERBERG		
		%GRAVA	% ARENA	% FINOS				LL (%)	PL (%)	IP (%)
Cerca de 01-TP-22	Superficie	25.4	52.7	21.9		2.71	-	-	-	-
Cerca de 01-TP-19	Afloram.	0	44.1	55.9	CL	2.7	-	37	18	19
Cerca de 01-TP-30	2-5.4	0	30.2	69.8	CL	2.71	-	39	20	19
01-TP-08	2.5	5.2	65.4	29.4		-	9.05	-	-	-
01-TP-08	4	7.7	75.5	16.8		-	9.77	-	-	-
01-TP-09	2	0	60.6	39.4		-	3.89	-	-	-
01-TP-09	4	0	33.6	66.5	CL	2.74	17.69	38	24	14
01-TP-11	4.4	0	11.2	88.8	CL	2.67	13.7	41	25	16
01-TP-13 (compósito)	2 a 6	15.6	68.2	16.2		-	3.48	-	-	-
01-TP-14 (compósito)	1.5ta 6.3	19.7	72.8	7.5		2.75	3.74	-	-	-
01-TP-15	4	11.3	81.4	7.3		-	5.79	-	-	-
01-TP-17	5.7	0.3	23.5	76.2	CL	2.72	13.42	43	22	21
01-TP-17	8.5	0	39.7	60.3	CL	2.7	13.01	33	21	12
01-TP-18	2.5	0	45.4	54.6	CL-ML	-	22.25	24	18	6
01-TP-19	0.5	23.1	37.7	39.2		-	4.95	-	-	-
01-TP-20	2	9	78.5	12.5		-	2.18	-	-	-
01-TP-21	1.2	0	13.1	86.9		-	10.71	-	-	-

4.1.2 Compactación Proctor estándar

Los resultados de las pruebas de compactación Proctor estándar realizadas en las muestras de los suelos gravosos y cerca de la superficie extraídas de las calicatas se resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Resultados de la prueba de compactación Proctor estándar

UBICACION	PROFUN. (m)	CONTENIDO OPTIMO DE HUMEDAD %	DENSIDAD SECA PROCTOR MÁXIMA t/m ³	CONTENIDO DE HUMEDAD MAXIMO %
Cerca a 01-TP-22	Superficie	11.5	1.93	N/E
01-TP-13 (compósito)	2.0 – 6.0	11.8	1.95	3.5

Nota: N/E – No ensayado.

4.2 Relaves

Se realizaron pruebas de laboratorio en las muestras proporcionadas de relaves de óxidos y de sulfuros. Las pruebas realizadas comprendieron:

- Distribución del tamaño de partículas– 4 muestras;
- Pruebas de asentamiento– 2 muestras;
- Pruebas de consolidación – 2 muestras; y
- Prueba de celda de Tempe– 2 muestras.

Las pruebas geoquímicas fueron realizadas por terceros (Lorax, 2001) y se incluye esta información como referencia.

4.2.1 Distribución del tamaño de las partículas y gravedad específica

Las pruebas de distribución del tamaño de partículas se realizaron en cuatro muestras de relaves:

- Muestra de relaves de óxido GS2-7 / SD1-3;
- Muestra de relaves de sulfuros KM1114 SU1/SU2;
- TC-A; y
- TC-B.

Tabla 4.3 Resumen de la distribución del tamaño de partículas y gravedad específica de las muestras de relaves

MUESTRA DE RELAVES	% PASANTE 75 μm	% PASANTE 2 μm	GRAVEDAD ESPECIFICA
TC-A	91.7	1.5	4.88
TC-B	90.9	1.3	4.91
Relaves de sulfuros	98.5	3.3	4.86
Relaves de óxidos	98.0	12.3	4.32

Estos resultados indican que los relaves tienen principalmente limo, con menos de 10% de arena y usualmente menos de 5% de arcilla.

4.2.2 Pruebas de consolidación

Se realizaron dos pruebas con odómetro en las muestras de relaves de sulfuros y óxidos. Los resultados se presentan en la Tabla 4.4. Se usó hasta 600 kPa de presión para simular una profundidad de los relaves de 20 m a 25 m.

Tabla 4.4 Resumen de las pruebas con odómetro en las muestras de relaves

PARÁMETRO	RELAVE DE SULFUROS KM1114, SU1/SU2	MUESTRA COMPOSITA DE OXIDO GS2-7 & GD1-3
Coefficiente de consolidación, Cc	0.075	0.088
Índice de hinchamiento, Cs	0.002	0.0025
Relación inicial de vacíos	0.901	0.858
Relación de vacíos al término de la prueba	0.711	0.596

4.2.3 Pruebas de sedimentación de relaves

Se realizaron pruebas de sedimentación en dos muestras de relaves tal como se indica en la Tabla 4.5. Los relaves fueron mezclados a la densidad de sólidos especificada y colocados en una probeta de 1 L. A medida que los relaves se sedimentaban, el volumen que ocuparon fue medido en la escala graduada de la probeta. La densidad seca versus el tiempo puede ser determinada por la masa inicial de los relaves sólidos, dividida entre el volumen que ocupan los relaves en la probeta. El tiempo requerido para terminar la sedimentación es el que transcurre hasta que los relaves no muestren sedimentación que pueda ser medida. Los resultados de esta prueba indican la densidad inicial de los relaves asentados, antes de que ocurra cualquier consolidación.

Tabla 4.5 Resultados de la prueba de sedimentación– Muestras de relaves

MUESTRA	CONTENIDO INICIAL DE SÓLIDOS (% w/w)	DENSIDAD SECA FINAL (t/m ³)	TIEMPO PARA CULMINAR LA SEDIMENTACION (horas)
Muestra compósita de óxidos GS2-7 & GD1-3	30	1.65	8.25
Relave de sulfuros KM1114, SU1/SU2	30	2.03	0.5

4.2.4 Prueba de celda de Tempe

Se aplicó la prueba de celda de Tempe en una muestra compósita de relaves de óxidos y en una muestra compósita de relaves de sulfuros. La Tabla 4.6 presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 4.6 Resultados de la prueba de celda de Tempe– Muestras de relaves

MUESTRA	CONTENIDO DE AGUA DE EQUILIBRIO POR VOL. (%)	VALOR DE ENTRADA DE AIRE (SUCCION kPa)	CONTENIDO DE AGUA RESIDUAL POR VOL. (SUCCION EN RESIDUAL kPa)
Compósito de relaves óxidos GS2-7 & GD1-3	36	> 140	No medido
Relaves de sulfuros KM1114, SU1/SU2	36	40	8.1 % (120)

4.2.5 Pruebas geoquímicas

Se realizaron tanto pruebas estáticas (balance de ácido base) como cinéticas (celdas húmedas y pilas de lixiviación en campo) en dos muestras compósitas de relaves que fueron preparadas para representar la cantidad relativa de material que será procesado de las tres unidades de sulfuros SU1 (25%), SU2 (60%) y SU3 (15%). El contenido de pirita en estas muestras de mineral varió entre 81.3 y 95.4%

Se encontró que las muestras de relaves de sulfuros eran altamente generadoras de ácido y no tenían potencial de neutralización. Estas muestras tienen una relación de potencial de neutralización (NPR) de 0. A pesar de que la oxidación de los relaves de sulfuros se retrasará al inicio debido a la presencia de agua de solución con un elevado valor de pH, los relaves tienen el potencial para producir drenaje ácido cuando se colocan en un ambiente de oxidación. La prueba de celda húmeda indicó una liberación del lixiviado ácido cuyo pH varía entre 2.1 y 3 y se observó una liberación significativa de As, Zn, Cd, Cu y Ni. La liberación de sulfatos excedió la de las muestras de roca estéril debido a la mayor superficie expuesta de las partículas de relaves. Los resultados de las pruebas geoquímicas en relaves de sulfuros se resumen en la Tabla 4.7 y 4.8.

No se aplicó la prueba geoquímica a los relaves de óxidos porque se espera que no sean generadores de ácido, debido a la relativa ausencia de sulfuros, según se determinó mediante la prueba geoquímica de la roca estéril.

Tabla 4.7 Resumen de los resultados de las pruebas estáticas para los relaves de sulfuros

MUESTRA	pH DE LA PASTA	AZUFRE TOTAL (%S)	SULFURO AZUFRE (%S)	% CO ₂	TAP ¹	NP ²	NPR ³
Relaves A	2.7	50.9	49.0	0.1	1591	-11	0
Relaves B	2.6	50.4	48.5	0.1	1575	-13	0

¹ Total de potencial ácido.

² Potencial de Neutralización.

³ Relación potencial de Neutralización.

Tabla 4.8 Resumen de los resultados de las pruebas cinéticas para relaves de sulfuros

MUESTRA	pH	SULFURO AZUFRE (%S)	INDICE DE LIXIVIADO DE MASA (mg/kg/wk)						
			SULFATO	ALCALINIDAD	As	Cd	Cu	Ni	Zn
Relaves A	2.1	49.0	2,986	0	0.17	0.032	21.6	0.19	4.3
Relaves B	2.2	48.5	2,460	0	0.094	0.090	46.3	0.21	15.3

4.3 Calidad del agua de proceso

Se realizaron análisis de agua en ciclo cerrado en las muestras de soluciones sobrenadantes de los relaves tanto de óxidos como de sulfuros (Lakefield 2000). Los resultados de las pruebas se resumen en la Tabla 4.9 y 4.10. La Tabla 4.9 contiene los análisis del agua de relave de óxidos luego de la destrucción del cianuro.

Tabla 4.9 Análisis del agua de solución tratada, del procesamiento de óxidos

Elemento	CND-1D GSSN-B mg/L	CND-2D SDBA-B mg/L	Elemento	CND-1D GSSN-B mg/L	CND-2D SDBA-B mg/L
Aluminio, Al	0.060	0.050	Magnesio, Mg	0.89	0.91
Alcalinidad como CaCO ₃	195	203	Manganeso, Mn	0.042	0.044
Antimonio, Sb	<0.050	<0.050	Mercurio, Hg	<0.001	0.14
Arsénico, As	<0.010	<0.010	Molibdeno, Mo	0.020	0.026
Bario, Ba	0.090	0.090	NH ₃ +NH ₄ (N)	27.4	31.00
Berilio, Be	0.026	0.040	Níquel, Ni	0.060	0.060
Boro, B	<0.001	<0.001	NO ₂ as N	<0.060	0.77
Bromuro, Br	<0.30	<0.30	NO ₃ as N	1.94	1.80
Cadmio, Cd	<0.005	<0.005	PH	8.23	8.26
Calcio, Ca	511	551	Fósforo, P	0.16	0.18
Cloruro, Cl	33.9	30.7	Potasio, K	8.60	9.91
Cromio, Cr	<0.020	<0.020	Selenio, Se	0.27	0.29
CNS			Plata, Ag	0.38	0.50
CN _T	0.33	0.73	Sulfato, SO ₄	2340	2410
CN _{WAD}	0.23	0.59	Sodio, Na	581	614
Cobalto, Co	0.069	0.12	Telurio, Te	<0.10	<0.10
Cobre, Cu	1.63	2.12	Tiosales	<10.0	<10.0
Fluor, F	0.48	5.00	Estaño, Sn	<0.10	<0.10
Oro, Au	3.24	3.24	Sólidos en suspensión, TSS	6	5
Fierro, Fe	<0.020	<0.020	Zinc, Zn	0.058	0.074
Plomo, Pb	<0.020	<0.020			

Tabla 4.10 Análisis de agua en ciclo cerrado – Proceso de sulfuros

Elemento	Muestra			
	ID-24 (SU-1) (ppm)	3B-10 (SU-3) (ppm)	2C-5 (SU-2) (ppm)	2C-6 (SU-2) (ppm)
pH	11.6	6.3	11.5	11.4
Sulfuro S	<1	<1	<1	<1
Sulfato SO4	117	433	260	332
Mercurio Hg	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Plata Ag	0.005	<0.003	<0.030	<0.005
Aluminio Al	0.31	0.34	0.42	0.11
Arsénico As	0.017	0.019	<0.0001	0.001
Boro B	0.06	0.033	0.03	0.02
Bario Ba	1.55	0.043	0.16	0.11
Berilio Be	0.001	<0.001	<0.0010	<0.001
Calcio Ca	103	217	203	226
Cadmio Cd	0.005	<0.005	<0.0050	0.005
Cromo Cr	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020
Cobre Cu	0.35	0.077	<0.0050	0.005
Fierro Fe	1.56	2.1	<0.020	<0.020
Potasio K	4.1	4.07	5.7	5.43
Magnesio Mg	0.45	2.39	0.08	0.99
Manganeso Mn	0.004	0.062	<0.0020	0.003
Molibdeno Mo	0.1	<0.020	0.11	0.036
Sodio Na	71.2	19.6	47.7	34.6
Níquel Ni	<0.010	<0.010	<0.020	<0.020
Fósforo Total	<0.10	<0.10	<0.30	0.33
Plomo Pb	0.033	<0.002	0.003	<0.006
Antimonio Sb	0.032	0.005	0.007	0.007
Selenio Se	0.15	0.015	0.025	0.015
Sulfuro S _T	63	216	176	206
Silicio Si	0.26	0.05	1.74	1.64
Estaño Sn	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Estroncio Sr	0.11	0.14	0.15	0.16
Telurio Te	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Zinc Zn	0.07	0.027	<0.010	0.018
Bismuto Bi	<0.02	<0.02	0.02	<0.02
Cobalto Co	<0.004	<0.004	0.004	<0.004

4.4 Roca Estéril

4.4.1 Pruebas geoquímicas

Se realizó la caracterización geoquímica de los potenciales materiales de roca estéril del depósito TG-1, con el fin de clasificar las unidades con respecto a su potencial de

generación ácida y lixiviación de metales. Se usaron los resultados para clasificar a la roca estéril como potencialmente generadora de ácido (PGA) o no generadora de ácido (NGA). Se ha usado los resultados del programa para recomendar un método que permita identificar de manera expeditiva la roca PGA durante la operación. Los detalles adicionales del programa de pruebas se incluyen en el informe de Lorax (2001).

Pruebas estáticas

Además de las muestras usadas para pruebas cinéticas, se realizaron pruebas estáticas en muestras de todos los tipos de roca estéril y de sobrecarga. Las pruebas estáticas comprendieron 227 análisis de balance de ácido base, 97 análisis de metales de fase sólida y 26 pruebas de pruebas de agitación (para óxidos).

Balance de ácido base

Los datos de balance de ácido base (ABA) indican una tendencia general de aumento del contenido de sulfuro-azufre y del potencial de ácido (AP) con la progresión de composición de las muestras de máfica a riolítica. Ello refleja en parte, la naturaleza de la formación y ubicación relativa de cada unidad de roca en el depósito. El potencial de neutralización (NP) fue generalmente más bajo en las muestras con alto contenido de sulfuro-azufre, y se midió un valor insignificante de NP en las muestras de sulfuros masivos.

Debido a su bajo contenido de sulfuro-azufre, se encontró que los materiales del dique, basalto y la sobrecarga presentan en general, un riesgo menor de generación de ácidos en TG-1. Los óxidos (excepto SDBA), los materiales saprolíticos e hidrotérmicamente alterados, son relativamente inertes y pueden ser considerados, en general como no generadores de ácido (NGA). En general, otros tipos de roca se pueden considerar como inciertos con respecto a su potencial de DAR o de generación de ácidos (PGA). Obsérvese sin embargo, que existe una gran variabilidad en la información, de manera que se presenta un aparente grado de

superposición entre los parámetros de ABA para las unidades principales. Por ejemplo, no se consideró un subconjunto de muestras de dacitas como potencialmente generadoras de ácido. Las muestras de sulfuros masivos (e.g. SU0) presentan consistentemente un alto riesgo de generación de ácido en la exposición a las condiciones de oxidación, debido a su alto contenido de sulfuro-azufre y la virtual ausencia de minerales neutralizantes.

A valores de azufre total mayores de 0.2%, la información disponible indica que las concentraciones totales de azufre y sulfuro-azufre pueden en general ser usadas indistintamente con poco margen de error, con excepción de los materiales oxidados. De esta manera, las medidas del contenido de azufre total pueden proporcionar medios directos y eficientes en términos de costo, para estimar el potencial ácido y para confirmar los criterios de separación de roca estéril como NGA o PGA

La Tabla 4.9 presenta un resumen de los resultados de las pruebas de ABA para cada una de las muestras usadas en las celdas húmedas y los valores medios para cada uno de los tipos de roca de las 227 muestras que fueron sometidas a las pruebas ABA.

Tabla 4.11 Resumen de los resultados de pruebas estáticas para la roca estéril

MUESTRA		PH DE LAPASTA PH	%S (TOTAL)	% S (SULFURO)	% CO ₂	PTA ¹	PN ²	RPN ³
Máfico	BABX 1	8.5	0.86	0.79	0.2	27	10	0.41
	BABX 2	9.0	0.10	0.10	0.1	3	14	4.48
	Mediana	8.1	0.14	0.10	0.8	4	13	4.16
Dacita	DABX	7.7	1.09	0.9	0.1	34	3	4.16
	DACT 1	8.6	2.83	2.80	0.2	88	9	0.10
	DACT 2	7.9	1.60	1.60	0.2	50	7	0.14
	Mediana	7.8	0.62	0.78	0.3	19	6	0.34
Stockwork	STK	6.8	10.2	10.2	0.1	319	5	0.02
	Mediana	5.7	7.29	10.2	0.1	0	4	0.01
Sulfuro masivo	SUO	2.9	55.2	55.0	0.1	1725	-5	--
	Mediana	2.4	52.1	51.1	0.1	1627	-21	--
Oxido	OXIDO	6.8	0.46	0.09	0.2	14	5	0.71
	Mediana	6.4	0.08	0.06	0.1	2	0	--

¹ Potencial total de ácido.

² Potencial de neutralización.

³ Relación potencial de neutralización.

Prueba de solubilidad de la roca estéril de los óxidos

Las pruebas de agitación en frasco (un total de 27, incluyendo la muestra de celda húmeda de óxido) se realizaron para evaluar la potencial liberación de contaminante de la roca estéril de los óxidos. En general, fue evidente una relación negativa entre pH y Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn, con el Cu y el Zn mostrando en general las más altas concentraciones. Todas las concentraciones están por debajo de los valores recomendados para efluentes en Canadá. Las concentraciones de arsénico lixiviado fueron bajas (por debajo del nivel de detección en la muestra de la celda húmeda). La Tabla 4.12 presenta un resumen de los resultados de la prueba de agitación en frasco para los óxidos.

Tabla 4.12 Concentraciones medidas en los lixiviados mediante la prueba de agitación en frasco en muestras de óxido TG-1

ELEMENTO	(UNIT)	UNIDAD DE EXTRACCION DE OXIDO					UNIDAD DE EXTRACCION GOETHITA			
		MEDIANA	CELDA HÚMEDA (OXIDO)	RANGO			MEDIANA	RANGO		
pH	Unidades de pH	7.2	7.3	3.4	-	9.1	7.1	5.2	-	7.9
Conductividad	□mhos/cm	681	440	218	-	1440	629	231	-	1100
Alcalinidad	mg/l	17.5	29.0	0.5	-	84	9	1	-	44
Acidez	mg/l	3	2.0	2	-	32	2	2	-	7
Sulfato	mg/l	100	47.7	21	-	182	58	31.8	-	189
Ag	ug/l	0.025	0.025	0.03	-	0.25	0.025	0.03	-	0.05
Alcalinidad	mg/l	0.053	0.110	0	-	0.52	0.006	0	-	0.07
As	ug/l	4	0.5	0.5	-	6	1	0.5	-	6
Ba	ug/l	47.4	48.8	33.5	-	223	74.6	47.4	-	102.5
Ca	mg/l	45.1	38.3	12.6	-	128	32.3	16.4	-	79.5
Cd	ug/l	0.1	0.05	0.05	-	19.4	0.05	0.05	-	1.1
Conductividad	ug/l	0.8	0.16	0.08	-	31	0.16	0.06	-	4.28
Cr	ug/l	0.5	0.5	0.25	-	2.5	0.25	0.25	-	1
Cu	ug/l	22	21.8	10.3	-	564	16.8	5.5	-	86.9
Fe	mg/l	0.02	0.08	0.01	-	0.13	0.02	0.01	-	0.09
Hg	ug/l	0.5	0.5	0.5	-	5	0.5	0.5	-	0.5
K	mg/l	5.65	2.2	1.2	-	10.7	3.4	0.4	-	16
Mg	mg/l	7.6	6.2	3.09	-	28.3	7.36	3.26	-	27.1
Mn	ug/l	22.7	7.7	1.1	-	410	3.9	1.95	-	261
Mo	ug/l	2.1	1.2	0.05	-	31.5	0.5	0.05	-	12.4
Na	mg/l	62.2	32.6	20.4	-	150	76.4	18.9	-	96
Ni	ug/l	1.4	0.6	0.4	-	26.2	0.8	0.2	-	7
Pb	ug/l	2	2	1	-	74	2	1	-	36
Sb	ug/l	0.25	0.03	0.03	-	187	0.05	0.03	-	34
Se	ug/l	4	1	1	-	15	4	3	-	15
Sn	ug/l	0.25	0.25	0.25	-	2.5	0.25	0.25	-	0.25
Zn	ug/l	17.5	9.5	2	-	4,060	11.5	1.5	-	525
Conteo		15	1	15			11			

Los valores en negrita indican que el parámetro fue enriquecido por más de 2 veces en la mediana comparada con el óxido celda húmeda.

Pruebas cinéticas

La prueba de celda húmeda (CH) mide los índices de reacción en un periodo de varios meses. Se usaron los resultados de estas pruebas para cuantificar el potencial de generación de ácido y de liberación de metales para los diferentes tipos de roca estéril TG-1. La información CH no representa la calidad de agua de descarga esperada.

También se realizaron pruebas en pilas de lixiviación en campo, usando roca no triturada de los testigos de perforación. Estas pruebas se iniciaron para evaluar la química de la infiltración de una pila de roca estéril a una escala que se aproxime más a la de la operación minera en condiciones climáticas ambientales naturales.

El resumen de los resultados analíticos de las pruebas cinéticas se presentan en la Tabla 4.13. Las siguientes secciones presentan los resultados las pruebas de celdas húmeda y de la prueba de pilas de lixiviación, para cada una de las principales unidades de roca estéril.

Tabla 4.13 Resumen de los resultados de las pruebas cinéticas para roca estéril

MUESTRA		pH	SULFURO %S	SULFATO (mg/kg/wk)	ALCALINIDAD (mg/kg/wk)	As (mg/kg/wk)	Cd (mg/kg/wk)	Cu (mg/kg/wk)	Ni (mg/kg/wk)	Zn (mg/kg/wk)
Rocas Máfica	BABX 1	7.6	0.8	4.31	6.0	0.00022	0.00008	0.00421	0.00007	0.00579
	BABX 2	7.5	0.1	0.48	5.9	0.00024	0.00002	0.00209	0.00006	0.00611
Dacita	DABX	5.2	0.9	10.7	0.5	0.00024	0.00021	0.01388	0.00095	0.61019
	DACT 1	6.6	2.0	35.6	1.8	0.00024	0.00021	0.01081	0.00017	0.04358
	DACT 2	2.6	1.6	287	0	0.00117	0.01838	0.92929	0.00525	4.05262
Stockwork	STK	3.6	10.2	67.0	0	0.00475	0.00686	15.25744	0.00115	8.08503
Sulfuro masivo	SUO	2.2	55.0	510	0	0.33042	0.0094	0.43010	0.00114	0.34880
Oxido	OXIDE	7.3	0.1	2.9	3.5	0.00022	0.00004	0.00295	0.00004	0.00631

* Aún no se cuenta con los datos finales de la pruebas de celda húmeda.

Sulfuros masivos (SU0)

- La muestra SU0 presenta el pH de lixiviado más ácido de las muestras de celda húmeda de la roca estéril, y se estabilizó a un pH 2.2 en las semanas finales de la prueba, debido a la virtual ausencia de minerales de amortiguamiento a los valores más altos.
- La liberación de sulfatos aumentó una vez que el pH del lixiviado disminuyó por debajo de 3.5, que es una región del pH en la que el hierro ferroso es estable en solución y puede oxidar la pirita a tasas considerablemente más rápidas que sólo con oxígeno.
- Se observó una importante liberación de arsénico (0.330 mg/kg/ciclo), que corresponde a un pH del lixiviado <2.5 y a un enriquecimiento de arsénico en la fase de sólidos.
- Se liberó cadmio y zinc a velocidades menores que las esperadas de las celdas húmedas en el nivel de pH ácido. Sin embargo, las concentraciones de zinc en el drenaje de campo no mitigado, inicialmente excederán 10 mg/L, como se observó en el lixiviado de las pilas de lixiviación en campo.
- Se espera que la liberación de Ni sea de baja a moderada (control de pH) debido a las concentraciones agotadas en la fase sólida.
- Las altas tasas de liberación de cobre observadas en las celdas húmedas indican que el cobre estaba siendo lixiviado preferentemente apoyado por las relaciones de Cu/SO₄ en el lixiviado y el agotamiento del 73% del Cu en la fase sólida. De esta manera, se esperaría que las concentraciones de cobre disminuyan con el tiempo, a medida que la calcopirita se oxide y se agote preferentemente en la fase sólida.

Dacita (DABX, DACT1, DACT2)

- El pH del lixiviado de las muestras de dacita de la celda húmeda varió en un rango mayor de pH (7.9 a pH 2.5) que en las muestras máficas.
- El ABA y las pruebas mineralógicas indicaron que tanto la calcita como la siderita pueden presentarse en la unidad de dacita. Cuando estuvo presente, la calcita proporcionó suficiente capacidad de amortiguamiento como para neutralizar la acidez. Las muestras que contienen siderita fueron amortiguadas cerca de pH = 5.
- Los índices de producción de sulfato indicaron que el índice de oxidación del sulfuro aumentó por un orden de magnitud, luego de la

disolución de los minerales carbonados disponibles y que el pH bajó a menos de 3.5 en la muestra DACT2.

- La muestra DACT1 produjo un lixiviado con un pH ligeramente menor de 7.0 y cantidades bajas de alcalinidad en exceso. Como resultado, DACT1 neutraliza la acidez eficientemente, como lo indica la relación molar de carbonato de 1.
- La prueba de celda húmeda sugirió que el arsénico no debe ser un problema en la unidad de dacita. No obstante, las concentraciones de arsénico en la pila de lixiviación de campo aumentaron durante las pruebas y excedieron 0.1 mg/L; se registró una lectura máxima de 0.161 mg/L.
- La carga de lixiviado de la celda húmeda indicó que se pueden esperar mayores concentraciones de cadmio, cobre y zinc de la unidad de Dacita, cuando las condiciones produzcan un pH <7.0 en el drenaje. Este supuesto es corroborado por el lixiviado de la pila en campo que contenía una concentración máxima de cadmio de 0.4 mg/L a un pH 4.6, de una concentración de cobre >1.0 mg/L a un pH de 4.5, y una concentración máxima de zinc de 22.9 mg/L a un pH de 4.6.
- Las pruebas de celda húmeda indicaron que la liberación de níquel sólo sería una preocupación para los materiales evaluados, sólo bajo condiciones extremas de acidez.

Rocas Máficas (BABX1, BABX2)

- Las muestras máficas sometidas a las pruebas de celda húmeda contuvieron carbonato reactivo NP que es capaz de mantener soluciones de drenaje con un pH neutro.
- Las muestras máficas presentaron las tasas de oxidación más bajas que las muestras de celdas con contenido de sulfuros. Las tasas de oxidación bajas no pueden ser únicamente atribuidas al contenido inicial de sulfuro. De esta manera, la forma euhedral de la pirita observada en las muestras máficas puede ser menos reactiva que la pirita contenida en las otras unidades de minado.
- Se observó que las tasas de liberación de arsénico, cadmio, níquel y zinc en las celdas húmedas eran bajas a un pH neutro. De manera similar, el cadmio y el zinc fueron liberados a concentraciones de casi 0.01 y 0.05 mg/L de la pila de lixiviación en campo. Sin embargo, el material de basalto no diferenciado en la pila de campo liberó concentraciones de arsénico de hasta 0.5 mg/L. Se requiere una mayor

evaluación del alcance de la liberación de arsénico a un pH neutro para este material.

- La liberación de cobre a pH neutro fue significativamente menor que la observada en las muestras de celdas con contenido de sulfuros. Las concentraciones de cobre en el lixiviado de la pila de campo excedieron 0.01 mg/L. La medición inicial fue 6.73 mg/L Cu, pero, la concentración de cobre disminuyó posteriormente en dos ordenes de magnitud.

Dacita con sockwork de sulfuros (STK)

- El pH de la muestra STK (DACT) disminuyó lentamente de un pH inicial de 5.3 a un valor final de pH 3.6 al término de la prueba. Los valores ligeramente altos de pH relacionados a otras muestras de agotamiento con carbonato, sugieren que la clorita podría ser el amortiguador del pH.
- No se liberó el arsénico en concentraciones muy altas. Sin embargo, un alto límite de detección relacionado con el lixiviado de celda húmeda de la muestra STK impidió obtener un resultado concluyente sobre la liberación de arsénico en esta muestra.
- Se observaron altas tasas de liberación de cobre en el caso de la muestra STK, que contenía calcopirita, (sulfuro de cobre). A pesar que la concentración de fase sólida de Cu en la muestra STK fue significativamente mayor que el valor mediano de Cu para la unidad a ser minada, se pueden esperar concentraciones altas de Cu en esta unidad, a un pH ácido.
- Se observó también la liberación de Cd y Zn en la celda húmeda de la muestra STK.

Oxidos

- La muestra de óxidos mantuvo un pH de lixiviado > 7.1 durante toda la prueba de celda húmeda. Ello refleja la presencia de PN medible en la muestra (PN = 5), que es mayor que el valor mediano para la unidad (PN = 0). Así, el pH del lixiviado de esta celda refleja el mejor escenario para el pH del drenaje de la unidad minable de óxidos.
- Se registró una tasa de producción de sulfato de 0.3 mg/kg/semana de la muestra de óxidos en los 5 ciclos finales, debido a los sulfuros

observables en la muestra, a pesar de que la prueba de ABA indicó la presencia de sólo 0.09% de sulfuros.

- El arsénico, cadmio y níquel estuvieron por debajo del límite de detección analítica en el lixiviado de la celda húmeda. Se estima por tanto, que estos metales podrían ser liberados en niveles muy bajos a un pH cercano al neutro.
- La muestra de la celda húmeda de óxido liberó de manera consistente tasas relativamente bajas de zinc, a lo largo de cinco semanas de pruebas.
- La liberación de Cu presentó una tendencia decreciente total a <0.004 mg/kg/ciclo durante los 5 ciclos finales. Las tasas observadas sugieren que bajo condiciones de drenaje neutras, la liberación de Cu de la unidad de óxidos será significativamente menor que el de las otras unidades minables, pero que estas concentraciones podrían exceder de 0.01 mg/L.
- Se realizó la prueba de lixiviación en pilas de campo en una muestra de óxido (Goethita). Este material representa < 1% de la roca estéril oxidada. El óxido no diferenciado en la pila de lixiviación de campo mantuvo el pH del lixiviado entre 6 y 7. Se observó concentraciones de arsénico mayores a 0.1 nbs mg/L en el drenaje de la pila de lixiviación de campo. La concentración de zinc en la pila de lixiviación en campo fue consistentemente > 0.1 mg/L.

Resumen de clasificación del Drenaje Acido de Roca (DAR)

Se han determinado pautas específicas para cada material. En la mayoría de los casos, una RPN mayor de 1 y hasta 2.1, dependiendo del material, o un contenido de azufre total menor a 0.1% indica material no generador de ácido. Debido a que las muestras representan las diferentes unidades geológicas en todo el depósito, el porcentaje de muestras designado como PGA para cada unidad difícilmente es igual al porcentaje de roca estéril potencialmente generadora de ácido presente que podría usarse para el tamaño de las instalaciones de almacenamiento de roca estéril y predecir la disponibilidad de los materiales de construcción. Antes del minado, se realizará un muestreo adicional para delimitar la distribución espacial *in situ de material* NGA y PGA a escala de operación, usando los métodos recomendados como resultado de la

prueba de ABA. De esta manera, los subconjuntos de materiales NGA de unidades potencialmente generadoras de ácido, podrían ser segregados como materiales de construcción seguros. Se espera que estos materiales NGA se encuentran a la mayor distancia del cuerpo mineralizado. La clasificación DAR de los principales tipos de roca (indicados en el programa de producción de desmonte) sería por tanto el siguiente:

- *Sulfuros* (39% de roca estéril): Contenido de azufre muy alto y potencial de neutralización insignificante. El 100% de esta unidad es generadora de ácido y puede producir drenaje ácido luego de la exposición a oxígeno y a precipitación;
- *Dacita* (27% de roca estéril): Varía significativamente en sus contenidos de azufre y valores de RPN y se espera que un 30 % de esta unidad no sea generadora de ácido (NGA). También se encontraron sedimentos de dacita y riodacitas al 30% NGA;
- *Máficas* (5% de roca estéril): Potencial relativamente bajo de generación de ácido (50 a 60% clasificado como NGA). Se requiere de un mayor estudio para asegurarse que la liberación de arsénico no esté relacionada con el material NGA.
- *Otras rocas* (5% de roca estéril): La *Riolita* tiene una RPN muy bajo. Se espera que la mayor parte de esta unidad sea baja en sulfuros y por lo tanto se aspira que tendrá un bajo potencial de generación de ácido. Se debe realizar la delineación de los sulfuros como azufre para este material, con el fin de identificar de manera precisa el material PGA y la disponibilidad del material de construcción. Los materiales del *Dique* son clasificados como de un bajo potencial de generación de ácido, pues sólo el 33% de las muestras fueron PGA. El *conglomerado* es clasificado como 100% PGA;
- *Oxidos* (12% de roca estéril): Clasifica como NGA por su bajo contenido de azufre, debido a la oxidación de sulfuros. Esta oxidación da como resultado un enriquecimiento de As, Se, Sb, Cu, Pb y Zn, y bajo condiciones de pH fuera del rango de 5.5 a 7.5, se puede dar la lixiviación de estos metales;
- *Arenas de cubierta* (12% del total de material estéril): Clasificada toda como material NGA.

4.4.2 Pruebas de carga puntual

Se aplicó la prueba de carga puntual a numerosas muestras de roca estéril como parte de la investigación de la estabilidad del talud del tajo (Klohn Crippen, 2000). Se aplicaron estas pruebas a las muestras de cada una de las unidades de roca estéril. La carga puntual se convirtió a valores UCS ($UCS = \text{valor de carga puntual} \times 25$). Estos valores de las pruebas se usaron para determinar la resistencia al corte de la roca estéril usando el método sugerido por Barton et al (1981), tal como se muestra en la Sección 5.4.2.

4.5 Calidad del agua subterránea

Se definió la composición química de línea de base para el agua subterránea en los alrededores del área de relaves y del tajo abierto, mediante el muestreo de 23 pozos de monitoreo de agua subterránea, ubicados en los sedimentos recientes, en la Formación Tambogrande y en los acuíferos del basamento rocoso. Las muestras para análisis de metales disueltos se enviaron al Laboratorio ASL en Vancouver y las muestras para parámetros químicos generales se enviaron al Laboratorio de la Universidad de Piura en Piura, Perú. Se llevaron a cabo otros análisis de metales en todas las muestras en el Laboratorio de Piura, a manera de una verificación de los resultados de los análisis de metales disueltos.. En la Tabla 4.14 se presenta un resumen de los iones principales.

Tabla 4.14 Calidad del agua subterránea (Programa de Muestreo de Pozos 2001)

Pozo de monitoreo	Ubicación	Formación	pH	STD mg/L	Nitrato mg/L	Cloruros mg/L	Sodio mg/L	Sulfatos mg/L
			Pauta de la OMS					
				1000	11	250	200	250
DH-01-01-I	Río Piura	Roca intemperizada	7.6	16,850	7.8	8,366	4,300	2,494
DH-01-01-II	Río Piura	Formación Tambogrande	7.7	3,100	5.0	1,007	828	745
DH-01-02-I	Río Piura	Sulfuros	6.6	2,800	0.45	1,035	380	389
DH-01-02-II	Río Piura	Arenas de canal	7.5	5,350	4.0	1,950	434	292
DH-01-04-I	Area de relaves	Formación Tambogrande	7.5	18,800	2.5	7,941	3,363	1,296
DH-01-04-II	Area de relaves	Formación Tambogrande	7.6	17,300	4.0	8,933	4,500	842
DH-01-04-III	Area de relaves	Formación Tambogrande	7.3	17,700	9.6	8,650	4,400	1,296
DH-01-06-I	Area de relaves	Formación Tambogrande	7.4	14,550	13.1	6,027	4,400	745
DH-01-06-II	Area de relaves	Arenas de canales recientes	7.9	1,140	1.1	298	260	324
DH-01-07-I	Area de relaves	Formación Tambogrande	7.4	14,200	12.40	7,870	3,400	713
DH-01-07-II	Area de relaves	Formación Tambogrande	7.5	1,280	0.50	440	230	162
DH-01-07-III	Area de relaves	Arenas de canales recientes	7.4	980	0.5	397	200	168
DH-01-08-II	Area de relaves	Formación Tambogrande	7.7	920	0.5	269	200	104
DH-01-08-III	Area de relaves	Arenas de canales recientes	7.9	980	0.5	326	2,288	117
DH-01-09-I	Dique de derivación	Roca intemperizada	7.0	10,650	2.9	4,609	270	842
DH-01-09-II	Dique de derivación	Arenas de canal	7.3	6,700	4.2	2,942	1,700	583
DH-01-10-I	Dique de derivación	Arenas de canal	6.9	11,900	2.8	4,892	1,725	1,296
DH-01-13-I	Qda Careros	Formación Tambogrande	7.5	2,400	2.0	993	367	356
DH-01-13-II	Qda Careros	Arenas de canal	7.8	3,100	9.0	638	567	1,134
DH-01-14-I	Zona Oeste para relaves	Formación Tambogrande	7.6	18,000	2.9	7,657	2,350	486
TG1-320	Tajo abierto TG1	talud del tajo	7.0	35,300	1.5	14,038	3,000	810
TG1-334	Tajo abierto TG1	Orezone/talud del tajo	3.5	14,900	1.5	7,205	1,800	4,859
TG1-341	Tajo abierto TG1	Orezone/talud del tajo	5.4	13,900	2.6	6,239	2,050	2,105

Nota: los casilleros sombreados indican valores en exceso de las pautas de la OMS.

En conjunto, las aguas subterráneas de los alrededores de las áreas de relaves y del tajo abierto no son potables y muestran concentraciones de STD que por lo general exceden las pautas de la OMS entre 1 y 35 veces. El STD máximo registrado en los pozos ubicados en el material de cubierta fue 18,000 mg/L, medido en uno de los pozos en el aluvial Tambogrande, dentro del área propuesta para el almacenamiento de relaves. El máximo de STD registrado en el basamento rocoso fue 35,000 mg/L medido en uno de los pozos profundos de monitoreo del basamento rocoso en el tajo abierto TG-1. Otras de las observaciones de la calidad de agua incluyen lo siguiente:

- La concentración de cloro, excedió algunas veces el valor pauta de la OMS de 250 mg/L en todos los pozos. Las concentraciones de cloro en la sobrecarga varían entre 9,000 mg/L y 14,000 mg/L en el basamento rocoso.
- La concentración de sodio algunas veces excedió el valor pauta de la OMS de 200 mg/L en todos los pozos. Las concentraciones de sodio en la sobrecarga variaron entre 4,300 mg/L y 3,000mg/L en el basamento rocoso.
- El valor pauta para sulfato de 250 mg/L se excedió en las 4 estaciones de monitoreo. Las concentraciones de sulfato en la sobrecarga varían entre 2,500 mg/L y mostraron 4,900mg/L en el basamento rocoso.
- Todos los pozos mostraron concentraciones de hierro que excedían el valor pauta para agua para consumo humano de la OMS de 0.3 mg/L. La concentración de hierro disuelto fue 16.1 mg/L medido en el pozo de monitoreo DH-01-2-I, dentro de la zona de mineral sulfurado.

La alta mineralización del agua subterránea puede ser el resultado de una prolongada residencia/desplazamiento (es decir, largas rutas de residencia/flujo deben corresponder a los STD más altos). En forma alternativa, el agua salina puede ser agua de mar remanente del período Terciario, que pudo haber percolado profundamente dentro de los estratos de la cuenca durante el período en que el mar ocupaba el área. La segunda hipótesis puede ser más plausible, ya que es poco probable que el agua salada residual dentro de las rocas de la cuenca haya drenado completamente en los últimos millones de años. Asimismo, es improbable que un valor de STD de 20,000 ppm se deba a la disolución mineral de las rocas volcánicas e intrusivas en el área. La información hidrogeológica química y física indica que los sistemas menos profundos del acuífero del basamento rocoso descargan en acuíferos aluviales superficiales dentro del área del proyecto.

4.6 Material de préstamo de arcilla bentonítica

Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio preliminares del material de arcilla bentonítica disponible. Los resultados de las pruebas se incluyen en el Anexo I y consisten en lo siguiente:

Permeabilidad

Se llevó a cabo una prueba de conductividad hidráulica con permeámetro que indicó una permeabilidad de 3×10^{-10} cm/s.

Mineralogía

La muestra “Bentonita” (identificada como JuanBent en el laboratorio UBC) se trituro hasta ser polvo fino y se remoldeó sobre una platina de vidrio con etanol. Se recolectaron los datos de difracción de polvo de rayos X con un paso de escaneo de $0.04^\circ 2\theta$ y tiempo de recuento de 2s/paso en un difracciómetro Siemens D5000 sobre un rango de $3-70^\circ 2\theta$. El tubo de rayos X Cu de foco normal se operó a 40 KV y 30 mA. La identificación mineral se hizo con software automatizado de búsqueda/emparejado proporcionado por Siemens sobre la base de datos completa del Centro Internacional para Datos de Difracción (ICDD). La mineralogía de la muestra se resume en la Tabla 4.15. La identificación mineralógica se llevó a cabo usando el método de análisis de fase cuantitativa, usando el método Rietveld.

Tabla 4.15 Mineralogía de la bentonita

MINERAL	FORMULA QUÍMICA IDEAL	wt.%
Cuarzo	SiO ₂	6
Montmorillonita	(Na,Ca) _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ · nH ₂ O	72
Cristobalita	SiO ₂	16
Feldespatos	(Na,K)Al ₂ O ₈	6

Características de absorción

Se llevaron a cabo pruebas de absorción usando una solución de agua con 2 mg/L cobre, 0.01 mg/L cadmio y 0.1 mg/L zinc. En la Tabla 4.16 se resumen los resultados, los que indican una atenuación inicial importante para cobre y zinc, y luego la absorción alcanza una velocidad menor con el tiempo.

Tabla 4.16 Resumen de los resultados de la prueba de absorción

Elemento o unidades	Tiempo Mins.	Cu mg/L	Cd mg/L	Zn mg/L	As mg/L	pH	wt. soil g	Vol soln ml	mg Cu/kg mg/kg	mg Cd/kg mg/kg	mg Zn/kg suelo mg/kg
Inicial		1.9671	0.0083	0.1021	UNCAL	10.86	4.00	40.0			
5 min	5	0.02865	0.0084	-0.0126		9.41	4.00	40.0	19.3845	-5E-05	-2.8675E-07
10 min	10	0.04725	-0.0018	0.0032		9.44	4.00	40.0	19.1985	0.00485	2.49723E-05
15 min	15	0.02685	-0.0009	-0.0059		9.38	4.00	40.0	19.4025	0.00446	0.00002484
30 min-a	30	0.01365	0.0004	0.0041		9.46	4.00	40.0	19.5345	0.00386	0.000019355
30 min-b	30	0.0354	0.002	0.0135		9.38	4.00	40.0	19.317	0.00304	1.39545E-05
1 hr	60	0.0093	-0.005	0.0069		9.28	4.00	40.0	19.578	0.00651	0.000031654
2 hr	120	0.02745	-0.0042	0.0129		9.23	4.00	40.0	19.3965	0.00606	0.000027875
4 hr	240	0.009	-0.0038	0.0032		9.09	4.00	40.0	19.581	0.00592	2.99173E-05
6 hr	360	0.0078	-0.0066	0.0113		8.97	4.00	40.0	19.593	0.0073	0.000033823
24 hr a	1440	0.02025	-0.007	0.0113		8.9	4.00	40.0	19.4685	0.00745	0.000034731
24 hr b	1440	0.0381	-0.0055	0.0091		8.9	4.00	40.0	19.29	0.00666	0.000032085

5. CRITERIOS DE DISEÑO Y PARÁMETROS DE DISEÑO

5.1 Generalidades

Los criterios de diseño que se resumen en la Tabla 5. se seleccionaron en base a práctica internacional aceptada, compatible con los criterios del proyecto previamente adoptados.

Tabla 5.1 Criterios de Diseño

ITEM	DISEÑO	COMENTARIOS
1. Estabilidad y deformación geotécnica Factor de seguridad estático Factor de seguridad pseudo-estático Factor de seguridad de Post Licuefacción Deformaciones sísmicas permisibles - Operación - Cierre	1.5 1.2 1.1 0.5m 1.0m	Criterios de ICOLD y Criterios Canadienses de Seguridad de Presa Según las regulaciones peruanas del MEM (para movimiento sísmico cada 150 años) Minimizar el daño potencial del revestimiento Minimizar el daño potencial del revestimiento
2. Hidrotécnica Período de retorno de derivación Caudal de diseño de las operaciones de óxidos Caudal de diseño de las operaciones de sulfuros Criterios de descarga del caudal Vertedero/caudal de cierre Borde libre	1:50 año 3 mes 1,000 año 1 mes 1,000 año 1 mes 10 año PMF 1 m	Criterios de ICOLD y Criterios Canadienses de Seguridad de Presa Falla de la derivación no afecta la presa. La descarga del agua excedente durante años de alta precipitación. La descarga cumple con los criterios de descarga del MEM Caudal máximo probable.
3. Sismicidad Sismo Base de Operación. (OBE) -Aceleración pico de terreno Cierre: Sismos Base de Diseño (DBE) -Aceleración pico del terreno	1:475 años 0.25 g MCE 0.40 g	Criterios ICOLD y Criterios Canadienses de Seguridad de Presa Máximo sismo creíble, $M_M 9.0$
4. Civil	Relleno de la presa compactado a 98% de la densidad estándar Proctor	
5. Ambiental	Régimen máximo permisible de filtración <0.5 L/s	Pérdida mínima de filtración para cierre. Se realizará un programa de monitoreo para confirmar el rendimiento.

5.2 Cantidades de material

5.2.1 Relaves

En la Tabla 5.2 se presenta el programa de descarga de relaves. Los relaves de óxidos asociados con la extracción de oro se producen en el Año 1 hasta el Año 3.5, a una tasa nominal de 7,500 tpd. Comenzando en el año 4, los relaves de sulfuros asociados al minado de este material se descargan a una tasa nominal de 18,500 tpd.

Tabla 5.2 Programa de entregas de relave

AÑO	RELAVES DE ÓXIDOS (2.16 t/m ³)		RELAVES DE SULFUROS (2.43 t/m ³)	
	Kt	Mm ³	Kt	Mm ³
Año 1	2,463	1.14	0	0
Año 2 – 3	2,738	1.27	0	0
Año 4	974	0.45	4,744	1.952
Año 5 – 11	0	0	7,300	3.004
Año 12	0	0	5,457	2.246
Total	8,913	4.13	61,301	24.919

Nota: Densidades utilizadas de la Tabla 5.5

5.2.2 Roca de desecho

El programa de tajo abierto (AMEC, 18 de febrero de 2002) para el tajo TG-1 indica que se requiere almacenar a lo largo de la vida de la mina, un total de 88.4 Mt de roca estéril removida, además de 12.5 Mt de materiales de sobrecarga. En las Tabla 5.3 y la 5.4 se muestra el detalle con los tipos de material estéril y su destino.

Tabla 5.3 Programa de entrega de roca estéril

		MASA (KT)								
		ARENAS DE SOBRECARGA	DESECHO DE ÓXIDOS	SULFUROS	DIQUE	DACITA	STOCKWORK		MAFICA	TOTAL
							CONGLOMERADO, SEDIMENTARIAS, SEDIMENTARIAS DACITA	RIOLITA, RIO DACITA		
Año <1	Q1	1,189	660	-	8	335	9	-	32	2,233
	Q2	1,451	464	-	7	271	12	-	35	2,239
	Q3	1,696	758	-	5	345	14	9	50	2,876
	Q4	1,607	676	-	6	494	19	15	73	2,890
Año 1	Q1	1,567	1,121	-	0	58	2	3	9	2,760
	Q2	991	1,062	-	1	380	14	20	62	2,530
	Q3	970	1,305	-	1	432	26	28	72	2,834
	Q4	1,035	1,289	-	0	387	25	26	65	2,827
Año 2		1,094	2,801	-	0	531	42	40	90	4,599
Año 3		856	1,278	1,500	16	2,661	162	92	465	7,030
Año 4	Q1	42	735	917	28	1,747	131	46	307	3,953
	Q2	-	68	1,150	37	879	137	52	154	2,477
	Q3	-	-	1,250	36	850	133	51	148	2,468
	Q4	-	-	1,000	34	754	116	41	136	2,081
Año 5		-	-	4,653	129	2,694	407	127	507	8,518
Año 6		-	-	3,303	77	3,552	452	167	1,022	8,573
Año 7		-	-	4,128	45	3,057	494	128	877	8,729
Año 8		-	-	4,867	16	2,579	301	48	378	8,188
Año 9		-	-	5,145	31	1,881	176	44	371	7,649
Año 10		-	-	5,246	37	1,880	207	83	466	7,919
Año 11		-	-	4,828	36	1,130	215	55	18	6,282
Año 12		-	-	863	28	205	48			1,144
Total Masa (Kt)		12,498	12,217	38,850	576	27,102	3,144	1,074	5,338	100,799

Tabla 5.4 Detalle del destino de los materiales

	ARENAS DE SOBRECARGA	ESTERIL DE ÓXIDOS	SULFUROS	DACITA	OTRAS ROCAS			MÁFICA	TOTAL
					DIQUE	CONGLOMERADO, SEDS, DACITA SEDS	RIOLITA, RIO-DACITA		
Total Masa (kt)	12,498	12,217	38,850	27,102	576	3,144	1,074	5,338	100,799
% hacia relaves	0	0	100	70	100	100	100	0	
% hacia botadero de desmonte	0	0	0	0	0	0	0	40	
% hacia pila de sobrecarga	50	0	0	0	0	0	0	0	
% hacia la construcción	50	100	0	30	0	0	0	60	
Masa a relaves (Kt)	0	0	38,850	18,971	576	3,144	1,074	0	60,987
Masa a botadero de desmonte (Kt)	0	0	0	0	0	0	0	2,135	2,135
Masa a pila de sobrecarga (Kt)	6,249	0	0	0	0	0	0	0	6,249
Masa a construcción (Kt)	6,249	12,217	0	8,131	0	0	0	3,203	30,755
Densidad seca (t/m ³)	1.51	1.71	3.40	1.72	2.06	2.13	1.97	2.06	
Volumen a relaves (Mm ³)	0	0	11,420	11,030	0,278	1,478	0,545	0	24,751
Volumen a botadero de desmonte (Mm ³)	0	0	0	0	0	0	0	1,037	1,037
Volumen a pila de sobrecarga (Mm ³)	4,138	0	0	0	0	0	0	0	4,138
Volumen para construcción (Mm ³)	4,138	7,144	0	4,727	0	0	0	1,555	17,564

5.2.2.1 Arenas de sobrecarga

Las arenas y arcillas de sobrecarga provenientes del desbroce previo del tajo abierto TG-1 se usarán para la construcción de la presa de relaves y los diques de derivación, y el material no adecuado se colocará en la pila de material de sobrecarga. La Tabla 5.3 muestra la cantidad de arena que se espera esté disponible para la construcción y la cantidad que se espera colocar en la pila de sobrecarga.

Debido a la presencia de capas interestratificadas de arena y arcilla a lo largo de la desviación de Quebrada Carneros, se espera que alrededor de 50% de las arenas de sobrecarga excavadas del tajo abierto también comprendan estos materiales. Ya que se espera un espaciado estrecho de interestratos, no se anticipa que la arena y la arcilla puedan separarse al momento de la excavación, haciendo que el material no sea adecuado para su uso en la construcción de los diques de arranque del depósito de relaves.

5.2.2.2 Roca estéril que no genera ácidos

La roca estéril que no genera ácido se colocará ya sea en el botadero de roca estéril o se usará para la construcción. El desecho de óxidos proveniente de la pre-producción y de los 4 primeros años de operación se usará para la construcción de los diques anulares para el depósito de relaves, así como para el rip rap que se requiere para los canales de derivación y los diques de deflexión alrededor del Tajo Abierto TG-1.

En la Tabla 5.4 se muestran los volúmenes que se espera estarán disponibles para la construcción.

5.2.2.3 Roca estéril generadora de ácido

La roca estéril que genere ácido será mezclada con los relaves y almacenada en el depósito de relaves. La metodología de colocación de este material se trata más

detalladamente en la Sección 8.4. La mayor parte de la roca se colocará en el depósito de almacenamiento de relaves de sulfuros. Sin embargo, habrá un pequeño volumen de roca estéril que genera ácidos que será excavada antes del arranque de las instalaciones de relaves de sulfuros, la que se colocará en el depósito de relaves de óxidos hasta que el depósito para sulfuros esté listo para almacenar los relaves sulfurados.

El volumen total de roca estéril designada para ser colocada en el depósito de relaves se muestra en la Tabla 5.4.

5.3 Criterios sobre la calidad del agua

La instalación de relaves operará a manera de un sistema cerrado y se recolectará el agua sobrenadante para volverla a usar en la Planta concentradora, la misma que incluye un circuito de destrucción del cianuro para las operaciones de óxidos. En el depósito de relaves no deberá haber cianuro libre (< 0.05 mg/L) y el cianuro total deberá ser menos de 5 mg/L. La calidad del agua de proceso a partir de las pruebas de circuito cerrado llevadas a cabo para los estudios metalúrgicos se presenta en las Tablas 4.9 y 4.10 de la Sección 4 del presente informe.

Durante los períodos de eventos hidrológicos extremos, puede que sea necesario descargar el excedente de agua del depósito. Toda descarga cumplirá con las pautas del MEM para efluentes de mina y se descargarán sólo durante períodos de caudal alto en el río Piura.

5.4 Parámetros de diseño para los materiales

5.4.1 Relaves

Sobre la base del análisis granulométrico, los relaves de óxidos y de sulfuros tendrán aproximadamente 98% de finos, con un tamaño efectivo de grano (D_{10}) de 0.001 mm y

0.006 mm respectivamente. La permeabilidad de los relaves, establecidos para uso en los análisis de filtración, se basó en la prueba de consolidación llevada a cabo por Klohn Crippen. La prueba de consolidación en los relaves de sulfuros indicó mediciones de conductividad hidráulica en el rango de 7.5×10^{-6} cm/seg (baja consolidación) hasta 2.3×10^{-7} cm/seg (totalmente consolidado). Las pruebas de las muestras de relaves de óxidos produjeron valores en el rango de 2.0×10^{-6} cm/seg (baja consolidación) hasta 3.8×10^{-7} cm/seg (totalmente consolidado).

Tabla 5.5 Parámetros de diseño de los relaves

PARÁMETRO	VALOR	COMENTARIO
Gravedad específica - Oxidos - Sulfuros	4.32 4.86	Basado en prueba de laboratorio
Densidad seca - Oxidos - Sulfuros	2.16 t/m ³ 2.43 t/m ³	Basado en prueba de laboratorio, pero asumiendo en forma conservadora una relación de vacíos de 1.0
Resistencia estática	$c' = 0, \phi' = 30^\circ$	Estimado basado en prueba de laboratorio
Relaves licuados	$S_u/\sigma_{vo}' = 0.05$	Estimado basado en prueba de laboratorio
Relación de vacíos(promedio durante las operaciones)	1.0	Estimado basado en la experiencia
Pendiente de playa (BAW/BBW)	1.0 %	Estimado basado en la experiencia

Notas: BAW – playa sobre agua; BBW – playa por debajo del agua

Sobre la base de estos resultados, se seleccionó un valor de conductividad de 9.0×10^{-7} cm/seg para el caso más desfavorable(mayor permeabilidad) bajo condiciones de consolidación total. Se seleccionó un valor de 2.3×10^{-7} cm/seg para la mejor permeabilidad base de los relaves (es decir, la más baja posible).

5.4.2 Roca Estéril

5.4.3 Resistencia al corte

La determinación de los parámetros de resistencia para la roca estéril competente no es práctica dentro del laboratorio. Por esa razón, la estimación de las propiedades de resistencia al corte se han realizado usando métodos publicados reconocidos (Barton et al, 1981). El método que describe Barton permite la estimación del ángulo pico del ángulo de fricción drenado para la roca estéril, basado en la resistencia a la compresión simple, tamaño de partícula D_{50} , grado de redondez de las partículas y porosidad, cuyos datos resumidos se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Parámetros de la resistencia al corte de la roca estéril

MATERIAL	UCS (Mpa)	D₅₀ (mm)	POROSIDAD (%)	ϕ' (°)
Oxidos	15	50	35	32 – 35
Volcánica	50	100	35	40 – 44

Nota: Los valores UCS se estiman a partir de la pruebas de carga puntual.

Densidad seca y relación de vacíos

La densidad seca de la roca estéril se estimó basándose en la densidad in situ proporcionada por AMEC (Pearson, 2001) y los factores de esponjamiento de Caterpillar (1996). La Tabla 5.7 presenta las densidades secas esperadas de la roca estéril después de la excavación y la colocación, ya sea en el botadero de roca estéril o en el depósito de relaves.

Tabla 5.7 Estimación de la densidad seca de la roca estéril

TIPO DE DESECHO	DENSIDAD IN SITU (BANCO) ρ_d	FACTOR DE ESPONJAMIENTO	DENSIDAD SECA COLOCADA
Arena de sobrecarga	1.70	0.89	1.51
Roca de desecho de óxidos	2.28	0.75	1.71
Dacita	2.57	0.67	1.72
Sedimentarias Dacita	2.44	0.85	2.07
Conglomerado	2.71	0.85	2.30
Máfico	2.42	0.85	2.06
Riolita	2.21	0.85	1.88
Rio-dacita	2.42	0.85	2.06
Sdba	3.02	0.89	2.69
Sedimentarias	2.37	0.85	2.01
Dique	2.57	0.80	2.06
Roca de desecho de sulfuros, SU0	4.53	0.75	3.40

La Tabla 5.8 resume los parámetros de diseño para la densidad y la relación de vacíos de la roca estéril.

Tabla 5.8 Densidad de roca estéril y relación de vacíos

MATERIAL	DENSIDAD SECA (t/m^3)	RELACIÓN DE VACÍOS (e)	POROSIDAD (n)
Roca estéril de sulfuros	3.40	1.0	0.5
Roca estéril de dacita	2.07	0.68	0.4
Roca estéril de óxidos	1.71	0.73	0.42

5.4.4 Materiales de Construcción

El principal material de construcción consistirá en arenas de sobrecarga compactadas y roca estéril de la mina. Este material se extraerá del tajo abierto y se usará para la construcción de la presa de relaves. Se ha usado una resistencia al corte en el rango inferior para el diseño. El relleno del revestimiento consistirá en una mezcla de arena y arcilla bentonítica, que se colocará y compactará. En la Tabla 5.9 se resumen las propiedades utilizadas para el diseño geotécnico.

5.5 Parámetros de diseño para los materiales de cimentación y de construcción

5.5.1 Parámetros de resistencia de diseño

Sobre la base de la investigación geotécnica, se adoptaron los parámetros que se presentan en la Tabla 5.9 para los suelos naturales, para su uso en el diseño geotécnico del depósito de relaves y el botadero de roca de estéril. Estos valores se basaron en datos de pruebas en el campo, pruebas de laboratorio y en la experiencia.

Tabla 5.9 Parámetros de resistencia natural del material

DESCRIPCIÓN	DENSIDAD A GRANEL	RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA		RESISTENCIA AL CORTE DRENADO		RESISTENCIA RESIDUAL
	kN/m ³	Cu	ϕ_u (°)	C' (kPa)	ϕ' (°)	S_u/σ
Arena suelta (aluvial)	18	0	28	0	30	0.15
Arcilla firme (aluvial)	18	25	0	0	14	-
Grava densa media (aluvial)	20	0	32	0	32	-
Arena densa media (aluvial)	18	0	30	0	32	-
Arena densa media (Tambogrande)	18	0	32	0	32	-
Relleno de roca/sobrecarga compactado	20	0	32	0	36	-
Capa de relleno de bentonita/arena	18	0	28	0	32	

Basándose en el análisis de licuefacción sísmica tratado en la Sección 6.6, se asume que sólo las arenas aluviales sueltas en los cimientos y los relaves podrían licuarse bajo condiciones de un movimiento sísmico.

5.5.2 Parámetros de diseño de conductividad hidráulica

Material de Cimentación

Se realizó un total de 66 mediciones in situ de la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) dentro de la zona vadosa en 23 perforaciones de prueba. Todas las mediciones se realizaron usando el método “Guelph Permeameter” que implica medir el

régimen estacionario de la recarga de agua dentro de un sondaje sin revestimiento (terminado sobre de la napa freática) en el cual se mantiene una carga constante de agua. El instrumento permite mediciones de K_{fs} dentro del rango de 10^{-2} a 10^{-6} cm/seg. Para obtener un mayor perfil de profundidad para K_{fs} , se llevaron a cabo las pruebas a múltiples niveles dentro de las perforaciones de prueba (es decir, aproximadamente 5 m por debajo de la superficie del terreno). Se realizaron hasta cinco pruebas de conductividad separadas en cada calicata, dependiendo de la variabilidad de la geología encontrada.

El valor de K_{fs} para depósitos ribereños recientes (arcilla, limo y arenas finas) variaron entre 10^{-5} y 10^{-2} cm/seg, con una media geométrica de 1.7×10^{-3} cm/seg. El K_{fs} para la formación aluvial/lacustre Tambogrande (arcillas y gravas) varió entre 10^{-6} y 10^{-1} cm/seg, con una media geométrica de 4.6×10^{-4} cm/seg. El valor de 10^{-1} cm/seg se derivó de una prueba hidráulica transversal realizada en una capa aluvial altamente transmisiva que se encontró durante la perforación de los taladros DH-01-07 y DH-01-12.

Revestimiento de arena/bentonita

Cerca a Sullana, aproximadamente 20 km al oeste de Tambogrande, se ha identificado una fuente de bentonita. Se llevó a cabo una prueba preliminar y de conductividad hidráulica que indicó una conductividad de 3×10^{-10} cm/s. Esto es compatible con otros depósitos de bentonita a nivel mundial. La bentonita se chancará y mezclará con arena fina de río, para proporcionar una capa de relleno de baja permeabilidad para el sistema de revestimiento HDPE. Se usará un mínimo de 10% de bentonita para controlar la conductividad hidráulica de la capa bentonítica. Se realizarán otras mezclas de prueba y pruebas de laboratorio adicionales en la etapa de ingeniería de detalle, para optimizar el uso de este material.

6. DISEÑO DE LA PRESA

6.1 Generalidades

Esta sección presenta el diseño de las presas que se requieren para contener y almacenar los relaves. Las presas se construirán de suelos de sobrecarga y roca estéril provenientes de las operaciones de explotación minera. Se proporcionará control de filtración con un sistema de revestimiento compuesto. Los principales componentes del diseño incluyen: análisis de las dimensiones del depósito, de la sección de diseño, de la sedimentación y de la estabilidad. Las presas se diseñaron para cumplir con los criterios que se indican en la Tabla 5.1.

En la Figura 6.1 se presentan las secciones típicas y los detalles para el diseño de la presa.

6.2 Dimensión del depósito

Las elevaciones del depósito y los volúmenes almacenados se calcularon usando el Programa Surpac v4.1-H (SSI, 2001). Se creó un modelo tridimensional digital del terreno (DTM) basado en los datos topográficos para el área del proyecto. Usando el DTM, se sobrepusieron trazos preliminares del depósito de relaves. La capacidad de almacenamiento de los depósitos de relaves se calculó usando el Surpac Tailings Model. Este modelo permite la especificación de puntos de descarga y elevaciones, regímenes de descarga de sólidos y pendientes de playa sobre y debajo del agua.

En la Tabla 6.1 se muestra el volumen total de almacenamiento requerido para cada depósito. Los volúmenes calculados de almacenamiento del depósito a partir de Surpac se compararon con los volúmenes requeridos y se modificó el diseño según se consideró necesario.

Figura 6.1 Diseño de la Presa de Relaves – Planta, secciones y detalles

Tabla 6.1 Requerimientos de almacenamiento para el depósito de relaves

DEPÓSITO	RELAVES (Mm ³)	ROCA ESTERIL (Mm ³)	TOTAL (Mm ³)
Oxidos	4.13	0 ⁽¹⁾	4.13
Sulfuros	24.92	24.75	49.67
Total	29.05	24.75	53.8

(1) Para los volúmenes totales, se asumió que no se almacenará roca estéril sulfurada en el depósito de óxidos.

Para la determinación del volumen, se ha asumido que los relaves no rellenarán por completo los vacíos dejados por la roca estéril. Esta es una suposición conservadora ya que potencialmente, 25 a 40% de los vacíos de las rocas podrían llenarse. Esto podrían reducir potencialmente el requisito de almacenamiento total en aproximadamente 5%.

Los volúmenes de almacenamiento y los requisitos de llenado para los depósitos se resumen en la Tabla 6.2. El depósito de relaves de sulfuros rodeará el depósito de relaves de óxidos.

Tabla 6.2 Tamaño de diseño de los embalses

	ELEVACIÓN DE LA CRESTA (m)	ELEVACIÓN FINAL DE LAS DESCARGAS (m)	ÁREA SUPERFI CIAL (Ha)	VOLUMEN INCREMENTAL ALMACENADO (Mm ³)	VOLUMEN DE RELLENO INCREMENTAL (Mm ³)
Depósito de óxidos	86	81.7	47.6	4.2	1.85
Depósito de sulfuros (Arranque)	86	83	130	6.1	1.15
Depósito de sulfuros (Máximo)	109	108	177.6	49.6	12.5
Total	-	-	177.6	53.8	15.5

6.3 Diseño de Secciones

La sección típica de la presa consistirá de una presa zonificada de relleno de roca/tierra construida de arenas de sobrecarga y roca estéril provenientes de las operaciones de desbroce de la mina. Los diques de arranque comprenderán una sección de relleno de arena homogénea, con relleno de roca agregado a las últimas secciones, a medida que se eleve el dique. Se controlarán las filtraciones con una geomembrana compuesta/revestimiento de tierra sobre la cara aguas arriba del dique. El dique se elevará, por encima del dique de arranque, mediante el método de línea central. El revestimiento de geomembrana se extenderá verticalmente con una serie de “zig-zags”, con una pendiente de 2H:1V.

Se eligieron dos secciones típicas de diseño para el análisis. La Sección A-A' está ubicada en la Presa Oeste, en una zona de suelos aluviales, profundos y potencialmente suaves/sueltos. La Sección B-B comprende la mayor parte del dique, en donde los suelos de cimentación consisten en arenas densas de la formación Tambogrande, grava y arcilla. La pendiente aguas arriba es 2H:1V y la pendiente aguas abajo es 9H:1V para la Sección A-A y 2H:1V para la Sección B-B.

Los taladros más cercanos a la sección de diseño A-A son los DH-01-08 y 00BH-006. Si bien estos taladros están desplazados por casi 300 m, se encuentran en la misma elevación superficial y están ubicados en el canal aluvial sobre el cual se ubica la Sección A-A. La línea sísmica TG-07 se corrió a lo largo del alineamiento de la presa oeste y ha sido utilizada para delinear las arenas aluviales no saturadas de baja velocidad, el material saturado y la Formación Tambogrande, esta última de mayor velocidad.

El plano B-33007 muestra la sección geotécnica utilizada para el análisis de la Sección A-A. Se asumió en forma conservadora, que el material aluvial suelto/suave se extiende hacia la formación Tambogrande (hasta 30 m de profundidad). Se llevarán a cabo más

investigaciones para confirmar la profundidad, resistencia al corte, y densidad del suelo para optimizar la geometría del dique y la estabilidad de la pendiente.

La sección B-B' es la sección de diseño general aplicable a la mayor parte del depósito de relaves. La sección comprende un dique de 14 m de alto cimentado sobre arena aluvial medianamente densa o de la formación Tambogrande, bajo la cual se presenta arena densa a muy densa y grava o arcilla bastante dura a dura. No se espera que los suelos de la cimentación se licúen durante de un evento sísmico. Tanto la pendiente aguas arriba como la de aguas abajo del dique, fueron fijadas en 2H:1V.

Debido a que el depósito de relaves tiene un revestimiento HDPE, se asumió que la superficie freática a través de la sección transversal del dique coincide con la napa freática medida en los suelos naturales subyacentes. También se asumió que durante la construcción, preferentemente se colocará material más grueso a lo largo de la base del dique para que actúe a manera de un filtro y ayude a alejar el agua de la cara aguas abajo de la presa.

Las presiones de poros generadas en el material natural están representadas por B_{bar} , cuya selección se trata en la Sección 6.5.

El diseño de las secciones para la presa de arranque y el depósito final se muestran en los planos D-33007 y D-33008, mientras que en el plano D-33011 se muestra la disposición de la presa de arranque de óxidos, de la presa de arranque de sulfuros y el embalse final.

6.4 Asentamientos

El asentamiento diferencial entre el material aluvial y el material más denso de Tambogrande, podría provocar deformaciones en el revestimiento. Al final habrá hasta 40 m de relaves apoyados sobre arenas aluviales, los cuales ejercerán una presión vertical de aproximadamente 1000 kPa sobre los materiales del cimiento. Se calculó el

asentamiento resultante bajo el depósito, usando la teoría de consolidación unidimensional, con un estimado conservador de los parámetros de consolidación. Se calcula que por debajo el dique final, existen 30 m de material aluvial y que el asentamiento máximo podría estar entre 1.8 m y 3.6 m. Bajo los relaves, el asentamiento podría estar entre 2 y 4 m. Estos asentamientos podrían resultar en una deformación inducida de 4 m sobre una distancia de 100 m, lo que fácilmente podría soportar el sistema de revestimiento.

6.5 Presión de poros en la cimentación

Las presiones de poros generadas en la base de cimentación durante la construcción, están representadas por el coeficiente B_{bar} , el mismo que se define como el cambio en la resistencia total de sobrecarga. Esta presión intersticial adicional se agrega a la presión de poros generada por el nivel piezométrico en el perfil, para calcular la presión de poros total en un punto dado.

El valor de B_{bar} depende de una serie de factores que incluyen la velocidad de construcción y la velocidad a la cual las presiones intersticiales adicionales se disipan en la zona de cimentación. Se encontró que las arenas aluviales contenían una pequeña cantidad de material fino. Sin embargo, se comprobó que K_{fs} estaba en el orden de 10^{-1} a 10^{-3} cm/s. Se encontró trazas de arcilla en el taladro BH-01-08, lo que podría indicar la presencia de algunas capas angostas de arcilla. El taladro 00DH-006, ubicada hacia el oeste del depósito pero en el mismo canal aluvial, encontró capas de arenas, limo y arcilla. Sobre la base de estos resultados, se adoptó un valor de B_{bar} igual a 0.4 para las arenas aluviales.

Durante la construcción se monitorearán las presiones intersticiales en los cimientos, para garantizar que el cambio en la presión de poros relativa al cambio en la presión total de sobrecarga, no exceda el valor B_{bar} utilizado en el análisis. Si se excedieran los valores

de diseño, se optará por reducir la velocidad de la construcción para permitir la disipación de la presión de poros adicionales o se reducirán las pendientes.

6.6 Análisis de licuefacción

Se analizaron los datos de conteo de golpes SPT para evaluar la probable licuefacción o respuesta de presión intersticial de los cimientos a la carga sísmica. La prueba SPT es una medición de la densidad in situ de materiales granulares sin cohesión. En los materiales de grano fino, el SPT no permite obtener una representación confiable de la densidad, debido a las presiones de poros que se generan durante la prueba. En este caso, se evaluó el potencial de licuefacción usando los criterios chinos (Marcuson et al. 1990).

El potencial de licuefacción para suelos granulares se basó en el método sugerido por Youd e Idriss (2001). En la Tabla 6.3 se presenta un resumen de los resultados, los mismos que indican que algunos suelos subyacentes son susceptibles a la licuefacción cuando están sujetos a cargas sísmicas provenientes de un evento MSC. Los suelos de la formación Tambogrande no se licuarán bajo carga sísmica.

Tabla 6.3 Resumen de evaluación de licuefacción por debajo del dique

UNIDAD DE SUELO	MEDIO $(N_1)_{60}$	RANGO DE $(N_1)_{60}$ REQUERIDO PARA FOS= 1.0	POTENCIAL DE LICUEFACCION BASADO EN YOUD AND IDRIS (2001)	LICUEFACCION BASADA EN MARCUSON ET AL (1990)
Arcilla aluvial	6 – 7	-	-	Non-licuable
Limo arcilloso aluvial	4 – 5	-	-	Non-licuable
Grava aluvial	29 – 75	23 – 27	No-licuable	-
Arena aluvial	0 – 21	20 – 24	Licuable	
Limo aluvial	3 – 18	-	-	Non-licuable
Arena arcillosa aluvial	8 – 15	20	Licuable	

6.7 Análisis de estabilidad del dique de arranque

El dique de arranque, tanto para el depósito de relaves de óxidos como para el de sulfuros, tiene una elevación de cresta de 86 m. Las dos secciones y los perfiles sub-superficiales se muestran en el plano B-33007.

Ambas secciones fueron analizadas para evaluar su estabilidad bajo las siguientes condiciones:

- Construcción en el corto plazo (parámetros de resistencia al corte no drenada);
- Estática (parámetros de resistencia al corte drenado);
- Pseudo-estático (usando parámetros de resistencia al corte drenado y un coeficiente sísmico de 0.125g); y
- Condiciones post movimiento sísmico (usando la resistencia al corte residual para suelos considerados licuables).

Se llevó a cabo un análisis de estabilidad del estado límite bi-dimensional, usando el programa Slope/W (Geoslope, 2001) y el modelo de equilibrio límite de Morgenstern-Price con una función de distribución de fuerza semi-sinusoidal entre las rebanadas. Los factores de seguridad se calcularon para superficies de falla en bloque y circular, buscadas aleatoriamente.

En las Tablas 6.4 y Tabla 6.55 respectivamente, se resumen los resultados de los análisis de estabilidad para las secciones A-A' y B-B' de la presa de arranque. En el plano B-33007 se muestran gráficamente las superficies críticas de falla. Para los fines del presente análisis, se asumió que todo el dique contribuya al aumento de las presiones de

poros en los cimientos. En la construcción por etapas, sólo el material agregado en el recrecimiento se considera que genera la presión de poros adicional en los cimientos.

Tabla 6.4 Resumen del análisis de estabilidad - Sección A-A'

DIRECCIÓN	PENDIENTE	CASO	FACTOR MÍNIMO DE SEGURIDAD	ACELERACIÓN DE FLUENCIA (g)
Aguas abajo	9H : 1V	Construcción Estática	3.3	-
			3.5	0.26
		Pseudo-estática Post-sismo	1.7	-
			1.1	-
Aguas arriba	2H : 1V	Construcción Estática	1.4	-
			1.8	0.28
		Pseudo-estática	1.3	-

Tabla 6.5 Resumen del análisis de estabilidad– Sección B-B'

DIRECCIÓN	PENDIENTE	CASO	F.S.	ACELERACIÓN DE FLUENCIA (g)
Aguas abajo y Aguas arriba	2H : 1V	Construcción Estática	1.7	-
			1.7	0.26
		Pseudo-estática	1.3	-

6.8 Estabilidad de la cara aguas arriba para el recrecimiento por línea central

La presa de relaves se elevará en etapas de 6 m a 8 m, usando el método de construcción de línea central. El método de construcción de línea central ha sido utilizado para muchas presas en el mundo en áreas sísmicas y se basa en usar la playa de relaves aguas arriba para dar soporte a los recrecimientos incrementales del dique. La elevación incremental del dique tiene un factor de seguridad estático alto. Sin embargo, si se presenta una carga sísmica al mismo tiempo que se está elevando el dique, la playa de relaves aguas arriba podría licuarse dando como resultado un hundimiento local del recrecimiento incremental hacia el depósito. Este hundimiento no comprometería a toda la cresta dique, se mantendría el borde libre y el dique permanecería estable. La sección

del revestimiento también se ha ubicado cerca de la cresta aguas abajo del dique, luego de manera que no se dañaría en el caso de producirse un asentamiento de la cara aguas abajo. Luego del sismo, se repararía el talud del dique.

6.9 Dique final

Se analizaron las mismas secciones para la sección del dique final, con una elevación de cresta de 109 msnm. Se asume que los diques son elevados mediante la construcción de línea central, usando las mismas pendientes aguas arriba y aguas abajo que se usaron para el dique de arranque.

Tabla 6.6 Resumen del análisis de estabilidad - Sección A-A'

DIRECCIÓN	PENDIENTE	CASO	FOS	ACELERACIÓN DE FLUENCIA (g)
Aguas abajo	9H : 1V	Construcción	3.8	-
		Estática	3.8	0.34
		Pseudo-estática	0.8	-
		Post-sismo	1.5	-

Tabla 6.7 Resumen de análisis de estabilidad – Sección B-B'

DIRECCIÓN	PENDIENTE	CASO	FOS	ACELERACIÓN DE FLUENCIA (g)
Aguas abajo	2H : 1V	Construcción	1.5	-
		Estática	1.5	0.18
		Pseudo-estática	0.7	-
		Post-sismo	1.5	-

FOS: Factor de Seguridad Operacional

6.10 Respuesta sísmica del dique

Se espera que el dique experimente una cierta deformación durante el sismo de diseño. Las deformaciones se calcularon usando el método Hynes-Griffin y Franklin (1984). En

la Tabla 6.8 se muestran las deformaciones calculadas. Se uso una aceleración pico particular del terreno de 0.4 g para el análisis del dique final.

Tabla 6.8 Desplazamiento estimado del dique

ETAPA	SECCIÓN	DESPLAZAMIENTO CALCULADO (cm)	
		MEDIO	MEDIO + 1 DESVIACIÓN STANDAR
Final	A-A'	< 10	<10
	B-B'	< 10	30

7. DISEÑO DEL REVESTIMIENTO

7.1 Generalidades

Esta sección presenta la evaluación de la necesidad de un sistema de revestimiento para el depósito de relaves. Se consideraron tecnologías alternativas de revestimiento en el análisis y se desarrollaron cálculos de fugas para cada sistema, con el fin de ayudar en la selección del sistema de revestimiento. El objetivo del sistema de revestimiento es minimizar la potencial descarga de metales disueltos hacia las aguas subterráneas y hacia el río Piura, principalmente luego del cierre. Durante las operaciones, el agua de filtraciones se coleccionará hacia una canaleta de recolección de filtraciones o fluirá por la sub-superficie y se dirigirá hacia el tajo abierto, para ser bombardeada nuevamente hacia el depósito de relaves. Al cierre, el agua de las filtraciones podría afectar la calidad del agua en el río Piura durante época de estiaje. A continuación se resumen las potenciales cargas de metales disueltos provenientes de los dos depósitos de relaves:

- **Poza de óxidos:** el agua sobrenadante de la poza de óxidos puede tener niveles bajos (residuales) de cianuro y existe una potencial preocupación con la filtración de soluciones de cianuro provenientes del depósito que pudieran ingresar hacia el sistema de aguas subterráneas y posteriormente al río Piura. Otros metales de potencial preocupación incluyen el mercurio y el cobre. El mercurio se identificó en sólo una de las dos pruebas del ciclo cerrado (Tabla 4.9, Sección 4.3 de este informe), y posiblemente esté asociado con la baritina, en la forma de una amalgama de mercurio-plata en la mina tipo SDBA, que representa únicamente una parte del mineral oxidado y que se explotará principalmente en el Año 3 y en la primera mitad del Año 4 de las operaciones.
- **Poza de sulfuros:** La poza de sulfuros almacenará relaves y roca estéril con alto contenido de sulfuros, los cuales si se exponen al oxígeno y al agua se oxidarían y podrían generar drenaje ácido de roca. Durante las operaciones, el depósito se saturará con la pulpa de relaves y se controlará el drenaje de agua ácida. Al cierre, será necesario mantener la saturación de los relaves o proporcionar una barrera de oxígeno. La saturación podría mantenerse ya sea limitando las pérdidas por filtración, o agregando agua a la superficie de relaves para mantener las condiciones de

saturación. Sin embargo, durante un largo período de clima seco, sería difícil mantener la adición de agua sobre la superficie de relaves y por eso es necesario limitar el flujo potencial de las filtraciones y las pérdidas provenientes del depósito.

Los metales potenciales que preocupan en el agua sobrenadante del proceso de sulfuros incluyen: aluminio, arsénico, cadmio, cobre y molibdeno (Tabla 4.10, Sección 4.3 de este informe).

Los criterios para el diseño de la instalación de relaves son minimizar las pérdidas de filtraciones/carga de metales desde el depósito, de conformidad con las Mejores Prácticas Internacionales de Manejo y que cumplan con las características de agua Clase III en el río Piura, durante las condiciones de caudal bajo.

Se llevó a cabo una revisión detallada de las diversas alternativas para el revestimiento. En las siguientes secciones se presentan los resultados de esta evaluación y una descripción del sistema de revestimiento recomendado.

7.2 Pérdidas potenciales de filtración – ausencia de sistema de revestimiento

Sin un revestimiento, las pérdidas por filtración, estarían controladas por la conductividad hidráulica de los relaves, luego de que se establezca una playa de relaves sobre toda la base del depósito. Basado en los resultados de análisis de consolidación para los relaves de sulfuros, se espera que la conductividad hidráulica de estos varía desde un valor de 9.0×10^{-7} cm/seg para el relave moderadamente consolidado, hasta 2.3×10^{-7} cm/seg para un relave totalmente consolidado, con una presión de sobrecarga de 800 kPa.

La velocidad a la cual circularía el agua a través del relave de sulfuros, estaría inicialmente regida por la ley de Darcy, ya que el depósito estará totalmente saturado.

$$q = Ki$$

La percolación vertical a través de las diferentes capas, bajo presión constante (es decir, con una carga hidráulica razonablemente constante sobre el relave), la gradiente de carga piezométrica en la dirección del flujo es la unidad.

$$i = dh / dl = 1$$

Por lo tanto, el régimen de flujo (q) es igual a la conductividad hidráulica (K);

$$q = K$$

Los mayores índices de filtración se presentarán al inicio de la operación, antes de la cobertura de la base del depósito con relaves. Una vez que los materiales de la cimentación estén totalmente cubiertos con relaves, los relaves no consolidados, controlarán las pérdidas esperadas por filtración, las que se espera se reduzcan aproximadamente 10 L/seg.

Por lo tanto, la tasa más baja de posible filtración proveniente del depósito de sulfuros (basado en una conductividad hidráulica de 2.3×10^{-7} cm/seg) sería de aproximadamente 3.2 L/seg. Esta tasa se daría cerca al final de la vida de la mina, con 30 m de presión de sobrecarga (equivalente a casi 800 kPa).

Se consideraron también otras tecnologías, tales como la colocación de los relaves en celdas para promover la consolidación y su desaturación para reducir la conductividad hidráulica. No obstante, éstas tienen un mayor grado de incertidumbre y aumentarían el riesgo de oxidación durante las operaciones y podrían presentarse mayores niveles de metales, por lo que, no fueron considerados para este diseño.

7.3 Opciones de revestimiento

7.3.1 Materiales de revestimiento

El material de revestimiento podría consistir de: arena fina mezclada con bentonita; bentonita compactada; arcilla compactada; revestimiento de arcilla y geosintético (GCL); geomembrana (HDPE o PVC); relaves consolidados naturalmente o una combinación de estos materiales. En las siguientes secciones se analiza de la efectividad de cada uno de estos materiales.

Revestimiento de arcilla bentonítica

Cerca al pueblo de Sullana, se ha ubicado un importante depósito de arcilla bentonítica aproximadamente 25 km al oeste de Tambogrande. Las pruebas preliminares de dicho material indican que tiene una conductividad hidráulica bastante baja (3×10^{-10} cm/s) y una capacidad de intercambio catiónico/iónico alta. La baja conductividad proporciona un sistema de revestimiento natural de alta calidad al depósito, mientras que su alta capacidad de intercambio catiónico/iónico permite aprovechar su capacidad de absorber metales.

Se podría preparar una capa de baja permeabilidad mezclando 10% de bentonita con arena fina proveniente del Río Piura. El material podría mezclarse in situ usando una “amasadora”. El material se colocaría en capas de 300 mm de espesor y el material sería luego regado para permitir que la bentonita se hidrate. Finalmente, cada capa sería compactada con cuatro pasadas con un rodillo vibrador de tambor de 10 ton. La permeabilidad estimada in-situ (3×10^{-10} cm/s). se controlaría mediante la dosificación de bentonita.

El material bentonítico podría también colocarse sin mezclarla con la arena. Se llevarán a cabo mezclas de ensayo en la etapa de diseño de detalle, para determinar la mezcla óptima que permita cumplir con los criterios de conductividad hidráulica requeridos.

Geomembranas

Las geomembranas proporcionan una barrera extremadamente efectiva para controlar la filtración. Cuando ha sido adecuadamente diseñada y construida, una cobertura de geomembrana eliminará hasta el 99% de las filtraciones. En la actualidad se están usando una variedad de geomembranas en la industria minera para el revestimiento de depósitos de relaves. La diferencia básica entre éstas es el material y/o método de fabricación. Los materiales más comúnmente usados son PVC (Cloruro de polivinilo), HDPE (Polietileno de alta densidad) y LLDPE (Polietileno de revestimiento de baja densidad). Se eligió un revestimiento de HDPE debido a su alta resistencia y amplio uso en la industria minera para estas aplicaciones. El LLDPE también pudo haberse considerado como una alternativa adecuada.

Los materiales de geomembrana tienen una conductividad hidráulica bastante baja (2×10^{-13} cm/s) y las principales pérdidas por fugas se dan por lo general a través de los defectos del revestimiento. Para la evaluación se han utilizado procedimientos normalizados EPA para calcular los potenciales defectos del revestimiento y las pérdidas por filtración. La variable más importante es el programa de control de calidad (QA/QC) que se cumple durante la construcción, y para el análisis que se presenta en secciones posteriores, se han evaluado dos niveles de calidad de instalación (Bueno y Regular) de acuerdo con las Mejores Prácticas recomendadas por la EPA de los Estados Unidos de Norteamérica.

Se han considerado una serie de escenarios diferentes – 1) revestimiento único de HDPE con una capa subyacente de drenaje de grava; 2) doble revestimiento de HDPE con una

capa intermedia de drenaje de grava; 3) revestimiento compuesto de HDPE-suelo y varias combinaciones de revestimiento, drenajes y suelo bentonítico.

Revestimiento de arcilla y geosintético (GCL)

Los revestimientos de arcilla y geosintético (GCL) consisten de capas de arcilla bentonítica “en sándwich” entre dos capas de geotextil. Cuando la arcilla está hidratada ésta tiene una conductividad hidráulica bastante baja. Debido a la disponibilidad local de bentonita localmente, esta opción no se consideró más.

Drenajes

Por lo general, los drenajes se usan en sistemas de revestimiento compuesto para reducir la carga hidráulica que actúa sobre el revestimiento. Los drenajes también se usan a manera de capas de detección de fugas entre las capas de baja permeabilidad. Los drenajes pueden construirse usando arena y grava o empleando drenes del tipo geosintético. Una preocupación potencial con el uso de drenes, es que éstos pueden proporcionar una ruta preferencial de flujo en el caso de una falla en el revestimiento o en alguna parte de los componentes de recolección.

7.3.2 Sistemas compuestos de revestimiento

La efectividad del sistema de revestimiento puede mejorarse con el uso de sistemas compuestos de revestimiento que incluyen variaciones del material de revestimiento y del sistema de drenaje. La adición de drenajes disminuye la carga hidráulica que actúa sobre el revestimiento, lo que reduce la filtración. Las combinaciones consideradas incluyeron las siguientes:

- Caso 1: Revestimiento de una geomembrana, con dren superior para reducir la carga hidráulica sobre el revestimiento.

- Caso 2: Revestimiento de una geomembrana, con una capa de suelo de baja permeabilidad y un dren superior.
- Caso 3: Revestimiento de doble geomembrana con dren superior y capa de drenaje para detección de fugas entre las capas de geomembrana.
- Caso 4: Una geomembrana con dren superior y capa drenaje de detección de fugas, sobre una capa de suelo bentonítico de 0.5 m de espesor
- Caso 5: Una geomembrana, sobre una capa de suelo-bentonita de 0.3 m de espesor

7.4 Evaluación del sistema de revestimiento

Para la selección del sistema de revestimiento se consideró la reducción en las pérdidas por filtración y la preocupación potencial, en el largo plazo de la desaturación de los relaves. Se llevaron a cabo modelos de filtración para variaciones en la permeabilidad de los relaves y en la calidad de la instalación de geomembrana (buena o regular): El modelo de Evaluación Hidráulica del Funcionamiento de los Rellenos (Hydraulic Evaluation of Landfill Performance –HELP-) es un programa de computadora que realiza estimados del balance hídrico para depósito de estériles. La finalidad primaria del modelo es permitir la comparación de alternativas de diseño, sobre la base de su rendimiento. El modelo HELP fue desarrollado por el U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, en virtud de un acuerdo de cooperación con la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) para apoyar a los programas RCRA y Superfund. La EPA recomienda el uso del modelo HELP y se exige el uso de éste en la mayor parte de los Estados Unidos para evaluar los diseños de cierre de instalaciones de manejo de desechos, tanto peligrosos y como no peligrosos.

Haciendo uso del programa HELP, se hizo un total de 32 simulaciones de filtración, incluyendo un análisis de sensibilidad. Se usaron seis materiales en los modelos de filtración (cobertura de grava, relaves, geonet, geomembrana, malla de bentonita, y mezcla de suelo y bentonita). Se usó el caso de un relave moderadamente consolidado

con una conductividad hidráulica de 9.0×10^{-7} cm/seg para el escenario más desfavorable y para el escenario más favorable consideró un relave totalmente consolidado, con una conductividad hidráulica de 2.3×10^{-7} cm/s.

Los estimados de filtración se han hecho sobre la base de toda el área de depósito/revestimiento (es decir, los depósitos de óxidos y de sulfuros combinados). Los resultados de las simulaciones del modelo se presentan en la Tabla 7.1 y se resume a continuación:

- La filtración proveniente del depósito sin revestimiento ha sido estimado entre 10 y 20 L/s, basándose en el mejor y peor escenario para la permeabilidad de los relaves, respectivamente.
- Con el revestimiento, se puede reducir la filtración en un 88 a 99% (dependiendo del diseño del revestimiento y la calidad de la instalación)
- Si ha sido adecuadamente instalado (es decir, con un buen control de calidad), una capa de la geomembrana simple reducirá la filtración casi tanto como un revestimiento de geomembrana doble bien instalado o un revestimiento de suelo compuesto. Sin embargo, si la calidad de la instalación de geomembrana es deficiente, el revestimiento doble o compuesto será aproximadamente 20% mejor en prevenir las fugas hacia los suelos de la cimentación.
- El Caso 2 (geomembrana única con una barrera inferior de suelo) fue la más efectiva para reducir la filtración. Sin embargo, el Caso 3 (doble geomembrana), Caso 4 (geomembrana con capa de bentonita, y drenaje doble) y Caso 5 (geomembrana con bentonita/suelo de baja permeabilidad) también fueron bastante efectivas en reducir la filtración.
- Para reducir la filtración a menos de 1 L/seg proveniente de todo el depósito, se necesitaría instalar un revestimiento de alta calidad (es decir, se requeriría una muy buena gestión de QA/QC durante la fabricación e instalación del revestimiento).
- Caso 5, un revestimiento de HDPE con una capa de arcilla bentonítica resultó ser la alternativa más eficiente.

Tabla 7.1 Resultados de la simulación de filtración.

CASO	PERMEABILIDAD DE LOS RELAVES (AL CIERRE)	CALIDAD DE GEOMEMBRANA	FILTRACION			
			(mm/año)	(m ³ /año)	(l/s)	
Caso Base ¹ (sin revestimiento)	A	Mejor caso	N/A	165	29,4215	9.33
	B	Peor caso	N/A	347	61,7384	19.58
Caso 1 (geomembrana única con drenaje)	A	Mejor caso	Bueno	9	15,728	0.50
	B		Regular	22	39,798	1.26
	C	Peor caso	Bueno	17	30,248	0.96
	D		Regular	44	78,485	2.49
Caso 2 (geomembrana única con barrera de suelo inferior y drenaje)	A	Mejor caso	Bueno	9	16,040	0.51
	B		Regular	15	26,161	0.83
	C	Peor caso	Bueno	15	27,212	0.86
	D		Regular	30	54,216	1.72
Caso 3 (Geomembrana doble con drenaje doble)	A	Mejor caso	Bueno	8	14,100	0.45
	B		Regular	22	38,637	1.23
	C	Peor caso	Bueno	9	15,620	0.50
	D		Regular	26	46,703	1.48
Caso 4 (geomembrana superior, malla de bentonita con doble drenaje)	A	Mejor caso	Bueno	8	14,423	0.46
	B		Regular	21	37,927	1.20
	C	Peor caso	Bueno	9	16,019	0.51
	D		Regular	26	46,097	1.46
Caso 5 (Geomembrana superior, capa de bentonita, sin drenaje)	A	Mejor caso	Bueno	0.95	1,691	0.05
	B		Regular	1	1,780	0.06
	C	Peor caso	Bueno	0.95	1,691	0.05
	D		Regular	1	1,780	0.06

Notas: ¹ En base el flujo promedio en el Caso Base A y Caso Base B. Flujo promedio = 14.453 l/s.

² El número de curva de escorrentía SCS en estos cálculos se computó a partir de un número de curva especificado por el usuario de 99.4, una pendiente de la superficie de 0.6% y una longitud de pendiente de 500 m.

Resumen

Un sistema de revestimiento único depende en gran medida de la efectividad del programa de QA/QC, por lo que sería más recomendable el uso de un sistema de revestimiento doble o compuesto, que de un sistema de revestimiento único. El revestimiento de geomembrana HDPE/arcilla bentonítica resulta ser el sistema de revestimiento más efectivo. La bentonita tendrá además, la ventaja agregada de poder absorber los metales disueltos.

7.5 Evaluación de la influencia de la filtración en el Río Piura

Durante las operaciones, la filtración drenará hacia el tajo abierto y será recolectada y devuelta al depósito de relaves. Se han utilizado el modelo tridimensional de agua subterránea MODFLOW para evaluar el transporte de la potencial filtración y el destino de los contaminantes provenientes del depósito de relaves hacia el Río Piura (Klohn Crippen, 2002). La etapa crítica del proyecto corresponde al Período de cierre, cuando se restablecerá el régimen de flujo de agua subterránea y éste discurrirá hacia el Río Piura.

En las Tabla 7.2 y Tabla 7.3, se consigna un estimado de las concentraciones de metales que podrían presentarse en el río Piura durante la época de estiaje. Dichos estimados se basan en los siguientes supuestos:

- La hipótesis conservadora que la atenuación tenderá a cero a medida que la filtración se desplace a través de la bentonita. La bentonita tiene una alta capacidad para atenuar los metales y esto proporcionará un factor adicional de seguridad, que no ha sido calculado. Se llevará a cabo un trabajo más detallado sobre este aspecto, durante la etapa del diseño en detalle.
- La calidad del agua no refleja la calidad actual del agua subterránea en el río Piura;

- La calidad del agua de la carga contaminante será la misma que el agua sobrenadante del proceso, tanto para las operaciones de proceso de óxidos como para la de sulfuros.
- No se ha considerado atenuación adicional para el cianuro, debido a la volatilización y a su degradación por los rayos solares.

Tabla 7.2 Aproximaciones de la calidad del agua en el Río Piura después del cierre debido a un régimen de filtración fugitiva de 1L/seg desde la poza de óxidos

Parámetro	Mayor concentración registrada en la solución CND tratada (mg/L)	Concentración de la carga utilizada (mg/L)	Carga hacia el Río, sobre la base de la mayor concentración registrada (mg/sec)	Límite para Agua Clase III (mg/L)	10	50	100	500	1000	5000
Al	0.06	0.06	0.06	NV	0.006	0.0012	0.0006	0.0001	0.0001	0.0000
Alkalinity	203	203	203	NV	20.3	4.0600	2.0300	0.4060	0.2030	0.0406
Sb	<0.05	0.025	0.03	NV	0.003	0.0005	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000
As	<0.01	0.005	0.01	0.200	0.001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
Ba	0.09	0.09	0.09	NV	0.009	0.0018	0.0009	0.0002	0.0001	0.0000
Be	0.04	0.04	0.04	NV	0.004	0.0008	0.0004	0.0001	0.0000	0.0000
B	<0.001	0.0005	0.00	NV	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Br	<0.03	0.015	0.02	NV	0.002	0.0003	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
Cd	<0.005	0.0025	0.00	0.050	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Ca	551	551	551	NV	55.1	11.0200	5.5100	1.1020	0.5510	0.1102
Cl-	33.9	33.9	33.9	NV	3.39	0.6780	0.3390	0.0678	0.0339	0.0068
Cr	<0.02	0.01	0.01	1.00	0.001	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
CN(T)	0.73	0.5	0.50	0.200	0.050	0.0100	0.0050	0.0010	0.0005	0.0001
CNWAD	0.59	0.2	0.20	0.200	0.020	0.0040	0.0020	0.0004	0.0002	0.0000
Co	0.12	0.12	0.12	NV	0.012	0.0024	0.0012	0.0002	0.0001	0.0000
Cu	2.12	2.12	2.12	0.500	0.212	0.0424	0.0212	0.0042	0.0021	0.0004
F	5	5	5.00	NV	0.500	0.1000	0.0500	0.0100	0.0050	0.0010
Au	3.24	3.24	3.24	NV	0.324	0.0648	0.0324	0.0065	0.0032	0.0006
Fe	<0.02	0.01	0.01	1.00	0.001	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
Pb	<0.02	0.01	0.01	0.100	0.001	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
Mg	0.91	0.91	0.91	NV	0.091	0.0182	0.0091	0.0018	0.0009	0.0002

Tabla 7.2 Aproximaciones de la calidad del agua en el Río Piura después del cierre debido a un régimen de filtración fugitiva de 1L/seg desde la poza de óxidos (Cont.)

Parámetro	Mayor Concentración registrada en la Solución CND tratada (mg/L)	Concentración de la Carga utilizada (mg/L)	Carga hacia el Río, sobre la base de la mayor concentración registrada (mg/sec)	Límite para Agua Clase III (mg/L)	10	50	100	500	1000	5000
Mn	0.044	0.044	0.04	0.50	0.004	0.0009	0.0004	0.0001	0.0000	0.0000
Hg	0.14	0.14	0.14	0.010	0.014	0.0028	0.0014	0.0003	0.0001	0.0000
Mo	0.026	0.026	0.03	NV	0.003	0.0005	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000
NH3 -N	31	31	31	NV	3.1	0.6200	0.3100	0.0620	0.0310	0.0062
Ni	0.06	0.06	0.06	0.002	0.006	0.0012	0.0006	0.0001	0.0001	0.0000
NO2	0.77	0.77	0.77	0.10	0.077	0.0154	0.0077	0.0015	0.0008	0.0002
NO3	1.94	1.94	1.94	NV	0.194	0.0388	0.0194	0.0039	0.0019	0.0004
P	0.18	0.18	0.18	NV	0.018	0.0036	0.0018	0.0004	0.0002	0.0000
K	9.91	9.91	9.91	NV	0.991	0.1982	0.0991	0.0198	0.0099	0.0020
Se	0.29	0.29	0.29	0.05	0.029	0.0058	0.0029	0.0006	0.0003	0.0001
Ag	0.5	0.5	0.50	NV	0.050	0.0100	0.0050	0.0010	0.0005	0.0001
SO4	2410	2410	2410	NV	241	48.2000	24.1000	4.8200	2.4100	0.4820
Na	614	614	614	NV	61.4	12.2800	6.1400	1.2280	0.6140	0.1228
Te	<0.1	0.05	0.05	NV	0.005	0.0010	0.0005	0.0001	0.0001	0.0000
Thiosalts	<10	5	5.00	NV	0.500	0.1000	0.0500	0.0100	0.0050	0.0010
Sn	<0.1	0.05	0.05	NV	0.005	0.0010	0.0005	0.0001	0.0001	0.0000
TSS	6	6	6	NV	0.600	0.1200	0.0600	0.0120	0.0060	0.0012
Zn	0.074	0.074	0.07	25	0.007	0.0015	0.0007	0.0001	0.0001	0.0000
	Concentración de la carga considerando degradación natural esperada en el depósito de relaves CNWAD <0.005 mg/L									
	Carga calculada en base al límite de detección máximo reportado por el Laboratorio									
	Excedencia de los Límites Peruanos de Calidad de Agua para Caudales de Río									
NV	No valores									

Tabla 7.3 Aproximaciones de la calidad del agua en el Río Piura después del cierre debido a un regimen de filtración de 1L/seg desde la poza de sulfuros

Parámetro	Mayor Concentración registrada en las pruebas de Ciclo Cerrado (mg/L)	Concentración de la Carga utilizada (mg/L)	Carga hacia el Río, sobre la base de la mayor concentración registrada (mg/sec)	Límite para Agua Clase III (mg/L)						
					10	50	100	500	1000	5000
Al	0.42	0.42	0.42000	NV	0.0420	0.0084	0.0042	0.0008	0.0004	0.0001
Sb	0.032	0.032	0.03200	NV	0.0032	0.0006	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000
As	0.019	0.019	0.01900	0.200	0.0019	0.0004	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
Ba	1.55	1.55	1.55000	NV	0.1550	0.0310	0.0155	0.0031	0.0016	0.0003
Be	0.001	0.001	0.00100	NV	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
B	0.06	0.06	0.06000	NV	0.0060	0.0012	0.0006	0.0001	0.0001	0.0000
Cd	0.005	0.005	0.00500	0.050	0.0005	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
Ca	226	226	226	NV	22.6	4.5200	2.2600	0.4520	0.2260	0.0452
Cr	<0.02	0.01	0.01000	1.00	0.0010	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
Co	0.004	0.004	0.00400	NV	0.0004	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Cu	0.35	0.35	0.35000	0.500	0.0350	0.0070	0.0035	0.0007	0.0004	0.0001
Fe	2.1	2.1	2.1	1.00	0.2100	0.0420	0.0210	0.0042	0.0021	0.0004
Pb	0.033	0.033	0.03300	0.100	0.0033	0.0007	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000
Mg	2.39	2.39	2.39000	NV	0.2390	0.0478	0.0239	0.0048	0.0024	0.0005
Mn	0.062	0.062	0.06200	0.50	0.0062	0.0012	0.0006	0.0001	0.0001	0.0000
Hg	<0.0001	0.00005	0.00005	0.010	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Mo	0.11	0.11	0.11000	NV	0.0110	0.0022	0.0011	0.0002	0.0001	0.0000

Tabla 7.3 Aproximaciones de la calidad del agua en el Río Piura después del cierre debido a un regimen de filtración de 1L/seg desde la poza de sulfuros (Cont.)

Parámetro	Mayor concentración registrada en las pruebas de ciclo cerrado (mg/L)	Concentración de la Carga utilizada	Carga hacia el Río, sobre la base de la mayor concentración registrada (mg/sec)	Límite para Agua Clase III (mg/L)	10	50	100	500	1000	5000
		(mg/L)								
Ni	<0.02	0.01	0.01000	0.002	0.0010	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
P	0.33	0.33	0.33000	NV	0.0330	0.0066	0.0033	0.0007	0.0003	0.0001
Se	0.15	0.15	0.15000	0.05	0.0150	0.0030	0.0015	0.0003	0.0002	0.0000
Ag	0.03	0.03	0.03000	NV	0.0030	0.0006	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000
SO4	433	433	433	NV	43.30	8.6600	4.3300	0.8660	0.4330	0.0866
Na	71.2	71.2	71.2	NV	7.12	1.4240	0.7120	0.1424	0.0712	0.0142
Te	<0.1	0.05	0.05000	NV	0.0050	0.0010	0.0005	0.0001	0.0001	0.0000
Sn	<0.032	0.016	0.01600	NV	0.0016	0.0003	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
Zn	0.027	0.027	0.02700	25	0.0027	0.0005	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000
	Carga calculada tomando como base la mitad del límite de detección									
	Excedencia de los Límites Canadienses de Calidad de Agua para Caudales de Río									
NV	No valores									

El caudal mediano anual en el Río Piura es de 8,300 L/s, y el caudal mediano bajo es de 900 L/s. Durante períodos secos extremos el caudal puede reducirse significativamente. El monitoreo del caudal del río inferior, para los caudales bajos es muy difícil y los sistemas existentes tienen un límite inferior de medición de 100 L/s. Las mediciones de línea de base del caudal indican que caudales diarios medios menores a 100 L/s se podrían presentar aproximadamente 4% de las veces. De igual manera, se ha seleccionado un valor mínimo de caudal bajo de 10 L/s como la condición extrema de influencia de caudal bajo. Durante los períodos existentes de caudal bajo extremo, la calidad del agua en el Río Piura se ve degradada en forma natural debido a la influencia del flujo de agua subterránea salina del basamento.

Resumen

El análisis de carga de metales y de filtración, indica que la influencia potencial sobre el Río Piura al cierre es baja (es decir, menos de un día cada dos años). Los factores de mitigación, no considerados, incluyen la capacidad del revestimiento de arcilla bentonítica para atenuar significativamente la fuga metales disueltos.

7.6 Diseño del revestimiento

El modelo de filtración indica que un sistema compuesto de revestimiento suelo/geomembrana es efectivo para reducir las pérdidas potenciales por filtración. El modelo también indica que un sistema de drenaje reducirá aún más las pérdidas por filtración. Sin embargo, existe la preocupación, al cierre, de que el drenaje promoverá la consolidación de los relaves y la desaturación del relave almacenado. Es por ello que el sistema de revestimiento propuesto consiste de una geomembrana compuesta de HDPE, sobre una capa de suelo modificado de bentonita de 0.5 m de espesor. No se instalará un drenaje. Un revestimiento de LLDPE es también un material de geomembrana que sería técnicamente equivalente y que cuenta con la ventaja adicional de tener una mayor resistencia friccional, siendo más flexible que el HDPE. El revestimiento de HDPE de 60 mil de espesor se colocará sobre la capa preparada de suelo/bentonita. Se llevará a cabo un programa de QA/QC para garantizar la

calidad de instalación y del revestimiento. El revestimiento de HDPE necesitará ser texturizado en las siguientes aplicaciones:

- Texturizado en el fondo para el que se colocará sobre el talud aguas arriba del dique;
- Texturizado en ambos lados, para el que se colocará sobre el talud aguas arriba del dique, donde se construirán las rampas de roca estéril.
- Texturizado en el fondo, para los taludes del depósito que tengan una pendiente de más de 3H:1V.

Se llevarán a cabo mezclas de ensayo del suelo modificado con bentonita con la finalidad de confirmar el porcentaje requerido de bentonita y la metodología de mezcla y compactación. El ensayo inicial podría comprender lo siguiente:

- Colocación de una capa de 100 mm de espesor (suelta) de arena de río, obtenido del cauce del río Piura. La arena tiene una gradación fina media con aproximadamente 5% de limo.
- Esparcidos de la bentonita y mezcla con un disco Rome o equivalente. El ensayo inicial sería con un contenido de 10% de bentonita.
- El material será regado y compactado, con por lo menos cinco pasadas con un rodillo de tambor vibratorio de 10 ton.

Se llevarán a cabo pruebas de permeabilidad in situ o de laboratorio, para determinar la conductividad hidráulica del material. Se requiere un valor mínimo de 3×10^{-10} cm/s.

8. MANEJO DE ROCA ESTERIL Y MATERIAL DE CUBIERTA

8.1 Generalidades

Los suelos de cubierta y la roca estéril de la mina se excavarán a lo largo de la vida de toda la mina. En la Tabla 8.1 se resumen las principales fuentes de materiales y sus lugares de colocación.

Tabla 8.1 Resumen de los materiales de desecho

MATERIAL	VOLUMEN (Mm ³)		
	CONSTRUCCIÓN DE DIQUE	DEPÓSITO	DEPOSITOS DE ROCA ESTERIL
Arenas de cubierta	4.1	-	-
Arena/arcilla de cubierta (material de desecho)	-	-	4.1
Roca estéril de sulfuros (que genera ácido)	-	11.4	-
Roca estéril que potencialmente genera ácido	-	12.5	-
Roca estéril que no genera ácido	14	-	1.4

La roca estéril que genera ácido se almacenará conjuntamente con los relaves, encapsulando así la roca estéril en una condición saturada de baja permeabilidad, dentro de un depósito de baja permeabilidad y doble revestimiento.

Se construirán cerca a la mina depósitos para la roca estéril que no genera aguas ácidas y del material de cubierta.

8.2 Botadero para suelo de cubierta

Se requiere de un botadero para suelo de cubierta para almacenar las arenas aluviales, limos y arcillas excavadas del tajo abierto, así como para los materiales sueltos excavados de los cimientos del depósito de relaves. Esta pila contendrá material que estará muy mojado o que no sea adecuado para su uso como material de construcción.

Además, se ubicará al norte de vía de acarreo, cerca al depósito de relaves, una pila aparte que contendrá el suelo orgánico del desbroce y un banco de semillas (aproximadamente 0.5 m de suelo). Este material se usará en la rehabilitación y cierre del área del proyecto de Tambogrande. En el Plano B-33002 se muestra la ubicación de estas pilas.

En total, se requerirá almacenar 4.1 millones m³ de material de cubierta, de los cuales se espera que 400,000 m³ se almacenarán en la pila para suelo orgánico y los 3.7 millones m³ restantes en la pila de material de cubierta. Para lograr estos volúmenes de almacenamiento, se estima que las elevaciones de cresta de la pila de material de cubierta y de la pila de suelo orgánico estarían alrededor de 89 y 75 msnm respectivamente.

Inicialmente, los taludes podían construirse con una pendiente de 6V:1H debido a la esperada baja resistencia al corte de los materiales. A medida que el material drene y se consolide, las pendientes pueden hacerse más pronunciadas, hasta llegar a aproximadamente 3H:1V.

8.3 Botadero de roca estéril

Cerca al lugar de la planta se ubicará un botadero de roca estéril, el mismo que se usará para el almacenamiento temporal de la roca estéril que no genera ácidos. Esto podría ser necesario si la roca estéril no pudiera colocarse en el dique debido a problemas con el programa de construcción. Este botadero también se usaría para almacenar el material que se requerirá para la cobertura de cierre final para el depósito de relaves.

8.4 Co-disposición de roca de desecho que genera ácidos, dentro del depósito de relaves

Con el fin de evitar la oxidación, la roca estéril que genera ácidos será dispuesta junto con los relaves. La Co-disposición de la roca estéril con los relaves proporciona una

mejora ambiental significativa sobre la disposición convencional de la roca estéril. Los relaves rellenarán los vacíos de la roca de desecho disminuyendo así la permeabilidad del depósito. Además, la roca estéril estará completamente saturada. La alternativa de Co-disposición se considera como la práctica más adecuada para la disposición de roca estéril que genera ácido.

La colocación de la roca estéril en el depósito de relaves se hará a través de rampas construidas alrededor del perímetro del mismo, conduciéndola hacia los relaves. Estas rampas tendrán un espaciamiento nominal de 300 m y una pendiente lo suficientemente plana para permitir que los camiones de transporte de la mina retrocedan en forma segura hacia el depósito y descarguen la roca. La roca estéril así descargada se esparcirá con un pequeño bulldozer, en celdas de aproximadamente 100m a 200 m de diámetro y 4 m de espesor. Una vez que la roca ha sido colocada y esparcida, los relaves serán descargados sobre ésta para sumergir la roca.

Los principales aspectos relacionados con la colocación de la roca estéril en el depósito son:

- Protección del revestimiento. Se deberá tener mucho cuidado para garantizar que existe suficiente espesor de relaves sobre del revestimiento, antes de colocar roca estéril en las celdas. De requerirse, se podría colocar una capa del material aluvial excavado, proveniente de la pila de material de cubierta, si no existiera suficiente relave disponible.
- La roca estéril podría mezclarse con los relaves tan pronto como sea posible. Si la roca estéril no se dispersara en forma efectiva dentro de los relaves, se podrían formar zonas segregadas de roca estéril. Los vacíos se llenarían con agua y podría ocurrir que no se rellenen con relaves, aumentando el volumen de agua encerrada en los relaves y reduciendo así la capacidad de almacenamiento del depósito.
- Existe el potencial de que si la roca estéril es expuesta por un período largo de tiempo, los productos de oxidación podrían alterar la calidad del agua de la poza de relaves y potencialmente, modificar los estimados de carga de metales de la filtración proveniente del depósito.

La calidad del agua del depósito de relaves se monitoreará para confirmar las hipótesis de diseño de la calidad del agua y para proporcionar una base para el ajuste de los métodos de disposición de roca estéril, de esto ser necesario.

- Clasificación de la roca estéril: La roca de estéril que no genera ácidos (NGA) está compuesta principalmente por dioritas y rocas máficas. La mayoría de la roca estéril NGA se ubica lejos de la zona principal del depósito mineral y puede ser identificada en el campo. También se implementará un plan de manejo para llevar a cabo la caracterización DAR de la roca estéril durante las operaciones.

La Figura 8.1 muestra el concepto para la disposición de la roca estéril en el depósito de relaves.

Figura 8.1 Planteamiento de la Disposición de Relaves y Roca Estéril

9. MANEJO DE AGUA Y DE LOS RELAVES

9.1 Canales de derivación

Varios cauces de agua efímeras pasan por la zona propuesta para el depósito de relaves. Estos serán derivados alrededor del depósito, tal y como se muestra en el Plano B-33013. Se han diseñado dos canales de derivación para llevar esta escorrentía superficial lejos de la base de la presa de relaves. Tal como se muestra en los planos, el Canal de Derivación Este se ubica en el lado este del área de contención de relaves y el Canal de Derivación Norte se ubica en el lado norte de la misma. Los canales han sido diseñados para una lluvia con un período de retorno de 50 años, usando el Método Racional para calcular los caudales de diseño. A continuación se presentan los parámetros de diseño de estos canales.

Tabla 9.1 Parámetros de diseño del canal de derivación

CANAL DE DERIVACIÓN	AREA DE CAPTACIÓN (km ²)	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (h)	CAUDAL DE DISEÑO PARA UN PERÍODO DE RETORNO DE 50 AÑOS (m ³ /s)
Este	1.4	1.4	19.6
Norte	6.1	2.0	63.3

El Canal de Derivación Este descargará en un pequeño curso de agua existente, mientras que el Canal de Derivación Norte descargará en la Quebrada Carneros. Los canales estarán revestidos con rip rap de diámetro reducido para minimizar la erosión durante el evento correspondiente al caudal de diseño.

9.2 Manejo del agua

Los depósitos de relaves de óxidos y de sulfuros se construirán a manera de diques anulares y no tienen un área de captación aguas arriba. Por ello, el manejo del agua se hará en función directa de la precipitación que cae sobre el depósito. Se requiere contar con un almacenamiento adecuado para almacenar el caudal de diseño, con una tolerancia para las olas. Alternativamente, se podrían instalar vertederos de emergencia durante varias etapas de la vida del depósito. El criterio mínimo de

diseño durante las operaciones será el manejo de la precipitación correspondiente a un período de retorno de 1,000 años. La precipitación podría producirse a lo largo de un mes, tres meses o un año. La selección de la longitud del período de avenidas se basa en la seguridad de la estructura y el potencial impacto ambiental de descargar agua durante períodos de alto caudal. Después de un período de un mes de lluvia alta, sería factible instalar una tubería de decantación para descargar en forma segura el agua y mantener el borde libre de diseño y las exigencias de manejo del agua. En el caso de la poza de óxidos, en donde el agua decantada puede contener bajos niveles de cianuro, se seleccionó un período de tres meses como el período de almacenamiento, antes de la descarga del agua excedente, la misma que podría descargarse también en la poza de sulfuros, si fuera necesario.

9.3 Pozas de sedimentación

Las pozas de sedimentación se usarán para garantizar la claridad del agua de escorrentía proveniente de las áreas de botaderos de roca estéril y de la planta, antes de su descarga a la Quebrada Carneros. Estas se requieren para atrapar y contener los sedimentos en la escorrentía, antes de su descarga en cursos de agua naturales. Las tres áreas principales incluyen:

- Poza 1: Terraplenes sur-oeste de relaves y sección norte de la Pila de Suelo Orgánico.
- Poza 2: Pila de material de construcción y botadero de roca estéril.
- Poza 3: Planta, taller de mantenimiento camiones, construcción, oficinas, y laboratorios.

Las áreas de las pozas se determinaron teniendo en cuenta que se requiere en éstas 330m² de área de poza m³ de caudal (basado en los criterios recomendados por el Canadian Department of Fisheries and Oceans, 1993) para sedimentar partículas con un diámetro de más de 20 µm. En la Tabla 9.2 se dan los tamaños de las pozas, las

mismas que se dimensionaron sobre la base de los caudales para un período de retorno de 5 años.

Tabla 9.2 Parámetros de diseño de la poza de sedimentación

POZA	CAPTACIÓN (Ha)	COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA	Q ₅ (m ³ /s)	ÁREA SUPERFICIAL (Ha)
1	29	0.6	2.16	0.71
2	51	0.7	2.32	0.77
3	44	1.0	3.19	1.05

9.4 Balance de agua y recuperación

Durante la fase operativa de la mina, las fuentes de agua del depósito de relaves serán principalmente la pulpa de relaves, seguida por la precipitación y el agua proveniente del tajo abierto. En las Tablas 9.3 y 9.4 se presenta un resumen del balance hídrico del depósito de relaves para condiciones normales, secas y húmedas, tanto para las fases de óxidos como para la de sulfuros.

Tabla 9.3 Balance de agua del depósito de relaves para la fase de óxidos

FASE DE ÓXIDOS	NORMAL (L/s)	SECO (L/s)	HÚMEDO (L/s)
Precipitación	2	0	154
Agua del tajo abierto	4	0	242
Pulpa de relaves	124	124	124
Total Ingreso	130	124	520
Evaporación	24	30	24
Agua en poros del relave	20	20	20
Agua en los vacíos de la roca de desecho	0	0	0
Filtración bajo el revestimiento	1	1	1
Agua recuperada de relaves	85	73	101
Total salida	130	124	146
Requisitos de almacenamiento del depósito	0	0	374
Requisitos de almacenamiento del depósito (m ³)	0	0	970,000

Tabla 9.4 Balance de agua del depósito de relaves para la fase de sulfuros

FASE DE SULFUROS	NORMAL (L/s)	SECO (L/s)	HÚMEDO (L/s)
Precipitación	9	0	566
Agua del tajo abierto	11	0	373
Pulpa de relaves	517	517	517
Total Ingreso	537	517	1456
Evaporación	91	112	90
Agua en poros del relave	51	51	51
Agua en los vacíos de la roca de desecho	11	11	11
Filtración bajo el revestimiento	1	1	1
Agua recuperada de relaves	383	342	473
Total salida	537	517	626
Requisitos de almacenamiento del depósito (L/s)			830
Requisitos de almacenamiento del depósito (m ³)			2,153,000

Durante las fases de sulfuros y de óxidos, los relaves estarán saturados y un 100% del área del depósito se verá abierto de agua. La evaporación del agua desde la superficie de la laguna será la principal pérdida de agua desde el depósito de relaves, durante ambas fases. Otras fuentes de pérdida de agua serán la filtración a través del revestimiento y el almacenamiento de ésta como agua de poros en los relaves y en los vacíos de la roca estéril.

Para el cálculo del balance hídrico se ha asumido un valor de filtración de 1 L/s. El régimen de filtración de diseño es de menos de 0.1 L/s.

Durante la fase de óxidos, la roca estéril será no generadora de agua ácida y se usará como material de construcción o se enviará a los botaderos de desmonte. Por lo tanto, no se perderá agua hacia los vacíos de la roca estéril durante la fase de óxidos. La cantidad de agua retenida en los poros de los relaves dependerá de la tasa de producción y del porcentaje de sólidos dentro de los relaves, lo cual es una función de la gravedad específica y de la densidad seca de los relaves. La roca estéril generada durante la fase de sulfuros se almacenará en el depósito de relaves, para evitar la

generación de aguas ácidas. El agua retenida en los vacíos de la roca estéril se determinó por la porosidad de ésta, la tasa de disposición y la densidad de la roca.

Luego de la determinación de las pérdidas de agua y de los requisitos mínimos de agua fresca, se estableció la tasa máxima de recuperación. Las tasas de recirculación y los requisitos potenciales de capacidad de almacenamiento del depósito de relaves bajo condiciones climáticas normales y extremas, se basan en las tasas de recuperación máximas.

El depósito operará a manera de una instalación de “descarga cero” durante condiciones normales de operación. La variación normal de la acumulación media anual en volúmenes de agua será de aproximadamente 50,000 m³/mes durante la fase de óxidos y de 200,000 m³/mes durante la fase de sulfuros. Esto hará que el nivel del agua en el depósito varíe ligeramente. Durante un evento extremo de lluvias, como el de una tormenta de 30 días con un período de retorno de 10 años, el depósito almacenará un volumen adicional de 1,000,000 m³ durante la fase de óxidos y 2,200,000 m³ durante la fase de sulfuros. Con el fin de minimizar la probabilidad de descarga, se ha incorporado suficiente capacidad de almacenamiento de estos caudales en las etapas correspondientes a la elevación de la cresta de la presa, para permitir el almacenamiento de estos volúmenes incrementales de agua, los cuales representan una elevación de la cresta de algo más de 2 m para el depósito de óxidos y de 1 m para el depósito de sulfuros.

En el caso de presentarse un evento aún más extremo durante las operaciones mineras, se podrían instalar sifones sobre la cresta de la presa de relaves, para permitir que el agua descargue en la Quebrada Carneros. Se suspendería el bombeo desde el tajo abierto durante este tiempo para reducir el requisito de descarga. La descarga desde el depósito de relaves se permitirá sólo si la calidad del agua a ser descargada cumple con los criterios de calidad de descarga de efluentes del MEM. En el improbable caso que la calidad del agua de descarga del depósito de relaves no cumpliera con estos límites, el agua excedente podría enviarse temporalmente al tajo abierto.

10. PLAN DE MANEJO AMBIENTAL Y PLAN DE CIERRE

10.1 Plan de Manejo ambiental

Se han incorporado planes de manejo ambiental al diseño de las instalaciones previstas para el almacenamiento de la roca estéril y de los relaves. Esta sección resume los principales aspectos y componentes de estas instalaciones:

Lixiviación de metales pesados

El agua de proceso de los relaves contiene elevados niveles de metales disueltos y tanto los relaves como una porción de la roca estéril, si se dejaran oxidar, podrían lixiviar metales pesados. El plan de manejo es encapsular los relaves y la roca estéril que genera ácido en un depósito de almacenamiento de doble revestimiento. El sistema de revestimiento compuesto que se describe en la Sección 7 de este informe consistirá en una geomembrana HDPE 60 mil, por debajo de la cual subyace una capa de suelo de bentonita de muy baja permeabilidad.

La roca estéril de óxidos identificada como goetita tiene el potencial de lixiviar arsénico y zinc, por lo que este material deberá ser segregado y almacenado conjuntamente con los relaves.

Control de DAR de la roca de estéril sulfurada

Toda la roca estéril sulfurada y la roca estéril con potencial de generar ácidos (PGA) se almacenará en el depósito de relaves. Se han determinado las pautas específicas del lugar para cada material: en la mayoría de casos, una relación de potencial de neutralización (RPN) mayor de 1 a 2.1, dependiendo del material, o un contenido de azufre total menor de 0.1% indica material que no genera ácidos. Debido a que las muestras son representativas de las diversas unidades geológicas que ocurren en el depósito, el porcentaje de muestras designadas como PGA para cada unidad es similar al porcentaje de roca estéril con potencial de generar ácido que podría utilizarse teóricamente para dimensionar las instalaciones de almacenamiento de este material y predecir la disponibilidad de materiales que podrían ser utilizados para la

construcción. Antes de dar inicio a la explotación minera, se llevará a cabo muestreo adicional para delinear la distribución espacial *in situ* del material NGA y PGA a escala real, usando los métodos recomendados como resultado de la prueba ABA. De esta forma, los sub-conjuntos NGA de todas las unidades que potencialmente generan ácidos podrán ser segregados como materiales de construcción seguros. Se espera que estos materiales NGA se presenten a la mayor distancia del cuerpo mineral sulfurado.

Manejo de caudales durante eventos extremos de El Niño

Se ha proporcionado un borde libre adecuado para almacenar un evento extremo de precipitación de 3 meses para el depósito de óxidos y un evento extremo de precipitación de 1 mes para el depósito de sulfuros. En el improbable caso que ocurrieran períodos continuados de lluvias que lleven a una acumulación de almacenamiento excesivo que reduzca el borde libre para avenidas, se descargará el agua. Si la descarga no cumpliera con los criterios del Ministerio de Energía y Minas (MEM), esta se almacenará temporalmente en el tajo abierto, hasta que pueda ser tratada para su descarga.

Monitoreo

El programa de monitoreo consistirá de lo siguiente:

- Se instalarán pozos de monitoreo de agua subterránea aguas abajo de la instalación de relaves. Si se detectaran concentraciones elevadas de metales, se instalará un sistema de retro-bombeo para regresar el agua contaminada al depósito de relaves.
- Se monitoreará trimestralmente la calidad del agua de proceso para confirmar los parámetros de diseño utilizados para predecir la calidad del agua.
- Se instalarán piezómetros en la presa, para monitorear las presiones intersticiales, particularmente durante la etapa de construcción.

- Se instalarán inclinómetros en la sección de la presa que se apoyará sobre arcillas suaves. Los inclinómetros servirán para monitorear el movimiento horizontal de la zona de cimentación.

10.2 Plan de cierre

10.2.1 Depósito de relaves

El Plan de cierre de la instalación de almacenamiento de relaves buscará cumplir con dos objetivos. El primero será garantizar la estabilidad física a largo plazo e integridad del depósito de relaves. El segundo será garantizar la estabilidad química del mismo, minimizando la oxidación de los relaves y de la roca estéril que generan ácidos, mediante el empleo de una cubierta de retención de agua.

10.2.1.1 Estabilidad física

La principal preocupación en lo que se refiere a la estabilidad física del depósito de relaves tiene que ver con la erosión (durante avenidas) y su estabilidad sísmica. La cubierta del talud aguas abajo del dique comprenderá roca de desecho de la mina de buena calidad, que sea resistente a la erosión. La presa ha sido diseñada para el máximo sismo creíble (MCE).

El principal evento hidrológico está relacionado con la precipitación máxima probable (PMP) que pudiera caer sobre el área del depósito y que produzca la erosión de la presa. La PMP será manejada construyendo un vertedero sobre la cresta de la presa, para descargar de manera segura el evento de esta avenida máxima.

La superficie de cierre del depósito será contorneada de manera tal, que exista poca escorrentía para los eventos de lluvia promedio. Sin embargo, deberá ser graduada de forma tal, que la avenida máxima probable pueda ser conducida hacia el vertedero de cierre.

El vertedero de cierre del depósito de relaves que se muestra en los planos, ha sido diseñado para el evento PMP. El valor PMP de 1 día (731 mm) se dividió en períodos de 1 hora, sobre la base de los datos de Duración e Intensidad de la estación de Chulucanas, para obtener un evento de diseño de tormenta. Este evento de tormenta fue entonces conducido hacia el vertedero de cierre del área de contención. Se obtuvo una elevación en el nivel de agua de 0.7 m, con un caudal pico de descarga a través del vertedero de 3.2 m³/s. Se ha dejado una tolerancia de borde libre de 0.75 m para la incertidumbre hidrológica y para el oleaje del agua por acción de los vientos. El área de captación utilizada para el la conducción fue la estimada para la poza final, es decir, 1.83 km². Un conducto del vertedero revestido con riprap llevaría el caudal del vertedero hacia la cara dique y desde allí hacia un dissipador revestido con rip rap a ubicarse en el pie del dique. Luego, un canal sin revestimiento, conduciría el caudal del vertedero hacia la Quebrada Careros.

10.2.1.2 Estabilidad química

Con el fin de minimizar el potencial de oxidación de la roca estéril y de los relaves, el plan de cierre garantiza la saturación de ambos en el largo plazo. Esto se logrará con una combinación de un fondo revestido y de una cubierta, la cual asegurará la saturación y minimizará las pérdidas por evaporación. El sistema total comprende los siguientes componentes, desde la superficie del terreno hasta la superficie del embalse final:

- Revestimiento del depósito que consiste en geomembrana HDPE 60 mil colocada sobre un revestimiento de suelo modificado de bentonita de 0.5 m de espesor.
- 45 m de relaves de sulfuros de baja permeabilidad, encapsulando roca estéril sulfurada de mayor permeabilidad. Los relaves controlarán la permeabilidad total del material de roca estéril/relaves.
- Capa de 0.5 a 1 m de espesor de roca estéril de la mina. Este capa actuará a manera de un reservorio para garantizar que se disponga de suficiente agua libre para reponer las pérdidas debido a la filtración aguas abajo, a través de los relaves.

- Capa de 0.3 m de espesor de arena de río. La capa de arena actuará a manera de una barrera de evaporación, para minimizar las pérdidas de agua de la capa de roca estéril debido a la evapo-transpiración.
- Medio de soporte para la vegetación.

Se estableció un modelo HELP para evaluar el rendimiento del revestimiento y para evaluar el volumen de agua que se espera esté disponible en la capa de grava, sobre la base de la lluvia esperada. En la Figura 10.1 se muestra el modelo y en la Tabla 10.1 se presentan los datos de entrada.

Tabla 10.1 Parámetros de entrada de HELP

PARÁMETRO	CAPA 1	CAPA 2
Tipo de material (USCS)	1 – SP	1 – SP
Espesor	0.30 m	0.50 m
Porosidad	41.7 % (vol)	39.7 % (vol)
Capacidad de campo	4.5 % (vol)	3.2 % (vol)
Punto de Wilting	1.8 % (vol)	1.3 % (vol)
Contenido inicial de agua en el suelo	1.77 % (vol)	2.70 %
Conductividad hidráulica saturada efectiva	1.0×10^{-2} cm/seg	3.0×10^{-1} cm/seg

El modelo se ejecutó para un período de 100 años, para incluir los períodos más secos y los más húmedos que podrían presentarse. En promedio, la percolación a través de la base de la capa de grava chancada fue de 35.2 mm/año, lo que representa el 24% del total de la precipitación. En un año seco, HELP calculó la precolación en 16.4 mm/año, lo también representa el 24% de la precipitación total.

Se asumió que la velocidad del agua que se requiere para evitar que los relaves se desaturen era la velocidad de fuga desde el revestimiento tal como se ha mencionado previamente en el diseño del revestimiento. Basado en el modelo HELP para el sistema de revestimiento presentado en la Sección 7.3, las pérdidas en el caso más desfavorable, desde la base del depósito (para el Caso 5 – geomembrana única con capa inferior de bentonita-arena) están entre 1 mm/año y 32 mm/año.

Figura 10.1 Plan de Cierre – Planta, sección y detalles

Figura 10.2 Esquema de la cobertura

Se estableció un modelo SEEP/W (Geoslope, 2001) para evaluar el tiempo requerido para que se inicie la desaturación, si no existiera recarga a través de la superficie. Los siguientes son los supuestos utilizados para este modelo:

- Permeabilidad de los relaves entre 7.45×10^{-6} cm/seg y 9×10^{-7} cm/seg;
- Coeficiente de compresibilidad volumétrica, m_v , de 2.3×10^{-4} kPa⁻¹ ;
- Porosidad entre 47 % y 42 %; y
- Presión intersticial en exceso de 30 kPa en la superficie y en la base del depósito.

Sobre esta base, la presión intersticial cerca a la superficie se habrá disipado en un plazo de 10 años, mientras que pasarán alrededor de 65 años antes de que la presión intersticial en la base del depósito se disipe. Esto significa que el depósito sólo comenzará a desaturarse desde la superficie si no se presentara recarga durante 10 años. No hay años registrados con cero lluvias en más de 40 años de registros, por lo que se trata de una probabilidad extremadamente baja de que se presente esta condición.

10.2.2 Botaderos de roca estéril y de material de cubierta

Los botaderos de roca estéril y de material de cubierta serán revegetados y se contornearán los taludes durante la operación. Los botaderos también podrían convertirse en una fuente de material de cubierta para las instalaciones de relaves.

10.3 Evaluación de riesgos

Se han revisado los principales riesgos identificados por Klohn Crippen y relacionados con la alternativa de la co-disposición de relaves/roca estéril (Klohn Crippen, 2000). Los riesgos importantes se identifican como aquellos que tienen la probabilidad de ocurrencia que va desde alta hasta baja (A a B) combinada con una

consecuente severidad que varía de extrema a baja (E a B). La evaluación del riesgo se llevó a cabo para el estudio de prefactibilidad. Los principales riesgos que se identificaron se resumen en las siguientes secciones, junto con los factores de compensación que han sido desarrollados como parte del diseño de factibilidad para el manejo de riesgos.

- Nivel 1

Riesgos que tienen una alta probabilidad de ocurrencia y consecuencias extremas (A-E)

Ninguno

- Nivel 2

Riesgos con una alta probabilidad de ocurrencia y altas consecuencias (A-A) y riesgos con moderada probabilidad y extremas consecuencias (M-E)

454 *Fallas en las tuberías de conducción, que causen pérdida de relaves y falla de la presa:* El depósito estará revestido con un sistema de revestimiento de suelo bentonita/HDPE que reducirá en forma significativa la gradiente hidráulica. Se usarán los filtros gradados para dar mayor protección a las tuberías.

496 *Emisión de polvo del depósito, luego del cierre:* El plan de cierre contempla la instalación de una cubierta de vegetación en la parte superior del depósito. Los taludes de la presa serán ya sea de relleno de roca, que no generaría polvo, y/o cubierta de vegetación. La consecuencia de este modo de falla se ha tratado en el modelo de emisión de polvo en el Estudio de Impacto Ambiental y ésta es baja.

- Nivel 3

Riesgos con alta probabilidad de ocurrencia y consecuencias moderadas (A-M), riesgos con probabilidad moderada y consecuencias altas (M-A), riesgos con baja probabilidad y consecuencias extremas (B-E).

490 *Al cierre, la erosión del talud aguas abajo del dique durante eventos de El Niño requiere mantenimiento.* La erosión de la cara aguas abajo tiene una baja probabilidad de provocar una

falla del dique. El relleno de roca de la mina proporcionará un importante factor de seguridad contra la erosión. Los diques de relleno de roca son bastante resistentes a los niveles de caudal que podrían producirse durante un evento en el que el agua sobrepase la cresta del dique. En el improbable caso de que se produzca una erosión considerable, habría tiempo para llevar a cabo trabajos de mantenimiento.

495 *Al cierre, la planta de tratamiento de agua se avería, lo que produce una descarga de efluentes.* No se requiere una planta de tratamiento de agua.

- Nivel 4

Riesgos con alta probabilidad de ocurrencia y bajas consecuencias (A-B), riesgos con probabilidad moderada y consecuencias moderadas (M-M), y riesgos con baja probabilidad y altas consecuencias (B-A).

451 *Falta de roca disponible para la construcción del dique:* Se ha identificado suficiente material en el estudio de factibilidad. La consecuencia de no tener suficiente material, solo afectaría los futuros costos de cierre y de operación.

452 *La roca estéril que no genera ácidos, se vuelve con el tiempo ácida y requiere tratamiento:* En el diseño de factibilidad se proporciona un plan de manejo para la identificación de roca estéril que genera ácido. Toda la roca estéril que potencialmente genera ácidos será colocada en el depósito. Si se empleara roca estéril dudosa y luego se descubre que genera ácidos, entonces se dispone de dos opciones: 1) Colocar la roca PGA en el tajo abierto antes de su inundación; o 2) colocar la roca PGA en el depósito de relaves antes de completar el almacenamiento de los relaves

490 *Contaminación del agua subterránea que requiera trabajos de compensación y correctivos.* El potencial para la contaminación del agua subterránea ha sido mitigado mediante el sistema de revestimiento. Se instalarán pozos de monitoreo del agua subterránea para monitorear la calidad del agua subterránea. En el improbable caso de que se produzca contaminación del agua subterránea, ésta se bombeará de retorno al depósito de relaves. Durante las operaciones, el flujo de agua subterránea irá hacia el tajo abierto y se recolectará como parte del control del agua de la mina.

- 491 *Contaminación del Río Piura, causando contaminación y obligando a hacer trabajos correctivos.* Los factores de compensación serían los mismos que para el punto 490.
- 492 *Al cierre, menor efectividad de la cubierta:* La consecuencia de una menor efectividad de la cubierta podría potencialmente dar lugar a un aumento en la probabilidad de desaturación de los relaves, lo que provocaría DAR y lixiviación de metales. El régimen bastante bajo de filtración desde el depósito, equivalente a unos pocos milímetros por año, reduce la probabilidad de este evento a bastante baja.
- 490 *Al cierre, erosión de la cubierta:* El diseño de la cubierta incluye una cubierta granular que sería resistente a la erosión, particularmente sobre la superficie del depósito que será casi horizontal.
- 491 *No se maneja la disposición de lodo, lo que produce un lixiviado contaminado:* No se requiere de una planta de tratamiento y no habrá producción de lodo.

Los siguientes serían los riesgos adicionales identificados como parte del estudio de factibilidad:

- Nivel 1
Ninguno
- Nivel 2
Ninguno
- Nivel 3

FS100 Lixiviación de metales de la roca estéril de la fase de óxidos, que se ha usado para la construcción de la presa: Se ha identificado que la roca estéril de la fase de óxidos (goetita) tiene el potencial para lixiviar arsénico y zinc. Esta roca estéril comprende < 1% del tonelaje de roca estéril de la fase de óxidos. La goetita necesitará ser separada y se deberá co-disponer de ésta junto con los relaves.

FS101 Descarga del agua decantada durante eventos extremos de El Niño. Se ha proporcionado un borde libre suficiente para almacenar una precipitación extrema de 3 meses para la poza de óxidos y una precipitación extrema de 1 mes de la poza de sulfuros. En el improbable caso de que ocurran períodos húmedos prolongados que produzcan una acumulación del almacenamiento excedente que reduzca el borde libre para avenidas, entonces se descargará el agua. Si la descarga no cumpliera con los criterios del Ministerio de Energía y Minas (MEM) está se almacenará temporalmente en el tajo abierto hasta que pueda ser tratada para su posterior descarga.

11. CONSTRUCCIÓN

11.1 Generalidades

En el Plano B-33002 se muestran los trabajos propuestos, los mismos que consistirán en lo siguiente:

- Depósito de relaves de óxidos: un dique anular de relleno de roca estéril/tierra de hasta 20 m de altura, revestido con una sola capa de HDPE, apoyado sobre una mezcla de bentonita.
- Depósito de relaves de sulfuros: Un dique anular de relleno de roca estéril/tierra de hasta 40 m de altura, revestido con una sola capa de HDPE, apoyado sobre mezcla de arena-bentonita. El depósito de sulfuros también incorpora al depósito de relaves de óxidos.
- Botadero de roca estéril: Para el almacenamiento de roca estéril que no genera ácidos.
- Pila de material de cubierta: para el almacenamiento de material aluvial excavado proveniente del tajo abierto TG-1 y de los canales de derivación, que no es adecuado para uso en la construcción o que excede los requisitos del material de construcción; y
- Pila de suelo orgánico: para el almacenamiento de suelo orgánico desbrozado y banco de semillas (aproximadamente los 0.5 m superiores) para uso en la rehabilitación y cierre del área del proyecto Tambogrande.

11.2 Preparación de cimentación y drenaje

La preparación general de los cimientos para el dique del depósito de relaves y los botaderos de roca estéril requerirá del desbroce y limpieza de los materiales superficiales, así como el rodillado de prueba para identificar cualquier zona que contenga materiales superficiales suaves o sueltos. Las zonas con estas características serán excavadas localmente y reemplazadas con relleno compactado.

Donde se encuentre menos de 10 m de materiales no adecuados, éstos se excavarán y reemplazarán con relleno compactado. Donde haya más de 10 m de materiales no adecuados, no se realizará ninguna mejora del terreno y en su lugar, se construirán pendientes aguas abajo más planas.

El revestimiento HDPE también requerirá de la preparación de los cimientos en toda el área del depósito. Esto implicará la limpieza y el desbroce de los suelos superficiales. La subrasante deberá ser uniforme, bien compactada y libre de fragmentos de roca filuda o piedras, rocas grandes y detritus como vegetación. La subrasante deberá ser compactada a un mínimo de 95% de la densidad seca máxima según la prueba Proctor estándar. Las áreas con materiales suaves deberán ser excavadas y reemplazado el material removido con relleno compactado, para minimizar los asentamientos diferenciales bajo el revestimiento. Las deformaciones como las inducidas por el asentamiento diferencial pueden provocar una excesiva tensión en el revestimiento, provocando una eventual falla y la posterior fuga. El vaso también deberá ser contorneado, de manera tal que no haya cambios abruptos en el nivel del fondo del depósito.

Se colocará una mezcla de arena-bentonita (4% de bentonita por peso) por encima de los suelos del terreno natural, para formar una barrera de suelo-bentonita de baja permeabilidad.

Ahí donde se deba excavar y reemplazar materiales superficiales en algunas zonas de la presa, se podría requerir de la eliminación localizada del agua en excavaciones de hasta 10 m de profundidad. La napa freática observada se ubica por lo general, a 3 ó 4 m por debajo del nivel del terreno.

11.3 Programa de construcción y cantidades

La presa de relaves se construirá con roca estéril proveniente del desbroce de la mina y la velocidad de la construcción se coordinará para optimizar la remoción de roca estéril con su posterior colocación en la presa. Se ha desarrollado una Lista de Cantidades para el trabajo requerido para la construcción de la Presa de Oxidos, el Dique de Arranque de Sulfuros, la Presa Final y el Cierre, la misma que se presenta en la Tabla 11.2

Table 11.1 Lista de cantidades

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1 Conclusiones

Las principales conclusiones del estudio de factibilidad se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Se evaluaron nueve lugares potenciales para el almacenamiento de los relaves y se seleccionaron dos de ellos para un estudio más detallado. El lugar seleccionado, ubicado inmediatamente al noreste de la mina, se escogió sobre la base de minimizar el área de la base de la presa, la capacidad para almacenar roca estéril de sulfuros y relaves, y facilitar el cierre, debido a que no se encuentra al interior de una cuenca colectora importante.
2. La mina está ubicada cerca a la cota 60msnm, cerca al límite entre el desierto costero y las áreas agrícolas de bajas elevaciones. La geología regional consiste en arenas eólicas recientes hacia el sur del Río Piura y depósitos aluviales recientes hacia el norte del río, que yacían sobre arenas bentoníticas densas y gravas de la formación Tambogrande. La formación Tambogrande descansa sobre rocas volcánicas basales (dacitas, andesitas).
3. La mediana anual de precipitación en la zona es de 150 mm, pero la media anual es de 380 mm. La precipitación se ve mayormente influenciada por los eventos de El Niño. El evento de tres meses en cada 1000 años es 4,300 mm y la Precipitación Máxima Probable puede ser de hasta 12,000 mm para un evento de tres meses. La evaporación promedio está en el orden de los 1,600 mm/año.
4. La mina está ubicada en un área de sismicidad moderada a alta. El máximo sismo creíble seleccionado tendría una aceleración pico del terreno de 0.4g, con M_m7 .
5. Se usaron siete sondajes, 23 perforaciones de prueba y 2 perforaciones manuales para evaluar las condiciones de zona de cimentación de las presas. Por lo general ésta consiste de arenas arcillosas y grava densa de la formación Tambogrande. Se identificaron varios depósitos aluviales de material suelto y ribereños en las áreas bajas de la presa. El nivel freático se encuentra por lo general, entre 3 y 5 m por debajo del nivel del terreno.

6. El depósito de relaves se construirá en dos etapas, (1) Poza de óxidos, para almacenar relaves de cianuración del mineral aurífero durante los primeros cuatro años; y (2) Poza de Sulfuros, para almacenar relaves de sulfuros y roca estéril que genera ácidos para el resto de la vida de la mina. La altura final de la presa será de aproximadamente 45 m y cubrirá un área de 180 Ha.
7. La presa se construirá usando suelos de cubierta y roca estéril que no genere ácidos, excavados del tajo abierto. La presa se construirá con una geometría de línea central y el talud aguas abajo será de 2H:1V, con un tramo de 9H:1V. Se requiere la sección más plana en el área donde existen suelos profundos aluviales sueltos, en una longitud de aproximadamente 250 m de largo. En esta sección, los suelos sueltos son demasiado profundos para excavarlos en forma segura o para compactarlos in situ.
8. Ambos depósitos de relaves y las presas estarán revestidas para minimizar las pérdidas potenciales por filtración hacia el ambiente. El sistema de revestimiento consistirá de una geomembrana HDPE 60 mil texturizada, sobre una capa de suelo modificado con bentonita, de 300 mm de espesor.
9. Las potenciales pérdidas estimadas por filtración, con los sistemas de revestimiento, serán menores a 0.1 L/s
10. Los canales de derivación se construirán a lo largo de los lados norte y este del embalse para derivar la escorrentía superficial. Los canales tendrán por lo general, hasta 4 m de ancho. El agua se recuperará del embalse y se recirculará hacia la planta concentradora. La tasa de recuperación varía de un promedio de 64 L/s para la Poza de Oxidos hasta 356 L/s para la Poza de Sulfuros. Esta tasa también variará durante los períodos secos y húmedos.
11. Se proporcionará almacenamiento de avenidas para un evento de tres meses, con un período de retorno de 1,000 años para la Poza de Oxidos y para un evento de un mes con período de retorno de 1,000 años para la Poza de Sulfuros. Durante estos eventos, podría requerirse la descarga del agua de proceso diluida para garantizar un borde libre adecuado para la seguridad de la presa, para el siguiente evento de diseño, siempre y cuando cumpla con los límites permisibles dados por el MEM.
12. La roca estéril que no genera ácidos y los suelos de cubierta se almacenarán en pilas que se ubicarán entre el depósito de relaves y la planta de tratamiento de mineral.

13. Se construirán tres pozas de sedimentación para recolectar la escorrentía proveniente de los taludes de la presa, de las pilas de roca estéril y de las pilas de material de cubierta.
14. Se han preparado los planes de monitoreo ambiental y se han hecho una evaluación de riesgos para tratar los temas y las preocupaciones ambientales.
15. El diseño de cierre consiste de los siguientes componentes:
 - Colocación del sistema inicial de revestimiento, que ha sido diseñado para minimizar la filtración proveniente del depósito de relaves y evitar la de-saturación de los relaves. Esto reducirá el potencial de oxidación y el potencial transporte de drenaje ácido hacia la base del depósito.
 - Cubierta de los taludes de la presa y de las pilas de roca estéril con re-vegetación posterior de los mismos.
 - Saturación a largo plazo de los relaves sulfurados con una capa de cubierta saturada que consiste en material granular permeable y arena, con la superficie superior revegetada.
 - Construcción de un vertedero de emergencia revestido con rip rap diseñado para un flujo probable máximo pico.

12.2 Recomendaciones

1. La zona de cimentación de la presa contiene zonas de suelos licuables sueltos que requerirán de excavación o de una reducción de los taludes de la presa. El diseño final deberá definir además, la extensión y la profundidad de estos suelos.
2. Se ha identificado un depósito importante de bentonita, 25 km al oeste de la mina. Se llevará a cabo pruebas adicionales para determinar el sistema de revestimiento óptimo. La prueba incluirá la determinación de permeabilidad de varias mezclas con diferentes porcentajes de bentonita con arena fina. También se evaluará el potencial de atenuación de metales que ofrece la bentonita.

3. Se harán también pruebas adicionales, para confirmar las propiedades de consolidación y las características de permeabilidad de los relaves.

KLOHN CRIPPEN CONSULTANTS LTD.

Carlo Cooper, M.EngSc.
Ingeniero Geotécnico

Harvey McLeod, P.Eng.
Ingeniero Geotécnico Senior

Rob Marsland, P.Eng.
Gerente del Proyecto

PROTECCIÓN MUTUA

A manera de una protección recíproca para *Manhattan Sechura Compañía Minera S.A.* el público y nosotros mismos, todos los informes y dibujos se presentan para la información confidencial de *Manhattan Sechura Compañía Minera S.A.*, para un proyecto específico y autorización; queda reservado el uso y/o publicación de datos, declaraciones, conclusiones, o abstractos de o en relación con nuestros informes y dibujos a menos que cuente con nuestra aprobación por escrito.

REFERENCIAS

- Abrahamson, N.A. and W.J. Silva (1997). “*Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes*”; Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 94-127.
- AMEC (2002) *Open Pit Material Schedule*, email received 18 February 2002.
- American Meteorological Society (1959) *Glossary of Meteorology*, Boston.
- Barton N, Kjaernsli B (1981) *Shear strength of Backfill*. Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceeding ASCE Vol 107, No GT7, July 1981.
- Campbell, K.W. (1997). “*Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra*”; Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 154-179.
- Castillo, J. and J. Alva (1993). *Peligro Sísmico en Perú*. Proc. VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ing. De Cimentaciones, Lima, Perú, pp.409-431.
- Castillo, J. (1994). *Peligro Sísmico en el Perú*. Thesis Civil Eng., Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, pp. 173.
- Caterpillar (1996) *Caterpillar Performance Handbook*, 27th ed, Caterpillar Inc, Peoria, Illinois.
- Department of Fisheries and Oceans , Ministry of Environment Land and Parks, Canadian Government (1992) *Land Development Guidelines for the Protection of Aquatic Habitat*. <http://www-heb.pac.dfo-mpo.gc.ca/english/publications/PDF/guidelines/LDG.PDF>
- Douglas, M.W., Peña, M., Ordinola, N., Flores, L., Boustead, J. and J.L. Santos (unpublished). *Synoptic and Spatial Variability of the Rainfall along the Northern Peruvian Coast during the 1997-8 El Niño Event*.
- Douglas et al, (2000) Unpublished Statement.
- Espinoza (1987)
- Geoline S.A. (2001). *Report on Geophysical Survey - Seismic Refraction Study: Quebrada Carneros - Diversion Dyke & Ditch Valley*. March 2001.
- Gutscher, M.-A., Malavieille, J., Lallemand, S., and Collot, J.-Y. (1999a) *Tectonic Segmentation of the North Andean Margin: Impact of the Carnegie Ridge Collision*, Earth and Planetary Science Letters 168, pp. 255-270.

- Gutscher, M.-A., Olivet, J.-L., Aslanian, D., Eissen, J.-P. and Maury, R. (1999b) The “Lost Inca Plateau”: Cause of Flat Subduction Beneath Peru?, *Earth and Planetary Science Letters*, 171, pp. 335-341.
- Gutscher, M.-A., Spakman, W., Bijwaard, H. and Engdahl, E.R. (2000) Geodynamics of Flat Subduction: Seismicity and Tomographic Constraints from the Andean Margin, *Tectonics*, Vol. 19, No. 5, pp. 814-833, Oct.
- Hynes-Griffen ME, Franklin AG (1984) *Rationalising the Seismic Coefficient Method*. Geotechnical Laboratory, Waterways Experiment Station, Department of Army, Corps of Engineers, July 1984 Misc Paper GL-84-13.
- Idriss, I.M. (1995). “An Overview of Earthquake Ground Motions Pertinent to Seismic Zonation”; Proc. Fifth Int. Conf. on Seismic Zonation, Nice, France.
- Klohn-Crippen Consultants Ltd (May 23, 2000). Tambogrande Open Pit Overall Slope Design – Memorandum to Manhattan Sechura.
- Klohn Crippen (2000). *Tailings Storage and Waste Dump Site Selection Report*, Report Submitted to Manhattan Sechura Compania Minera S.A., October 23.
- Klohn Crippen (2002) *Environmental Baseline Report*. Report submitted to Manhattan Sechura Compania Minera S.A.
- Lakefield (2000) Report Submitted to Manhattan Minerals.
- Leureriro J., Machare J.Y., Sebrier M., (1991). *Actualización del Mapa Neotectónico del Perú a Escala 1:2,000,000*. Volumen de Resúmenes Extendidos VII Congreso Peruano de Geología, Lima 1991 (in Spanish).
- Lorax Environmental (2000) *Tambogrande Project – Characterization of ARD Potential in Waste Rock, Static Testing Results*. Report submitted to Klohn Crippen, May 2000.
- Lorax Environmental (2001) Tambogrande Project – Characterisation of ARD Potential in Waste Rock and Tailings, Kinetic Test Results. Report submitted to Manhattan Minerals Corporation, August 2001.
- Mitouard, P., Kissel, C. and Laj C. (1990). *Post-Oligocene Rotations in Southern Ecuador and Northern Peru and the Formation of the Huancabamba Deflection in the Andean Cordillera*, *Earth and Planetary Science Letters*, 98, pp. 329-339.
- Moreano, J.F. S. (1994). *Estudio Sismico de la Region del Nor-Oeste Del Perú*, *Geologia Universalia*, Vol. 50, No.1, pp. 43-55.

NCEER (1998).

NEIC (2001). *Internet Search for Earthquake Data Update*, Database maintained by U.S. National Earthquake Information Centre.

NGDC (1996). *Seismicity Catalog - CD-ROM Collection*, U.S. National Geophysical Data Center.

Pearson (2001). Personal communications.

Risk Engineering (1997). *EZ-FRISK User's Manual, Version 4.3*, Boulder, Colorado, U.S.A.

Schroeder PR, Aziz NM, Lloyd CM, Zappi PA. (1994). *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model : Users Guide for Version 3*, EPA/600/R-94/168a, September 1994, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington DC.

SENAMHI. (1994). *Atlas de Evaporación en el Perú*.

Surpac Software International (2002) *Surpac Vision v4.1-H*.

Tello Vargas, Hernán Humberto (1991). *Balance Hidrico Superficial de la Cuenca del Río Piura, 1965-1987*. BSc. Thesis, Universidad de Piura. [in Spanish]

Todd, DK (1970) *The Water Encyclopedia*. Water Information Centre. New York.

Wolter, K, Timlin, MS (1998) Measuring the strength of ENSO – how does 1997/98 rank? *Weather*, 53. pp 315 – 324.

Youngs, R.R., S.J. Chiou, W.J Silva, and J.R. Humphrey (1997). *Strong Ground Motion Attenuation Relationship for Subduction Zone Earthquakes*; Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 58-73.

World Meteorological Organisation (1986). *Manual for Estimation of PMP*, Second Edition. WMO No. 332.

ANEXO I

Informe de investigación del emplazamiento

ANEXO II

Resultados de Ensayos de Laboratorio

ANEXO III

Sismicidad

ANEXO IV
Análisis de estabilidad

PLANOS

- B-33001 Ubicación de Estaciones Meteorológicas**
- B-33002 Disposición General**
- B-33003 Geología Regional**
- D-33004 Sección Geotécnica Longitudinal – Presa Oeste**
- D-33005 Sección Geotécnica Longitudinal – Presa Sur**
- D-33006 Sección Geotécnica Longitudinal – Presa Este**
- D-33007 Análisis de Estabilidad de la Presa de Arranque**
- D-33008 Análisis de Estabilidad de la Presa Final**
- B-33009 Disposición del Sistema de Revestimiento del Dique de Arranque de Óxidos y de Sulfuros**
- D-33010 Diseño del Vertedero de Cierre – Planta, Secciones y Detalles**
- D-33011 Diseño de la Presa de Relaves - Planta, Secciones y Detalles**
- B-33012 Disposición del Botadero de Roca Estéril**
- B-33013 Obras de Derivación - Planta y Secciones**
- B-33014 Plan de Cierre – Planta, Sección y Detalles**