



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

**EVALUACION PRELIMINAR DE
CONTINGENCIA EN TRANQUE DE RELAVES
MINA VETA DEL AGUA,
SECTOR CAJON EL SAUCE, COMUNA DE
NOGALES, REGIÓN DE VALPARAISO:
FASE I, INFORME FINAL**

REALIZADO POR:

DICTUC

S.I.T. N° 215

Santiago, Abril 2010

**Ministerio de Obras Públicas
Dirección General de Aguas**

**Fase I
Evaluación preliminar de contingencia en
tranque de relaves Mina Veta del Agua:
Sector Cajón el Sauce, Comuna de Nogales,
Región de Valparaíso**



Informe Final

DICTUC

**Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas
Escuela de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Chile**

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Abril del 2010

**Ministro Obras Públicas
Hernán de Solminihac**

**Director de la Dirección General de Aguas
Matías Desmadryl**

**Jefa Depto. de Conservación y Protección de Recursos Hídricos
Mesenia Atenas Vivanco**

DICTUC:

Especialistas

**Ingeniero Civil Sr. Gonzalo Pizarro P., PhD
Ingeniero Civil Sr. Pablo Pastén G., PhD
Ingeniero Agrónomo Sr. Carlos Bonilla M., PhD**

Ingeniero de Proyecto

Ingeniero Civil Sr. Felipe Tarud G., Mag. Cs. Ing.

Químico

Srta. Sara Acevedo G.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

1. Tipo Informe Informe técnico folio N° - 887034		2. Cuerpo del Informe 74 hojas+Anexos
3. Título del Proyecto Evaluación preliminar de contingencia en tranque de relaves Mina Veta del Agua: Sector Cajón el Sauce, Comuna de Nogales, Región de Valparaíso		4. Fecha Informe Abril 2010
5. Autor (es) Especialistas Ingeniero de Proyecto Químico	<i>Gonzalo Pizarro Puccio, Ing. PhD. Pablo Pastén González, Ing. PhD. Carlos Bonilla Meléndez, Ing. Agr. PhD. Felipe Tarud Garrido, Ing. MSc. Sara Acevedo Godoy, Químico.</i>	6. Contrato
6. Nombre y Dirección de la Organización Investigadora DICTUC; Pontificia Universidad Católica de Chile Vicuña Mackenna N° 4860, Casilla 306 – Correo 22, Macul – Santiago		7. Período de Investigación Marzo - Abril 2010
8. Antecedentes de la Institución Mandante Nombre : Dirección General de Aguas DGA Dirección: Morandé 59 - Santiago RUT: 61.202.000-0 Teléfono: (56 2) 4494000 Fax: (56 2) 4410914		9. Contraparte Técnica María Eugenia Molina Mesenia Atenas Vivanco
10. Resumen Informe Final. El objetivo de este trabajo fue describir y caracterizar preliminarmente y en forma rápida la magnitud del área impactada, las secciones de la red de drenaje directamente comprometidas, la calidad físico-química del material derramado, y el potencial de movilización del relave e incorporación a la red de drenaje.		

Sr. Gonzalo Pizarro P.
Jefe de Proyecto

DICTUC

INDICE

1. RESUMEN EJECUTIVO	5
2. PRESENTACIÓN	8
3. DESARROLLO DEL ESTUDIO.....	9
3.1 DESCRIPCIÓN DE ANTECEDENTES DISPONIBLES	9
3.2 CARACTERIZACIÓN DE ÁREAS IMPACTADAS POR EL RELAVE.....	11
3.2.1 <i>Caracterización del área de derrame de relave</i>	11
3.2.2 <i>Caracterización hidrológica de la zona afectada</i>	21
3.2.3 <i>Identificación georeferenciada de lugares de muestreo</i>	21
3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA: SCREENING.....	29
3.4 ANÁLISIS INTEGRADO Y CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO ACREDITADO	38
3.5 EVALUACIÓN PRELIMINAR DE EROSIÓN DEL RELAVE Y TRANSPORTE DEL CONTAMINANTE A LA RED DE DRENAJE	44
3.6 POTENCIAL DE LIBERACIÓN DE CONTAMINANTES DEL RELAVE EN MATRIZ ACUOSA.....	48
3.7 RIESGOS POTENCIALES DE LOS CONTAMINANTES LIBERADOS	56
3.8 REVISIÓN Y RECOMENDACIONES DISEÑO DEL CANAL DE DESVÍO (BY-PASS)	60
3.9 REFERENCIAS	72
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
ANEXOS.....	75

1. RESUMEN EJECUTIVO

Luego del terremoto ocurrido en Chile el 27 de febrero de 2010 se registró el colapso parcial del tranque de relaves n° 5 la mina Veta del Agua, ubicado 9 km al noreste de la ciudad de Nogales, en la región de Valparaíso, obstruyendo la red de drenaje y alterando la morfología local producto del derrame de relave. Este relave se encuentra en un área caracterizada por la presencia de otros tranques de relaves asociados a la operación de la Mina El Soldado (Anglo American). El objetivo de este trabajo fue describir y caracterizar con los datos disponibles a la fecha, la magnitud del área impactada, las secciones de la red de drenaje directamente comprometidas, la calidad físico-química del material derramado, y el potencial de movilización del relave e incorporación a la red de drenaje. En base a la información anterior, se proponen medidas preliminares orientadas a reducir los efectos ambientales del evento.

Para alcanzar los objetivos planteados se realizaron las siguientes actividades:

- Visita a terreno y medición geográfica de la zona para calcular los volúmenes de relaves colapsados y estimar la obstrucción al cauce principal en la zona.
- Caracterización in-situ de muestras de suelo y aguas.
- Análisis en laboratorio certificado de parámetros fisicoquímicos de suelo, relave y agua.
- Estimaciones de caudales y potencial de erosión del terreno.
- Estimación de potencial de liberación de contaminantes y capacidad de formar drenaje ácido del relave.
- Verificación de dimensiones de canal de desvío propuesto para el Estero El Sauce.

Se estima que una superficie de 2.430 m² del tranque de relaves se desprendió producto del colapso de su talud norte. El material se expandió y avanzó por el talud hasta bloquear el cauce del Estero El Sauce abarcando una superficie total de 10.510 m². Del total de área abarcada, 6.472 m² corresponden a la superficie del antiguo talud norte existente antes del terremoto, por lo que 4.038 m² es el área efectivamente afectada por el avance del relave. El Volumen total desplazado es de aproximadamente 28.200 m³, de los cuales aproximadamente 24.000 m³ corresponden al relave en la zona de obstrucción del cauce. Esta obstrucción tiene una longitud de los 127 metros y el área comprometida es de 2.330 m². El material colapsado está constituido principalmente por relave.

La caracterización química del relave demostró que contienen concentraciones elevadas de cobre, manganeso y calcio. En esta caracterización se observan diferencias claras entre el suelo natural y el relave. Sin embargo, muestras de sedimento fino en el Estero El Sauce aguas arriba de la zona de derrumbe, demuestran la presencia de material similar al relave probablemente proveniente de la mina El Soldado. Asimismo, suelo de la ribera del Estero El Sauce también

presenta concentraciones de cobre altas, indicando que el Estero ha estado sometido a contaminación desde aguas arriba.

Los análisis de aguas de puntos aguas arriba de la zona de derrumbe, del agua estancada adyacente a la obstrucción y aguas abajo en un punto de control no mostraron presencia de elementos de importancia. Llama la atención que la alcalinidad es alta, de manera que se espera una mayor capacidad de neutralización del pH.

A partir de la información de precipitación se estimó la capacidad de transporte de material desde el relave a cursos de agua. En promedio se estima un aporte de 13 t/año, de las cuales un 81% serían aportadas entre los meses de mayo a julio.

Se realizaron tres tipos de experiencias para determinar el potencial de liberación de contaminantes de los relaves a la matriz acuosa: i) elución de sólidos en columna, ii) evaluación del potencial de acidificación y neutralización por pruebas estáticas, y iii) extracción secuencial. Los resultados de estas experiencias indican que el relave en contacto con agua libera potasio y calcio, elementos que no tienen implicancias ambientales de importancia. Bajo condiciones de oxidación, se determinó que ninguna de las muestras de relave tiene capacidad neta de formar drenaje ácido. Esto probablemente se debe a su contenido de calcita (determinado por difracción de rayos X). Por último, las experiencias de extracción secuencial demostraron que la fracción remanente de cobre en el relave estaría mayormente asociada a sulfuros y no a fases sorbidas. También permitió observar que la muestra de material fino del lecho del río aguas arriba del derrame fue la que más cobre liberó. Esto es otra indicación que este material probablemente proviene de la erosión de las laderas que drenan hacia la cuenca del Estero El Sauce desde la faena minera El Soldado.

Considerando las características específicas del sitio en estudio y la calidad química del relave y suelos aledaños, se considera que un posible problema está asociado al riesgo del aumento de la concentración de cobre en sedimentos y aguas debido a la incorporación de relave derivado del derrame. A pesar de esto, este efecto es comparativamente menor a la situación base. La situación base ya tiene un nivel alto de concentraciones de cobre, algunas excediendo los criterios de remediación para suelos y sedimentos.

Para permitir el paso del agua del Estero El Sauce en la temporada de lluvias, la DOH Regional propuso la construcción de un canal de desvío de 250 m de largo. Se verificó la capacidad de este canal encontrándose que no presenta riesgos de desborde con crecidas de hasta 100 años de período de retorno. Sin embargo, en el análisis se comprobó que las velocidades de escurrimiento están entre los 2 y 3 m/s, velocidades consideradas erosivas para el tipo de suelo presente en la zona.

En base a los antecedentes recopilados y análisis realizados en este estudio, se entregan las siguientes recomendaciones:

- Evitar que el relave colapsado sea transportado por el agua del Estero El Sauce. El canal propuesto por la DOH Regional debiera mantener un control de este proceso. A pesar de esto es necesario despejar el cauce y contener el relave de manera segura. En esta contención se debiera incorporar algún mecanismo de control de la erosión.
- Con respecto a la calidad de los suelos del Estero El Sauce, se recomienda hacer una caracterización más profunda de sus sedimentos desde la cabecera de la cuenca hasta el Estero El Cobre para evaluar con mayor detalle la dispersión del material proveniente desde la ladera aportante desde la mina.
- Para el canal de desvío se recomienda evaluar alternativas para prevenir la erosión. Esto puede significar ensanchar el canal y extender el talud, o utilizar defensas longitudinales.

2. PRESENTACIÓN

Luego del terremoto ocurrido en Chile el 27 de febrero de 2010 se registró el colapso parcial del tranque de relaves n° 5 de la mina Veta del Agua (UTM-WGS-84: N: 6381749.56, E: 300415.55), ubicado 9 km al noreste de la ciudad de Nogales, en la región de Valparaíso, obstruyendo la red de drenaje y alterando la morfología local producto del derrame de relave. Este relave se encuentra en un área caracterizada por la presencia de varios tranques de relaves asociados a la operación de la Mina El Soldado (Anglo American). El Ministerio de Obras Públicas, a través de la Dirección General de Aguas, encargó a DICTUC una cuantificación del problema ambiental en función de la información disponible en hasta ese momento.

En particular, el proyecto estuvo orientado a la descripción y caracterización preliminar rápida de la magnitud del área impactada, las secciones de la red de drenaje directamente comprometidas, la calidad físico-química del material derramado, y el potencial de movilización del relave e incorporación a la red de drenaje. Asimismo, en virtud de la información anterior, se propuso en este informe medidas preliminares orientadas a reducir los efectos ambientales negativos del evento. El carácter preliminar de esta evaluación se debe a que se requirió ejecutar trabajo de terreno y entrega de informes en un plazo bastante acotado que requirió centrar el trabajo en los aspectos fundamentales, en el uso de herramientas rápidas de medición y la toma de un número acotado de muestras que permiten tener efectivamente una noción de la magnitud del problema ambiental y disponer de información para la toma de decisiones contingentes.

La visita a terreno efectuada por profesionales de DICTUC, incluyó un equipo de cinco especialistas (Gonzalo Pizarro, Ingeniero Civil, PhD.; Pablo Pastén, Ingeniero Civil, PhD; Carlos Bonilla, Ingeniero Agrónomo, PhD; Felipe Tarud, Ingeniero Civil, Mag. Cs. de la Ing.; Sara Acevedo, Químico Ambiental UC).

3. DESARROLLO DEL ESTUDIO

3.1 Descripción de antecedentes disponibles

El Tranque de Relaves n° 5 de la mina Veta del Agua se encuentra 3 km al sur oeste del rajo abierto de la Mina El Soldado, sobre la orilla oeste del Estero El Sauce. Este tranque de relaves corresponde al depósito de materiales provenientes de la Planta de Tratamiento de Minerales Veta del Agua. De acuerdo a la Resolución N°1643 del Sernageomin del 28 de agosto de 2009 esta planta cuenta con un Plan de Cierre aprobado con un funcionamiento contemplado hasta noviembre de 2030. La Planta de Tratamiento de Minerales cuenta con una planta de chancado primario, secundario, y terciario, galpón de molienda y flotación, y canchas de secado de concentrados.

Aguas arriba en el Estero El Sauce se encuentra proyectada la ampliación de la zona de descarte de materiales de la mina El Soldado, de acuerdo a la figura siguiente.



El cuadro siguiente presenta una descripción resumida de la flora y vegetación, fauna, y suelos del área, tomada del Estudio de Impacto Ambiental "Continuidad Operativa Sustentable Mina El Soldado" presentado por Anglo American Sur SA en el 2009 y actualmente en evaluación en el SEIA.

Flora y vegetación

En las quebradas El Sauce, El Carmen y Los Quilos y el Sector de Yerbas Buenas – San José se identifican 191 especies distribuidas en 4 divisiones, 8 clases, 73 familias y 154 géneros; de las cuales 3 son plantas no vasculares. El 85% de las especies encontradas son nativas de Chile, con un 30% de endemismo. Existen en total 33 especies arbóreas, que constituyen el 18% de la flora (las que en su mayoría están formando bosques en fondo de quebradas y laderas de exposición sur); y 55 especies arbustivas (que forman el estrato bajo de los bosques y los matorrales que se ubican, preferentemente en laderas de exposición norte). De las 191 especies identificadas 3 especies están clasificadas en alguna categoría de conservación: Guayacán (Vulnerable), Belloto del Norte (Vulnerable) y Naranjillo (Rara). La especie arbórea en categoría de conservación con mayor presencia es Guayacán (1.367 individuos), concentrando cerca del 68% del número de individuos totales de especies en categoría de conservación en el área del proyecto. Las formaciones vegetacionales reconocidas son: Puyal, Matorral Xerófito, Guayacanal, Bosque Esclerófilo, Matorral Higrófilo y Estepa Subarbusativa.

Fauna

En las quebradas El Sauce, El Carmen y Los Quilos y el Sector de Yerbas Buenas – San José se identifican 55 especies de vertebrados terrestres, de las cuales 2 correspondieron a anfibios, 8 a reptiles, 39 a aves y 6 a mamíferos. En cuanto a la distribución de la fauna, el ambiente con mayor riqueza registrada fue el Bosque Esclerófilo, con 51 especies, lo cual representa un 92,73% del total de especies registradas. Un total de 5 especies se observaron como exclusivas de este ambiente, lo cual representa un 9,8% del total de especies registradas en el Bosque Esclerófilo. El Guayacanal y el Matorral Xerófilo presentaron un total de 41 y 37 especies cada una, lo cual representa un 74,55% del total de especies observadas en el área de influencia para el primer sitio, con un 67,27% para el segundo sitio y 0% de especies observadas como exclusivas respectivamente. El Puyal es el ambiente con menor representatividad con 36 especies identificadas, lo que representa el 65,46% del total de especies observadas. Del total de especies identificadas el 96,3% son nativas y sólo 3 son exóticas (3,7%), incluyendo la codorniz (*Callipepla californica*) en el grupo de las aves y el conejo (*Oryctolagus cuniculus*) en el grupo de los mamíferos. Todas las especies de reptiles registradas, salvo la lagartija lemniscata, son endémicas, lo que representa un 87,5% de endemismos para este grupo. Para el caso de las aves en cambio, sólo una es endémica, lo que representa un 2,6 % del total de especies de aves registradas. Para los mamíferos, el ratón cola de pincel (*Octodon degus*) es la única especie endémica observada, lo que representa un 16,7% del total de mamíferos registrados. Diez y siete de las especies observadas se encuentran en alguna categoría de conservación, lo que representa un 27,3% del total de especies observadas. Destaca el grupo de los reptiles, con el 100% de las especies observadas clasificadas en alguna categoría de conservación.

Suelo

Las quebradas El Sauce, El Carmen y el Sector de San José corresponden a zonas características de la zona central de Chile, con laderas húmedas de umbría, de altas pendientes con suelos franco-arcillosos, sin aptitudes agrícolas, de Clase VII principalmente (con comunidades boscosas); y laderas secas de solana de pendientes menores y suelos arcillosos muy degradados (con comunidades arbustivas). Es decir, son suelos con severas limitaciones que los hacen inadecuados para los cultivos, siendo fundamentalmente su uso (natural) el de tipo forestal.

3.2 Caracterización de áreas impactadas por el relave

3.2.1 Caracterización del área de derrame de relave

Para el levantamiento de la información geográfica de la zona afectada por el derrame del relave, se utilizaron dos receptores GPS absolutos (modelo Garmin etrex Vista C y Garmin etrex Vista HCx).

Con el objetivo de definir los alcances geográficos del derrame de relave se midieron los principales atributos que permitirán modelar procesos de erosión y lluvia-escorrentía.

En la Figura 1 se observa el alcance del área que colapsó producto del movimiento sísmico del 27 de febrero. Se estima que un área de 2.430 m² se desplazó y abarcó una superficie total de 10.510 m². Hay que destacar que una porción importante de esta superficie (60%) estaba cubierta por material de relave previo al terremoto (en forma de talud). Producto del sismo, el talud norte colapsó, y el relave avanzó hasta bloquear el cauce del Estero El Sauce, cubriendo un área total que no estaba previamente en contacto con el relave de 4.038 m² (P3+P4) (ver Figura 2 y Tabla 1). El Volumen total desplazado se estimó en función del volumen de obstrucción del cauce más el volumen estimado del sector P3 que se identifica en la Figura 2. El procedimiento se basó en calcular las áreas y estimar las diferencias de cotas en base a los datos proporcionados por el GPS. **El volumen estimado es de aproximadamente 28.200 m³.**

La Dirección de Obras Hidráulicas – V Región¹ estimó en forma preliminar que el terremoto había provocado un desplazamiento de 100 mil toneladas de material de relave, lo cual equivaldría aproximadamente a 76.000 m³. La diferencia de volumen entre lo estimado por DOH y DICTUC se explica por la consideración de DOH del material de relave del talud norte (ya existente previo al terremoto) en su cuantificación, y no del volumen de relave que efectivamente se desplazó y obstruyó el cauce.

¹ Fuente: MINUTA TECNICA DCPRH N°188 (19 Marzo 2010) – PROCESO N° 3705908 - ANT: Informe Técnico de Fiscalización 22, DGA Región de Valparaíso, de fecha 9 de marzo de 2010.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Tabla 1. Estimación de Volumen, cotas de planicies y taludes del Tranque de Relave Mina Veta del Agua.

	PUNTO GPS	COTA (msnm)	COTA Promedio (msnm)	Área Tranque No-Colapsado (m2)	Talud	Poniente
Planicie No Colapsada Tranque	122	470.2	469.8	4340	GPS 129	469.49
	123	470.9		Área Tranque Colapsado (m2)	GPS 131	449.78
	124	467.6		2430	DX	65
	125	469.0		Área Relave Colapsado (m2)		
	126	469.7		10510	H:V	3.30
	127	470.2		Área Cauce Obstruido (m2)	RAD	0.294
	129	469.5		2336	angulo	17
	130	471.2		Área P3 (m2)		
Planicie Zona Colapsada 1	133	465.4	464.7	1702	Talud	Oriente
	134	462.8		Área P3+P4	GPS 122	470.21
	135	464.2		4038	GPS 121	458.91
	136	466.6			DX	33.2
Planicie Zona Colapsada 2	137	459.2	460.2			
	138	459.6			H:V	2.94
	139	461.8			RAD	0.328
Planicie Zona Colapsada 3	153	455.6	454.6		angulo	19
	154	454.6				
	155	454.6				
	156	453.9				
Planicie Zona Colapsada 4	149	453.1	454.2			
	150	454.1				
	151	454.8				
	152	454.8				
				Volumen (m3)		
				APROX (P3+P4)	28222	

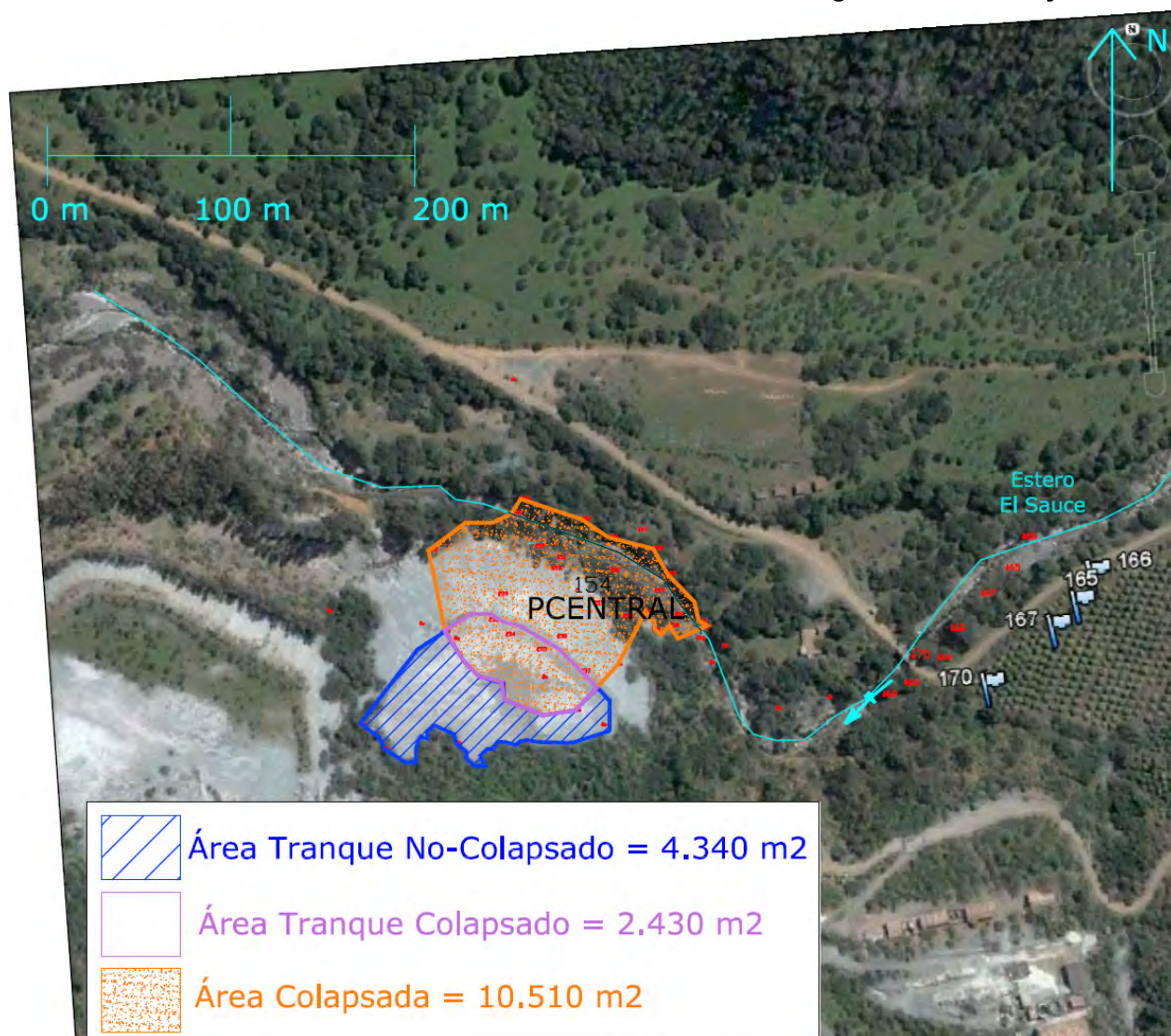


Figura 1. Representación de la zona afectada por el derrumbe del Tranque de Relave Mina Veta del Agua.
Punto central (GPS 154) de referencias con coordenadas (WGS-84):
N: 6381749.56 E: 300415.55, Elevación 454.59 msnm.

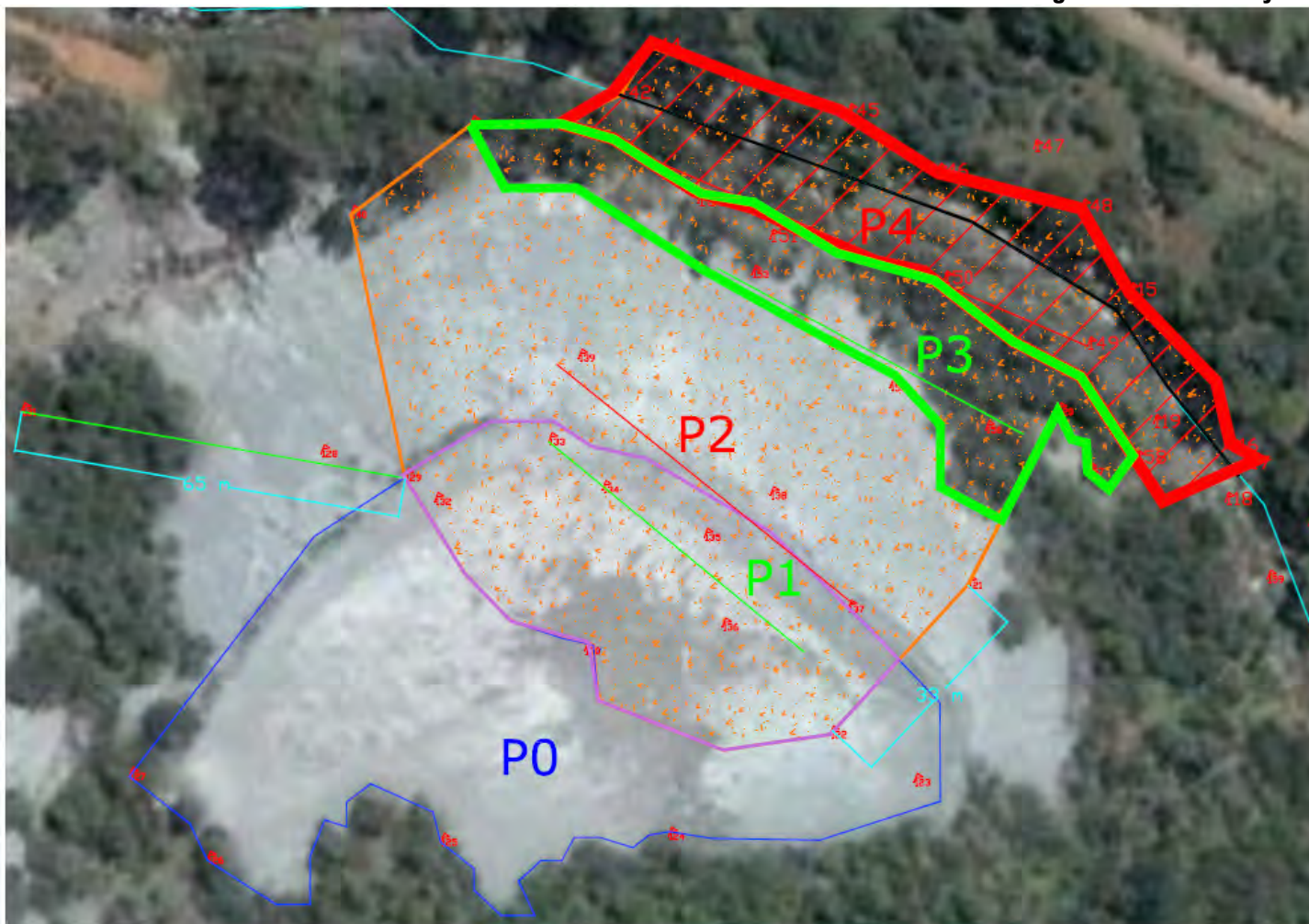


Figura 2. Estimación Volumen de Relave Derramado. Se indican polígonos de cobertura y cotas de sectores planicies (P0 a P4). El Volumen de relave encontrado en P3+P4 equivale al total desplazado por el movimiento sísmico $\sim 28.200 \text{ m}^3$.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

La zona de obstrucción de cauce se dimensionó seccionando el área en tres zonas con cotas similares (ver Figura 3 y Figura 4), cuyas áreas se ponderaron por las diferencias de cotas con el cauce o el punto GPS de terreno más adecuado. De esta manera, se obtuvieron volúmenes parciales que en total suman $\sim 24.500 \text{ m}^3$. En la Tabla 2 se pueden apreciar detalles de este cálculo. Otras dimensiones de interés, son la longitud del cauce obstruido que alcanza los 127 metros y el área comprometida que es de 2330 m^2 . Fotografías y puntos georeferenciados de esta obstrucción pueden revisarse en el **Anexo 1**.



Figura 3. Dimensionamiento de la obstrucción del Estero El Sauce.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Tabla 2. Estimación volumen de obstrucción del Estero El Sauce.

Zona	PUNTO GPS	COTA (msnm)	COTA Promedio (msnm)	Areas Relave (m2)		Volumen (m3)
Cauce	118	442.09	442.09			
Relave	119	446.17	447.975	A1	500	2852.5
Relave	158	449.78				
Relave	149	453.14	447.615	A2	1537	19637.7
Relave	115	442.09				
Relave	148	453.86	453.98	A3	299	1940.51
Relave	150	454.1				
Relave	146	455.07	454.95	A2	1537	19637.7
Relave	151	454.83				
Relave	145	456.51	455.67	A3	299	1940.51
Relave	152	454.83				
Relave	144	451.22	451.22	A3	299	1940.51
Cauce	142	441.73				
Terreno	147	452.42	444.73			
				Totales	2336	24431



Figura 4. Áreas de obstrucción seleccionadas para la estimación del volumen total de relave sobre el cauce del Estero El Sauce.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

En la Figura 5 se observa una alternativa de solución propuesta por la DOH Regional. Se propone desviar el cauce del estero El Sauce y construir un canal trapezoidal de desvío en el sector entre el camino y el cauce obstruido. Este canal sería de 10 m de ancho, con talud 0.5, pendiente 0.5% y de aproximadamente 250 metros de largo. En la Tabla 3, se presentan pendientes del cauce tanto para la zona de obstrucción como para la zona del puente. Se observa que la pendiente baja considerablemente en la zona de obstrucción (0.28%), la cual es incluso menor que la considerada para el canal de desvío. La Figura 5 también muestra la pendiente obtenida en el cauce en la zona del puente, que baja de un 7% a un 2% en 60 metros aguas arriba del puente (ver Tabla 3). Este dato es útil para poder verificar los caudales máximos del estero en esta zona en función de las alturas de aguas reportadas, cuyas marcas se pueden apreciar bajo el puente.

En la Figura 6 se aprecian las pendientes estimadas para la zona de colapso del relave. Detalles del valor de estas pendientes se pueden ver en Tabla 4. Las pendientes S_i corresponden a las pendientes ponderadas de secciones de interés (zonas de erosión) para cálculos posteriores como tasas de erosión y avance del relave. Existe una zona de acumulación de mayor altura entre los puntos GPS 144 y 146 y delimitada por el eje del río (que está bajo el relave), por esta razón, se aprecia por ejemplo una pendiente negativa al final de la pendiente S1.

Tabla 3. Pendientes del cauce en la zona de obstrucción y en la zona del puente (Coordenadas UTM-WGS-84: 6381713.75 N, 300 598.92 E).

PUNTO GPS	COTA (msnm)	DX (m)	Pendiente (%)
118	442.09	127	0.28%
142	441.73		
166	467.32	38.33	7%
167	464.68	25.5	5%
168	463.48	51.6	2%
169	462.28		

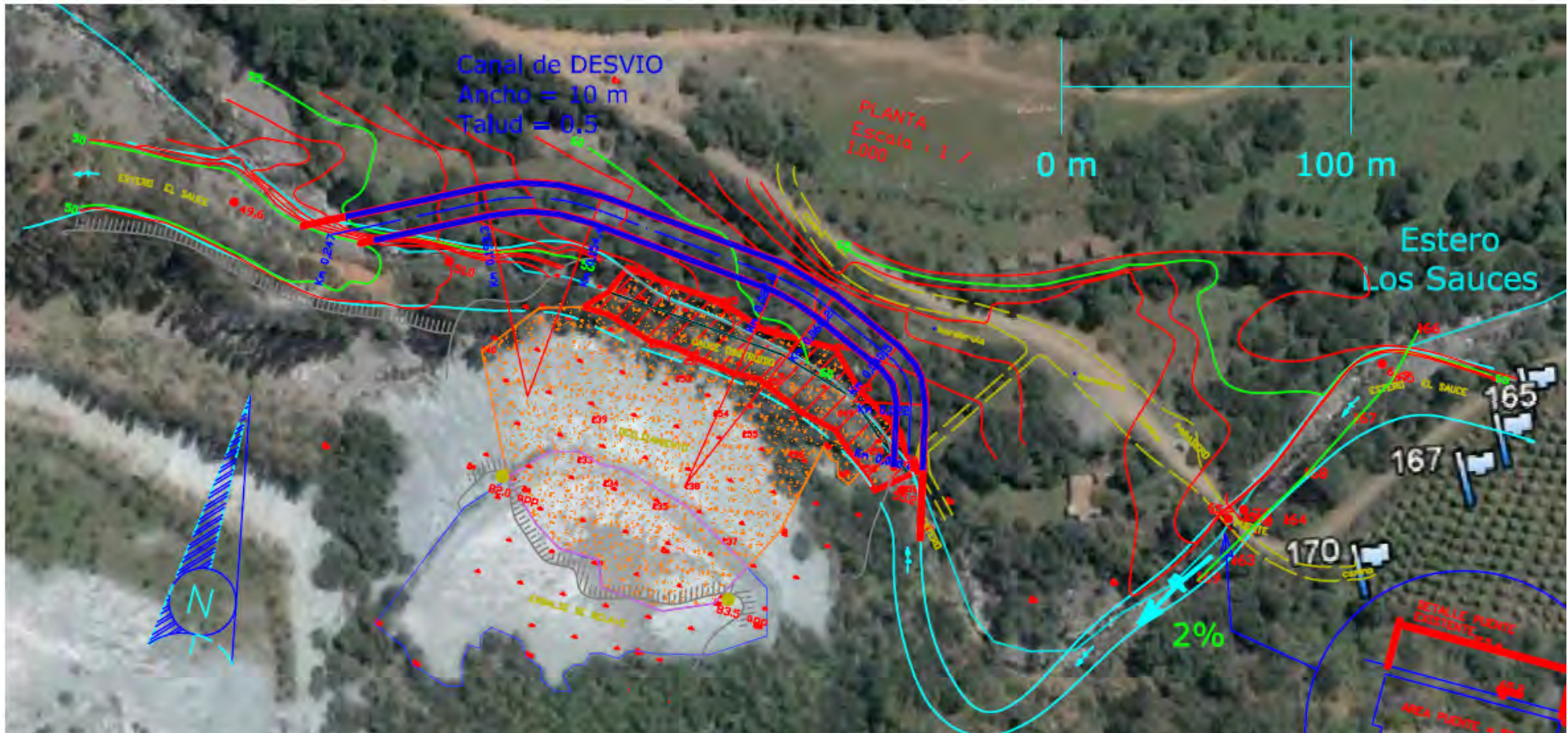


Figura 5. Ubicación de canal de desvío del Estero El Sauce proyectado por la DOH regional. Sería un canal trapecoidal, de ancho 10 metros, talud 0.5, pendiente 0.5% y de 250 metros de largo aproximadamente. Fuente: DOH Región de Valparaíso y elaboración propia. Se observa una pendiente de un 2% del cauce en la zona aledaña al puente (GPS 170).

Tabla 4. Pendientes de la zona de derrame del relave Mina Veta del Agua. Las pendientes están asociadas a las áreas de erosión que se analizarán más adelante.

	PUNTO GPS	COTA (msnm)	DX (m)	Pendiente (%)	Pendiente Promedio Ponderada (%)	Zona de Erosión	Área (m2)
S1	145	456.51	23.1	-7%	-4%	A1	530
	146	455.07	29.49	-1%			
	151	454.83					
S2	148	453.86	51.21	20%	20%	A2	388
	116	443.53					
S3	129	469.49			25%	A3	4130
	133	465.4	23	18%			
	140	452.18	50.32	26%			
	141	449.78	55.15	28%			
	139	461.8	16.5	22%			
	152	454.83	32.1	22%			
S4	130	471.17			20%	A4	5462
	135	464.2	26.35	26%			
	138	459.63	14.25	32%			
	155	454.59	26.6	19%			
	150	454.1	20.12	2%			
	122	470.21					
	137	459.15	21.21	52%			
	156	453.86	37.8	14%			
	149	453.14	23	3%			
S5	128	469.73			41%	A5	2166
	131	449.78	50.48	40%			
	140	452.18	41.45	42%			
S6	123	470.93			43%	A6	760
	855	455	36.82	43%			
S7	126	469.73			0.33%	A7	4340
	129	469.49	72	0.33%			

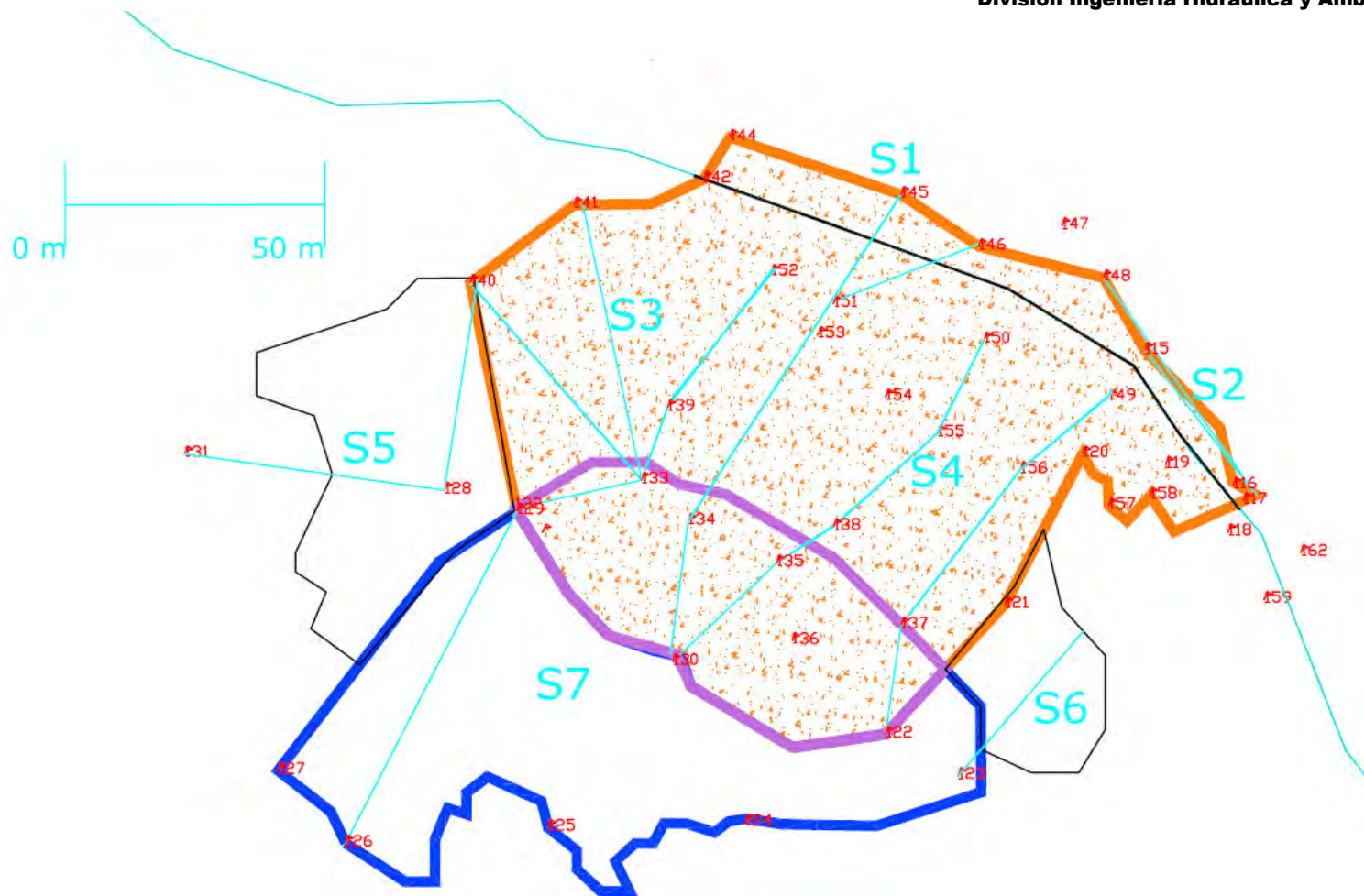


Figura 6. Estimación de pendientes en zona de colapso del relave.

3.2.2 Caracterización hidrológica de la zona afectada

La caracterización del régimen de precipitaciones en la zona afectada se hizo en base a los registros de lluvias de la estación climatológica Catemu (32°44'04" S, 70°56'03" O), dependiente de la Dirección General de Aguas (código 05421005-1). La estación Catemu se ubica 19 km al sur oriente del tranque de relave, posee registro de precipitación a partir del año 1954 y es la estación climatológica más cercana con un registro de precipitaciones suficientemente largo para realizar un análisis hidrológico. En el análisis se emplearon las lluvias mensuales comprendidas entre los años 1978 y 2007 (30 años de registro). El sector en el cual se ubica la zona afectada se caracteriza por un régimen pluvial bien definido, con una precipitación del orden de 270 mm/año. La mayor parte de las precipitaciones se concentran entre los meses de mayo y agosto, con un 83% del total de agua caída (ver Tabla 5 y Figura 7). En estos meses la dispersión de los valores mensuales es menor a la observada el resto del año, registrándose en todos ellos un coeficiente de variación inferior al 120%.

Tabla 5. Precipitaciones medias mensuales (mm) en el sector de estudio según registros de lluvia en estación climatológica Catemu (período 1978-2007).

	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Media	0,3	0,3	3,9	10,0	43,3	69,1	75,5	36,9	18,9	7,3	5,9	0,4
Desv	1,0	1,2	8,1	14,9	42,8	82,1	79,1	34,4	24,1	14,9	13,4	1,0
Coef Var	383	403	207	149	99	119	105	93	128	203	229	253
Máxima	5	6	35	53	152	291	329	157	92	59	56	3
Mínima	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

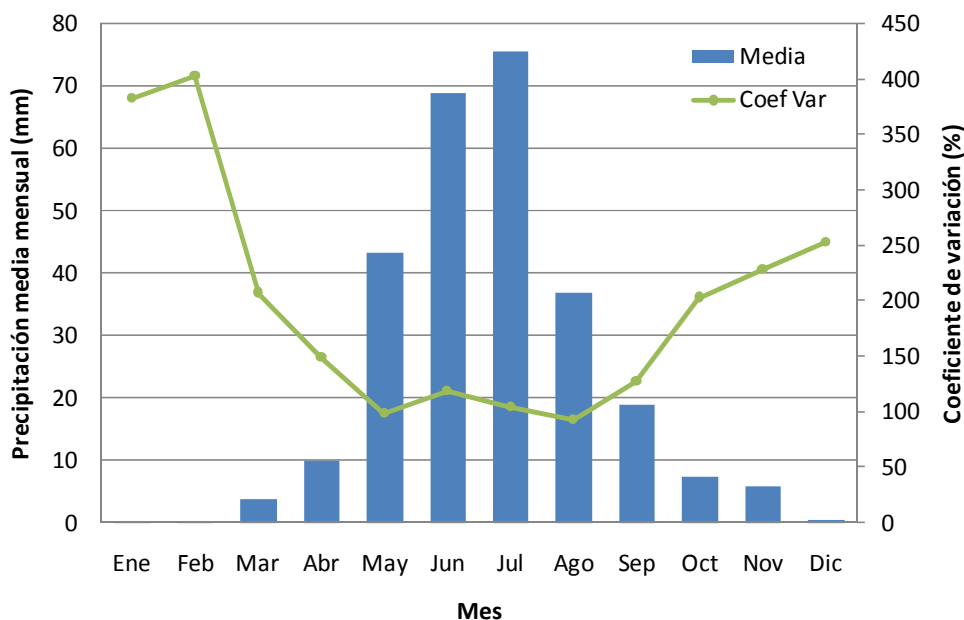


Figura 7. Distribución mensual y coeficiente de variación de las precipitaciones en la estación climatológica Catemu.

Con el objetivo de obtener una dimensión preliminar de las características e intensidades de las precipitaciones en el sector afectado por el tranque de relave, se revisó el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Continuidad Operativa Sustentable Mina El Soldado, elaborado por Anglo American Sur S.A. en diciembre del 2009. El citado estudio se concentró en un área ubicada aproximadamente 3 km al nororiente del tranque colapsado, e incluyó tanto un análisis de las precipitaciones como de los caudales en el Estero Los Sauces. Mayor detalle del procedimiento y resultados del estudio de Anglo American Sur S.A. se presenta en el **Anexo 2**. Los valores estimados en el informe de Anglo American Sur S.A. se resumen en la Tabla 6. De acuerdo a esto, la precipitación máxima registrada en 24 horas sería del orden de 100 mm para un período de retorno de 5 años, de 140 mm para T=25 y cercana a 180 mm para T=100.

Tabla 6. Precipitaciones en estación Tranque: promedio de distribuciones Log normal y Gumbel I.

T (años)	Precipitación Máx 24 h
	(mm)
2	72
5	99
10	117
25	140
50	158
100	175
200	192
500	215

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto
Continuidad Operativa Sustentable Mina El Soldado. Anglo
American Sur S.A. Diciembre, 2009.

La red hidrográfica en la zona se compone de una combinación de cursos permanentes y otros que aparecen sólo durante la temporada de lluvias (ver Figura 8). El colapso del tranque de relaves afectó el cauce del Estero El Sauce, el cual posee a la altura del tranque una cuenca de 33 km². La Figura 8 muestra la cuenca aportante y la topografía del terreno mediante la identificación de las pendientes. Como se puede observar, el Estero El Sauce da origen al Estero El Cobre, y posteriormente al Estero El Melón. Si bien el tranque de relaves de la Mina Veta del Agua se encuentra ubicado en la ribera sur del Estero El Sauce, el material colapsado bloqueó el cauce del estero y se extendió hasta nueve metros en la ribera norte. En la sección Revisión y Recomendaciones Diseño del Canal de Desvío (By-Pass) se entregan más antecedentes sobre los caudales estimados a la altura del tranque. Esto se complementa con información adicional en el **Anexo 3**.

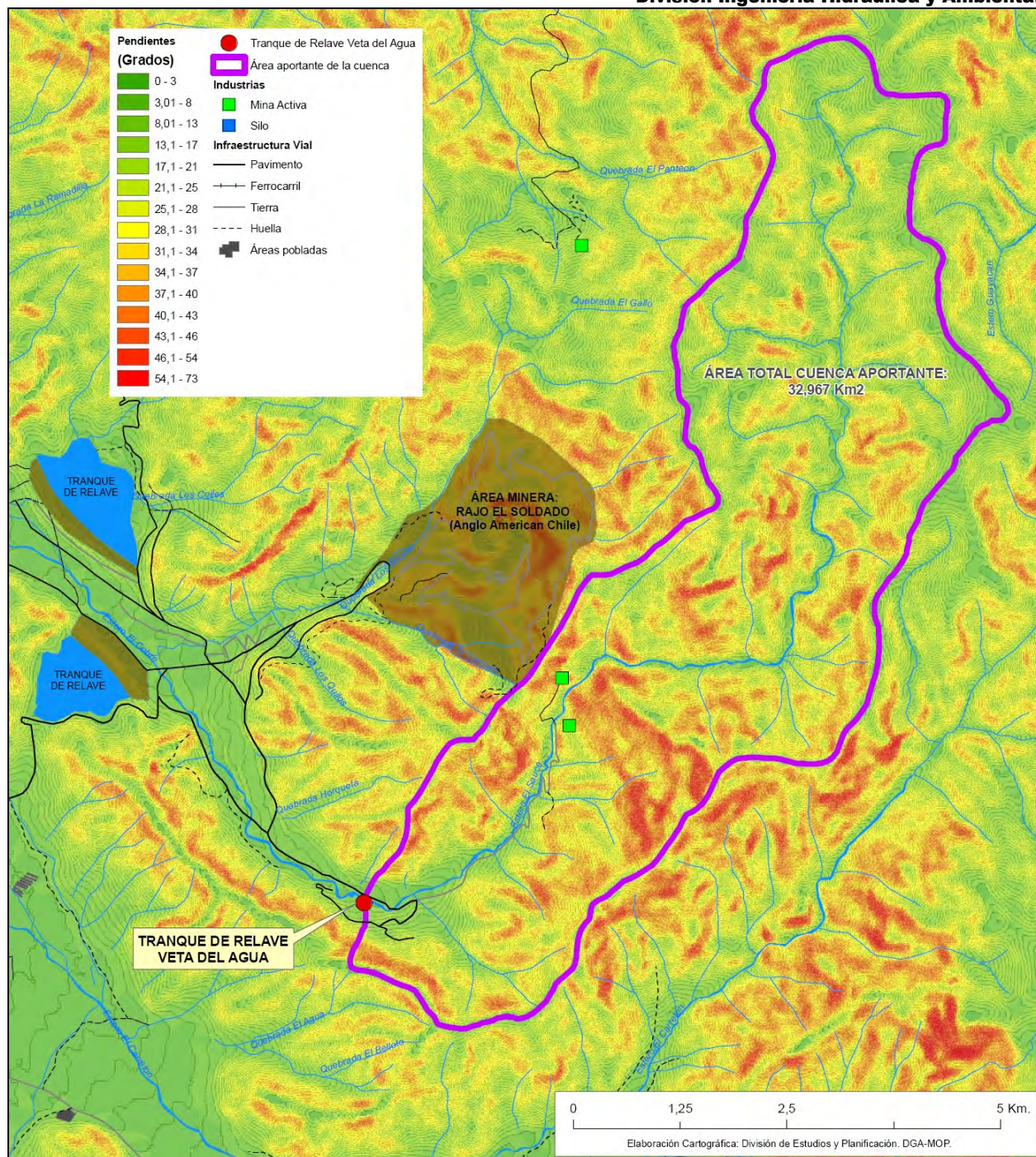


Figura 8. Cuenca aportante y características de los cauces y relieve en el entorno del área afectada. Elaboración: División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas-MOP, 2010.

3.2.3 Identificación georeferenciada de lugares de muestreo

Los objetivos de este trabajo y las condicionantes de plazos y recursos disponibles requirieron de la realización de un muestreo dirigido y un screening en terreno y laboratorio. Los expertos analizaron los antecedentes disponibles del sitio, los antecedentes aportados por profesionales y por los habitantes del lugar, las características de la faena industrial asociada al tranque de relaves, y las observaciones del recorrido por toda el área impactada por el colapso y sus alrededores.

Se tomaron 10 muestras de suelo y 3 de agua cuidadosamente seleccionadas. De las 10 muestras de suelo, 5 corresponden a suelo de relave y 5 a suelo original (3 corresponden a ribera y 2 al lecho del río). En la Figura 9 se puede observar la distribución espacial del muestreo. Las muestras en naranja corresponden a muestras sólidas, mientras los números celestes se refieren a muestras líquidas en zonas de acumulación de agua (no existe escurrimiento de agua en el lecho en época estival, ya que el escurrimiento está asociado a precipitaciones, ver Figura 7). Los puntos de muestreo 874 y 873 fueron tomados 1.9 km aguas abajo de la zona afectada y los puntos 869, 870, 871, 872 aproximadamente 250 metros aguas arriba. Las muestras de relave fueron heterogéneas, se muestreo material arrastrado hasta la obstrucción de cauce (880), en la zona de ruptura del tranque (877), en la porción no colapsada del tranque (878-879) y en el tranque alto colindante (876).

Para ver detalles de posición, tipo de suelo, fotografías y código de muestras, ver Tabla 7.



Figura 9. Plano de localización de puntos georeferenciados de muestreo. En naranja se observan las muestras sólidas y en celeste las líquidas. Los puntos de muestreo 874 y 873 fueron tomados 1.9 km aguas abajo de la zona afectada y los puntos 869, 870, 871, 872 aproximadamente 250 metros aguas arriba.

Tabla 7. Detalle de muestreo en terreno.

Tipo de Muestra	Código de Muestra	Proyección X Este (m) Datum: WGS-84	Proyección Y Norte (m) Datum: WGS-84	Tipo de suelo	Comentario	Código Foto (ver Anexo 4)
Sólido	869	300609.04	6381714.51	Suelo original	Suelo natural, muestra ubicada orilla cauce río, a la altura del puente aguas arriba del desplazamiento del talud del relave	-
	870	300594.08	6381702.67	Suelo original	Muestra suelo sedimento ribera	100
	871	300594.07	6381693.91	Suelo original	Muestra suelo "relave río" (Lecho)	78
	872	300555.51	6381684.70	Suelo original	Muestra suelo nativo. Muestra tomada en la ribera oriente del río	107
	873	298945.91	6382741.09	Suelo original	Muestra de suelo fondo del lecho seco. Muestra aguas abajo para control.	112
	876	300259.88	6381643.94	Relave	Relave tranque superior no colapsado	127
	877	300344.76	6381724.51	Relave	Relave en zona de ruptura del tranque	27
	878	300417.76	6381661.31	Relave	Relave en zona alta y que no colapsó	17
	879	300345.97	6381659.31	Relave	Relave en zona alta y que no colapsó	20

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Tipo de Muestra	Código de Muestra	Proyección X Este (m) Datum: WGS-84	Proyección Y Norte (m) Datum: WGS-84	Tipo de suelo	Comentario	Código Foto (ver Anexo 4)
	880	300455.47	6381761.24	Relave	Muestra de suelo dentro del relave. Material deslizado durante el evento. Material consolidado, duro a la pala, color gris/rojizo, con nivel considerable de humedad.	178
Agua	867	300478.11	6381726.86	No aplica	Muestra de agua en zona de estancamiento inmediatamente aguas arriba de la obstrucción por el relave. No más de 30 cm de profundidad pH= 6.81 – O ₂ = 4.05 mg/L – CE = 451 uS/cm	66
	868	300513.63	6381705.49	No aplica	Agua fluyendo. No más de 10 cm de profundidad pH= 6.98 – O ₂ = 5.04 mg/L - CE= 445 uS/cm	99
	874	298946.48	6382740.66	No aplica	Muestra de agua. Muestra aguas abajo para control. pH= 6.87 – O ₂ = 4.15 mg/L - CE= 416 uS/cm	110

3.3 Caracterización físicoquímica: screening

Como método de *screening in situ*, se empleó la técnica de análisis químico denominada fluorescencia de rayos X (XRF) portátil que permitió realizar mediciones puntuales de metales y metaloides y obtener resultados inmediatos que permitieron definir tipos y lugares de muestreo. Se usó un Analizador Portátil Alfa-8000 LZ Serie 9207V) con tubo de tungsteno usando el programa analítico de análisis para suelos, con 120s tiempo total de medición; live time=90s aprox. En esta técnica, se genera un haz de rayos X que al ser irradiado sobre la muestra produce una señal de fluorescencia que está directamente asociado a su composición y concentración. Con este dispositivo se puede identificar la presencia de 21 elementos: Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Ba, Hg, y Pb.

La calidad cuantitativa de los resultados de la técnica de XRF portátil depende de la matriz analizada, el software de cuantificación, el parámetro considerado, y la presencia de interferentes. En consecuencia, cuando no se ha hecho una validación previa con otras técnicas, debe considerarse a priori que XRF entrega resultados semicuantitativos, lo que es suficiente para el propósito empleado en este estudio. En este caso, al contrastar ex post los resultados de *screening* versus los resultados obtenidos con las técnicas rutinarias lentas en laboratorio (espectrometría ICP y AA) se encontró una muy buena correlación entre los valores reportados por distintas técnicas (ver **Anexo 5**).

El análisis de *screening* en terreno fue apoyado por un análisis de más detallado en el laboratorio con la técnica de fluorescencia de rayos X con reflexión total (TXRF) que permitió definir rápidamente muestras y parámetros para análisis en laboratorio con técnicas rutinarias más demorosas y bajo certificación (espectrometría ICP y AA). La medición se realizó en un equipo S2Picofox Bruker con ánodo de Mo, y 50 kV, para 750 uA de corriente, usando Ga como estándar interno.

La Tabla 8 y la Tabla 9 presentan los valores de concentraciones medidos con XRF y TXRF, respectivamente. Se identificaron tres tipos de muestras que representan el sitio: (a) material original del sitio; (b) relave; y (c) material del lecho del Estero El Sauce aguas arriba del sitio

Para poner en contexto los valores de la Tabla 8 y la Tabla 9 es necesario considerar valores de referencia que permitan evaluar el significado del valor de la concentración en relación a sus efectos. Aunque en Chile no se han establecido límites de concentración que una vez superados obligan a la descontaminación de un suelo, se dispone como referencia los valores de normativa extranjera (por ejemplo, los valores de remediación para el cobre en EE.UU. son de 3100 mg/kg para uso residencial y 41.000 mg/kg para uso industrial). En el relave derramado se midieron concentraciones hasta 10.000 mg/kg de cobre. Para mayor información sobre la variabilidad de los valores usados como criterios que gatillan remediación se recomienda revisar **Anexo 6** y la

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Figura 10. La Tabla 10 y Tabla 11 presentan valores de referencia para la comunidad internacional y nacional. La Figura 10 muestra el rango de variación de los valores adoptados por distintos países para cada parámetro.

Como criterio general, en este trabajo se usará la columna asociada al percentil 50 en la Tabla 10, que indica valores que gatillan remediación en un conjunto de países de referencia. El percentil 50 define un valor tal que aproximadamente la mitad de los países adoptan criterios de remediación más estrictos y la otra mitad adopta criterios de remediación menos estrictos para el parámetro en cuestión. Es importante recalcar que se consideró los valores que gatillan remediación para suelos de *uso industrial*, que determina valores menos exigentes respecto a cuándo se considera un uso residencial.

El análisis integrado de los valores presentados desde la Tabla 8 a la Tabla 11 y la Figura 11 permite identificar que el único parámetro que de acuerdo a los resultados sería de interés es la concentración de cobre. Es destacable también que los sedimentos del Estero El Sauce presentan una concentración superior al límite de remediación. Esto se podría atribuir al aporte de sedimentos a la cuenca desde las operaciones de la mina El Soldado. La Figura 12 presenta la posición de la mina el Soldado aguas arriba del lugar del derrame. La Figura 13 muestra un detalle de una ladera que aporta directamente material al cauce del Estero El Sauce, apreciándose cárcavas atribuibles a procesos de erosión e inestabilidad del material granular depositado sobre la ladera desde la operación minera. Los antecedentes geológicos indican que la mineralización de cobre consiste fundamentalmente de calcopirita, bornita, calcosina, pirita, y hematita, con minerales subordinados como digenita, covelina, esfalerita, galena y tetraedrita. Esto explicaría enriquecimientos de hierro, cobre, cinc y su asociación con sulfuros en el material aportado por la mina.

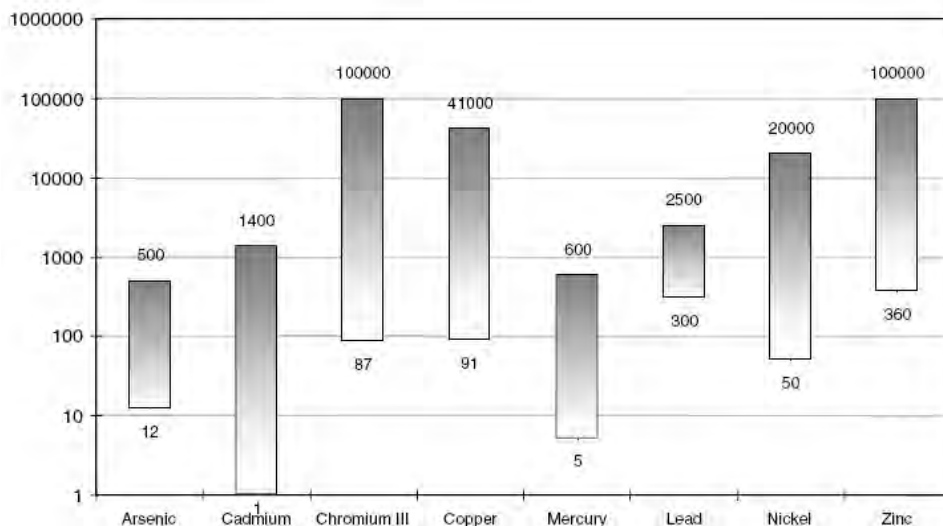


Figura 10. Rangos de variación para los valores de parámetros que gatillan remediación de un suelo de uso industrial. Este gráfico demuestra que los valores pueden variar desde uno a tres órdenes de magnitud. (Fuente: Provoost, J., Cornelis, C., & Swartjes, F. (2006). Comparison of soil clean-up standards for trace elements between countries: Why do they differ? Journal of Soils and Sediments, 6(3), 173-181.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Tabla 8. Concentraciones elementales en mg/kg medidas con XRF. Se observa que la mayor concentración de Cu se encuentra en el material del lecho del Estero El Sauce aguas arriba de la zona de relave. Una explicación probable es que el lecho del Estero tiene restos de material arrastrado directamente desde la zona de la mina El Soldado. En la fotografía satelital se observa evidencia de erosión en la ladera proveniente de la mina.

Tipo	Material original					Material relave				
	Suelo natural	Suelo ribera	Sedimento aguas arriba El Sauce	Suelo ribera	Sedimento aguas abajo El Sauce	Relave tranque superior	Relave	Relave	Relave	Relave
Muestra	869	870	871	872	873	876	877	878	879	880
Cu	385	558	4.621	1.403	1.049	1.156	2.101	16.371	1.811	1.097
Cu +/-	10	13	43	20	18	19	28	181	25	17
Zn	102	124	302	115	187	31	64	1.093	27	36
Zn +/-	5	6	8	6	7	4	5	22	5	4
As	24	27	31	18	21	8	10	147	<LOD	7
As +/-	2	3	3	2	3	2	2	8	6	2
Pb	9	<LOD	102	10	45	<LOD	<LOD	389	9	<LOD
Pb +/-	2	8	3	2	3	7	6	9	2	6
Fe	36.677	65.836	26.644	40.040	46.643	24.094	40.393	46.949	25.134	24.443
Fe +/-	377	682	225	376	459	251	396	518	261	233
Mn	1.853	677	1.246	1.500	2.070	1.027	1.642	1.913	834	1.008
Mn +/-	47	36	31	39	49	35	43	53	32	31
Ti	2.960	5.421	1.518	3.169	4.085	2.496	2.376	3.253	2.528	1.674
Ti +/-	218	283	136	196	233	202	197	247	184	161
Cr	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Cr +/-	127	145	85	116	125	123	120	148	117	101
Co	<LOD	66	24	30	58	<LOD	<LOD	45	41	<LOD
Co +/-	28	13	6	9	10	22	28	11	8	21
Ni	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Ni +/-	31	38	23	29	32	29	31	42	30	25
Se	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Se +/-	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2
Rb	75	66	17	45	56	62	15	54	21	30
Rb +/-	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1
Sr	119	189	32	95	102	139	75	84	71	48
Sr +/-	2	3	1	2	2	3	2	2	2	2
Zr	68	66	39	52	57	104	43	42	96	56
Zr +/-	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Mo	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Mo +/-	50	53	38	45	48	49	47	55	49	44
Ag	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	42	<LOD	<LOD
Ag +/-	36	37	28	33	35	35	34	13	35	31
Cd	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Cd +/-	46	48	34	41	44	46	44	51	44	39
Sn	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Sn +/-	80	82	55	67	75	78	73	86	74	64
Sb	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Sb +/-	85	88	57	71	80	82	77	92	78	67
Ba	544	645	<LOD	<LOD	503	749	362	<LOD	<LOD	339
Ba +/-	99	121	193	258	102	95	92	336	243	77
Hg	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Hg +/-	6	7	4	5	6	6	6	8	6	5

Tabla 9. Concentraciones elementales (mg/kg) de acuerdo a la técnica TXRF.

Tipo	Material original					Material relave				
	Suelo natural	Suelo ribera	Sediment o aguas arriba El Sauce	Suelo ribera	Sediment o aguas abajo El Sauce	Relave tranque superior	Relave	Relave	Relave	Relave
Muestra	869	870	871	872	873	877	876	878	879	880
Cu	102	491	9.986	1.164	940	1.524	440	5.626	714	951
Fe	4.538	34.513	43.155	20.774	27.247	23.832	2.172	12.064	4.961	22.188
As	3	7	65	8	15	1	1	52	2	2
Zn	26	111	635	100	143	43	10	329	14	46
Mn	356	621	2.637	1.201	1.520	1.216	146	623	221	1.174
Ca	3.107	7.341	59.901	9.303	5.919	19.795	3.559	16.391	6.975	24.170
S	48	99	2.378	128	127	-	-	1.295	31	578
Ti	366	2.279	2.238	1.410	1.771	1.452	125	597	417	1.589
V	19	194	119	86	133	88	13	28	13	117

Tabla 10. Valores que gatillan remediación para países desarrollados en suelos de uso industrial. Se observa que los valores varían hasta tres órdenes de magnitud. Cabe señalar que los valores son más restrictivos si se trata de suelos de uso residencial (Fuente: Provoost, J., Cornelis, C., & Swartjes, F. (2006). Comparison of soil clean-up standards for trace elements between countries: Why do they differ? Journal of Soils and Sediments, 6(3), 173-181.

Contaminant (mg/kg dm)	Belgium ¹	Germany	France	Sweden + groundwater ³	Sweden - groundwater ⁴	Great Britain	Canada	U.S.A.	Minimum	25 th percentile	50 th percentile	75 th percentile	Maximum
Arsenic	300	140	120	15	40	500	12	260	12	34	173	270	500
Cadmium	30	60	60	1	12	1400	22	450	1	20	254	158	1400
Chromium III	800	1000	7000 ²	250	250	5000	87	100000	87	250	14298	5500	100000
Copper	800	N.A.	950	200	200	N.A.	91	41000	91	200	7207	913	41000
Mercury	30	80	600	5	7	480	50	310 ⁵	5	24	195	353	600
Lead	2500	2000	2000	300	300	750	600	750	300	525	1150	2000	2500
Nickel	700	900	900	150	200	5000	50	20000	50	188	3488	1925	20000
Zinc	3000	140	120	700	700	500	360	100000	360	700	20952	3000	100000

N.A.: Not Applicable

¹ Soil degree Viarebo from July 8, 2002

² Chromium total

³ Sweden + groundwater describes the landuse type light industry plus the use of groundwater

⁴ Sweden - groundwater describes the landuse type light industry without the use of groundwater

⁵ 310 describes the chlorinated mercury, while the organic-mercury clean-up standard is 62 mg/kg.dm. The clean-up standard of 310 mg/kg dm was used in this comparison.

Tabla 11. Valores a partir de los cuales se considera excesiva la concentración de metales (mg/kg) en una matriz sólida a ser aplicada en el suelo. Fuente: Elaboración de guía de aplicación al suelo de residuos orgánicos. Servicio Agrícola y Ganadero, SAG, Chile.

Metal (mg/kg)	1	2	3	4
Arsénico	20	50		
Bario	200	2000		
Cadmio	1	20	1 – 20	3
Cobalto	20	300		
Cromo	100	800	100 – 1.000	
Cobre	50	500	50 – 1.000	140
Mercurio	0,5	10	1 – 16	1,5
Molibdeno	10	200		
Níquel	50	500	30 – 300	75
Plomo	50	600	50 – 750	300
Estaño	20	300		
Zinc	200	3000	150 – 2.500	300
1	Nivel de referencia en Holanda. Nivel indicativo por encima del cual hay contaminación demostrable.			
2	Nivel C en Holanda. Superado este valor el suelo ha de ser saneado.			
3	Límite de concentración para poder añadir lodos en España (suelos de pH <7 y >7 respectivamente)			
4	Máximo aceptable en suelos agrícolas (CE, 1986)			

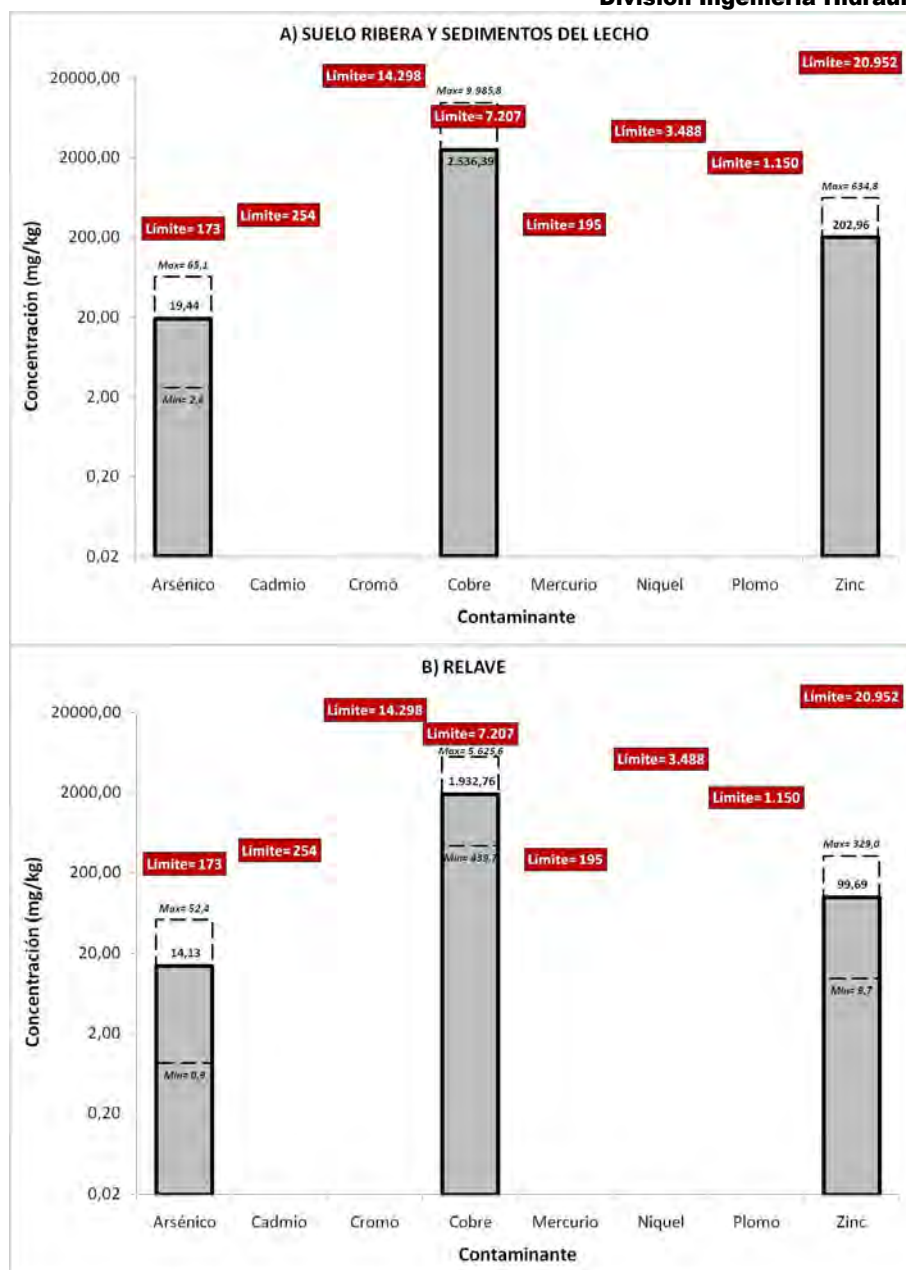


Figura 11. Comparación entre los valores observados (Panel A: relaves; Panel B: suelos originales) para especies tóxicas y el nivel de acción correspondiente al percentil 50 indicado en la Tabla 10 (valor destacado en rojo). Las columnas contienen el valor promedio observado (relleno gris) y los extremos (línea discontinua). Se observa que la concentración de contaminantes de los relaves medidos está por bajo de los valores de acción y que el contaminante comparativamente de mayor preocupación es el cobre. Por otra parte el material original característico tiene para el cobre un máximo superior al nivel de referencia para gatillar una remediación. Este valor corresponde al material fino presente en el lecho del río aguas arriba de la zona del derrame, y probablemente correspondería al material arrastrado de la ladera que drena al Estero El Sauce desde la mina El Soldado.



Figura 12. Ubicación de la faena minera El Soldado y su influencia aguas arriba del área de derrumbe en el Estero El Sauce.



Figura 13. Detalle de la erosión de la ladera que contiene material granular proveniente de la faena minera. Se observa que este material ha bloqueado caminos que existían anteriormente. La presencia de cárcavas en el talud indica que la acción erosiva y la inestabilidad del material aporta sedimentos con un contenido significativo de cobre a la cuenca del Estero El Sauce.

3.4 *Análisis integrado y caracterización en laboratorio acreditado*

Para el muestreo y preservación de las agua naturales se aplicó el método descrito en las normas oficiales chilenas: NCh411/2 Of. 96 y NCh411/3 Of. 96, y la sección N°1060 (Collection and Preservation of Samples) de la referencia técnica “Standards Methods for Examination of Water & Wastewater” (APHA, AWWA, WEF, 2006). Para el análisis de las aguas naturales se aplicó el método descrito en las normas oficiales chilenas: NCh2313/10 Of. 96, DS N°879 de 1996 del MOP; NCh2313/14 Of. 97, DS N°949 de 1997 del MOP; y NCh2313/17 Of. 97, DS N°1144 de 1997 del MOP, y las secciones N°3111 (Metals by Flame Atomic Absorption Spectrometry), de la referencia técnica “Standards Methods for Examination of Water & Wastewater” (APHA, AWWA, WEF, 2006).

Para el muestreo de los suelos se aplicó el método descrito por Mason, (1992), “Preparation of Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies”, EPA/600/R-92/128. Para el análisis de las muestras de suelo se aplicó el método descrito por Sadzawka et al., (2004), “Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos”, Comisión de Normalización y Acreditación, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, y por Pansu y Gautheyrou, (2006), “Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods”, Springer.

Las muestras fueron preservadas y mantenidas de acuerdo a los tiempos y procedimientos estándar recomendados para cada parámetro. Las muestras fueron analizadas por el laboratorio de Análisis de Aguas y Riles de DICTUC SA, acreditado INN ISO17025. Las Tablas 12 a 14 presentan los resultados de los análisis de aguas y sólidos en laboratorio acreditado (ver certificados en el **Anexo 7**).







Al comparar los resultados del laboratorio acreditado con los obtenidos por la metodología de XRF y TXRF se encuentra gran consistencia, conmensurada con el uso que se da a los valores medidos (ver **Anexo 5**). Es importante destacar que el rango observado de valores para un mismo tipo de material (e.g., relave) se debe a su variabilidad espacial, que se da tanto en la microescala como en la macroescala. El procesamiento del mineral da lugar a una matriz que contiene una mezcla de minerales y especies químicas que varían de acuerdo al material original y los procesos físicoquímicos empleados para la obtención del concentrado. Asimismo, una vez depositados en el tranque, los relaves están expuestos a condiciones heterogéneas de humedad, temperatura y ambiente químico, que agregan otra fuente de heterogeneidad. No obstante esta heterogeneidad, las características físicoquímicas del releve son similares a las características del suelo original, teniendo la muestra del sedimento fino del suelo original mayor concentración de cobre que el mismo relave. Las muestras fueron obtenidas con protocolos normalizados y aceptados que consideran estos factores para este tipo de matrices ambientales.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Los valores reportados por el laboratorio acreditado confirman lo observado durante el proceso de screening:

- Tanto el material natural como el material del relave es rico en hierro, lo que es consistente con la geología del lugar.
- El relave muestra un enriquecimiento de Cu, pero este enriquecimiento es comparable a valores medidos en sedimentos del Estero El Sauce aguas arriba del derrame (muestra 871).
- No se observa valores por sobre el criterio de remediación para el mercurio (<1 mg/kg) y el plomo (<209 mg/kg)

Tabla 12. Resultados de análisis de sólidos seleccionados en laboratorio acreditado. Las muestras fueron seleccionadas de modo que contengan relave (877, 878, y 880), suelo ribera (870, 872), y sedimento del Estero El Sauce no impactado por el derrame (871).

Tipo	Material original			Material relave		
mg/kg	Suelo ribera	Sedimento aguas arriba El Sauce	Suelo ribera	Relave tranque superior	Relave	Relave
Muestra	870	871	872	877	878	880
						
Cu	286	6.798	906	2.284	9.552	1.424
Fe	48.934	39.318	33.377	33.837	28.725	23.061
As	7	33	8		86	1
Mn	602	2.338	1.351	1.789	1.555	1.277
Ca	6.074	46.081	10.921	22.593	45.129	45.447
S	112	3.103	264	88	6.425	1.526
Pb	1	197	11	4	209	4

Las muestras de sólidos también fueron evaluadas por la técnica de difracción de rayos X en polvo (XRD). Esta técnica permite obtener para cada muestra un patrón asociado a su composición mineralógica, denominado patrón de difracción o difractograma. Distintas mineralogías producen patrones de difracción característicos, donde la posición de los picos es indicadora de los distintos minerales.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

La Figura 14 presenta los difractogramas de las muestras de relave (873, 876, 877, 878, 879 y 880), suelo ribera (869, 870, 872), y sedimento del Estero El Sauce no impactado por el derrame (871). Todos los difractogramas presentan un patrón similar dominado por la presencia de minerales de cuarzo (SiO_2) con distintas proporciones de albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), calcita, y clinoclorita, y fracciones menores de calcopirita, hematita. Es destacable la presencia cuantitativa de calcita, que le confiere a estos materiales un potencial de neutralización de ácidos. Esto significa que si se produce drenaje ácido en una cantidad inferior a este potencial de neutralización, entonces no se producirán descensos de pH en el sistema, generándose probablemente yeso por la asociación de calcio y sulfato.

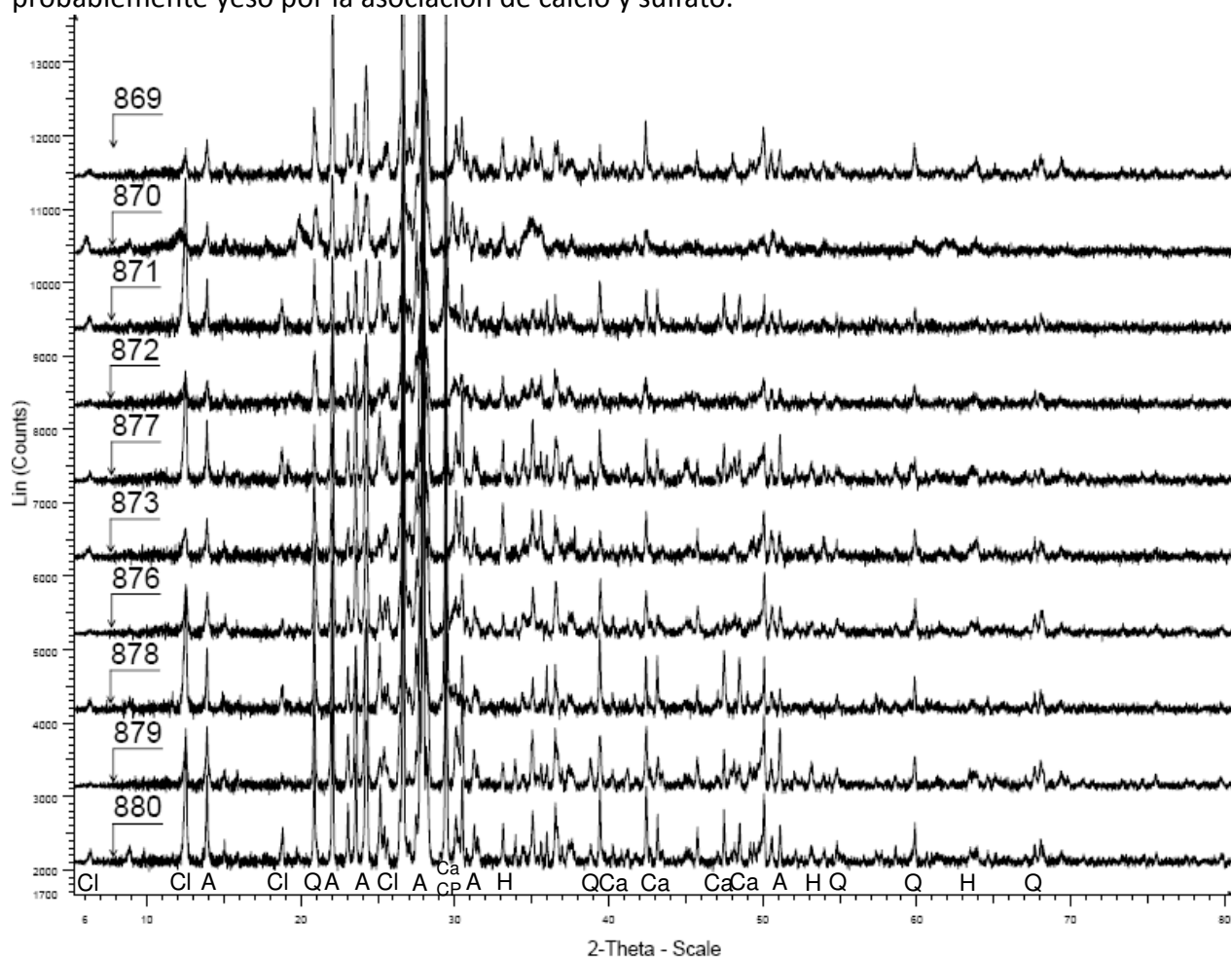


Figura 14. Patrones de difracción de rayos X de muestras pulverizadas de suelo natural (muestra 821), muestras de relave (827, 815, 830, 828, 814, y 826), y polvo superficial de la planta (muestra 812). Los patrones fueron medidos con un equipo Bruker D2 Phaser con ánodo de cobre, 30 kV, 10 mA, step size=0,01°, y 2theta de 3 a 90°. Las variaciones en los peaks del difractograma indican diferencias mineralógicas entre las muestras. En el eje X (2 theta) se indican las posiciones de algunos peaks característicos de los minerales, tales como cuarzo (Q), albita aluminosilicato (A), calcita (Ca), clinoclorita (Cl), calcopirita (CP) y hematita (H). La identificación se realizó con el software EVA (Bruker) y la base de datos PDF2 de la ICDD (International Centre for Diffraction Data).

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Los difractogramas permiten tener una huella espectral de la mineralogía de las distintas muestras y proponer la presencia de fases minerales. Esta información complementa la información de composición química discutida anteriormente. Un análisis mineralógico cuantitativo detallado debería ser soportado con análisis cristalográficos especializados y escapa de las posibilidades, alcances y requerimientos de este trabajo.

La Tabla 13 y la Tabla 14 presentan los resultados de las mediciones de análisis de aguas medidos en laboratorio certificado. Los resultados de la Tabla 13 corresponden a muestras recolectadas por la Dirección General de Aguas el 17/03/10 (orientadas a parámetros de la NCh1333) y la Tabla 14 corresponde a muestras recolectadas y preservadas por el equipo de especialistas en la visita del 29/03/10 (orientada a los parámetros de interés de este caso). Asimismo, la Tabla 15 presenta los resultados del pH, conductividad específica y oxígeno disuelto medidos en terreno, junto con la alcalinidad total medida en el laboratorio.

Las aguas del Estero El Sauce corresponden a aguas de relativamente media a baja conductividad eléctrica y sólidos disueltos en relación a los valores que indica la NCh1333. Esta agua tiene una alcalinidad total no despreciable que le confiere una cierta capacidad de resistir disminución sustancial de pH (150 mg/L como CaCO_3). No se observan compuestos tóxicos presentes en la columna de agua, incluyendo cobre. Esto es razonable dado que a ese pH y alcalinidad se espera que el cobre no se encuentre disuelto en forma importante, sino que formando parte de carbonatos y oxihidróxidos.

Es importante notar que hacia aguas abajo se espera la influencia de los sistemas de drenaje subsuperficial asociados a varios tranques de relave abandonados y en funcionamiento. El efecto general de estos tranques es aumentar la conductividad eléctrica, asociado a un aumento en las concentraciones de sulfatos junto a cationes de calcio, sodio y potasio.

Aunque no se observan diferencias sustanciales entre los parámetros medidos aguas arriba y aguas abajo del derrame, se puede especular una incipiente oxidación de sulfuros (aumento de sulfato) aparejada de una disolución de calcita (aumento de calcio), pero sin una disminución de pH debido a un consumo de alcalinidad total (menor alcalinidad total). Se recomienda establecer puntos de control de frecuencia mensual aguas arriba y aguas abajo del derrame, como los usados en este estudio.

Tabla 13. Muestras tomadas por personal de la DGA el 17/03/2010

Identificación	El Sauce M-01	El Sauce M-02	El Sauce M-03	El Sauce M-04
	Estero El Sauce aguas arriba cruce camino	Estero El Sauce aguas arriba derrumbe relaves	Estero El Sauce inmediatamente aguas arriba derrumbe relaves	Estero El Sauce inmediatamente aguas abajo derrumbe relaves
Coordenadas UTM (WGS 84)	N: 6.381.728 E: 300.620	N: 6.381.690 E: 300.506	N: 6.381.726 E: 300.480	N: 6.381.802 E: 300.360
Aluminio (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Arsénico (mg/L)	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006
Boro (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Bario (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cadmio (mg/L)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Cinc (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Conductividad específica (uS/cm)*	394,0	455,0	453,0	782,0
Cloruro (mg/L)	6,3	10,6	11,4	10,4
Cianuro (mg/L)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cobalto (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cromo (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cobre (mg/L)	0,01	<0,01	0,02	0,02
Hierro (mg/L)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Mercurio (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Manganeso (mg/L)	<0,01	0,02	<0,01	0,61
Molibdeno (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Níquel (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Plomo (mg/L)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
pH*	7,0	6,7	7,1	7,1
Selenio (mg/L)	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Sólidos disueltos totales (mg/L)	246	240	252	518
Sulfatos (mg/L)	13,3	13,0	16,4	16,4
Vanadio (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

* Indica parámetro medido en terreno por personal de la DGA.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Tabla 14. Resultados de análisis de aguas seleccionadas en laboratorio acreditado. Muestras tomadas por el equipo consultor el 29/03/10.







Muestra	867	868	874
Foto			
Descripción	Poza aguas arriba del bloqueo por relaves derramados sobre el Estero El Sauce	Agua corriente antes que el flujo llegue al Estero El Sauce	Aguas abajo (1,9 km) del bloqueo del Estero El Sauce
Sodio (mg/L)	16,1	18,3	15,1
Cloruros (mg/L)	14,1	13,7	10,2
Sulfato (mg/L)	48,6	38,9	60,6
Bicarbonato (mg/L)	228,2	229,6	170,4
Calcio (mg/L)	84,4	73,4	105
Magnesio (mg/L)	19,3	21,7	15,9
Cobre (mg/L)	0,04	0,06	0,02
Hierro (mg/L)	0,03	<0,03	0,03
Manganeso (mg/L)	0,02	<0,01	<0,01
Arsénico (mg/L)	<0,006	<0,006	<0,006

Tabla 15. Caracterización físicoquímica de muestras de aguas (pH, CE, O₂ medidos en terreno). Alcalinidad total medida en laboratorio por titulación.

Muestra	867	868	874
Foto			
Descripción	Poza aguas arriba del bloqueo por relaves derramados sobre el Estero El Sauce	Agua corriente antes que el flujo llegue al Estero El Sauce	Aguas abajo (1,9 km) del bloqueo del Estero El Sauce
pH	6,81	6,98	6,87
CE (µS/cm)	451	445	416
Alcalinidad total (mg/L CaCO ₃)	176,4	171,5	134,75
O ₂ (mg/L)	4,05	5,04	4,15

3.5 Evaluación preliminar de erosión del relave y transporte del contaminante a la red de drenaje

Se realizó una evaluación preliminar de las tasas de erosión en la condición actual del relave y posterior transporte del material erodado a la red de drenaje. Con este fin se realizó un muestreo en terreno tendiente a caracterizar las propiedades físicas y químicas del relave y su relación con el proceso de erosión. De las muestras identificadas en el inciso 3.2.3 (Tabla 7), se utilizaron 4 muestras provenientes del relave mismo, dos de suelo nativo y una de suelo de la ribera del estero. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Servicios de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile (ver certificados en **Anexo 7**). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Análisis físico-químico del material de relave y suelo en el sector del tranque.

N° muestra	Arcilla <0,002 mm (%)	Limo 0,002-0,05 mm (%)	Arena 0,05-2,0 mm (%)	Materia orgánica (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Clase textural USDA	Descripción
Relave							
877	14,7	54,0	31,3	1,01		Franco limosa	Zona de ruptura del tranque.
878	8,7	14,0	77,3	2,07	1,10	Franco arenosa	Costado sur de la superficie del tranque. Material más grueso y más oscuro.
879	6,7	32,0	61,3	0,62		Franco arenosa	Relave en zona alta que no colapsó.
880	30,7	62,0	7,3	1,45	1,50	Franco arcillo limosa	Muestra dentro del relave, material deslizado durante el evento. Consolidado, duro a la pala, color gris/rojizo.
Suelo							
869	6,7	36	57,3	0,55		Franco arenosa	Orilla cauce río, a la altura del puente aguas arriba del desplazamiento del talud del relave.
870	16,7	36,0	47,3	2,34	1,50	Franca	Suelo orilla ribera Estero El Sauce.
872	4,7	16,0	79,3	4,28		Areno francosa	Suelo nativo. Ribera oriente del estero, 3 m sobre nivel del lecho

Las muestras de relave exhiben texturas del tipo franco, con variaciones desde franco arcillo limosa hasta franco arenosa. En las muestras de relave la cantidad de partículas con diámetro inferior a 0,002 mm (arcilla) es variable, observándose en proporciones de 9% hasta 31%, promediando un 15% en peso. En las muestras de suelo, el contenido de arcilla es del orden del 9%. Por otra parte, los contenidos de arena (0,05-2,0 mm) y limo (0,002-0,05 mm) en las muestras de relave son del orden de 44% y 41%, respectivamente. Un aspecto interesante del análisis de las muestras de relave es el contenido de materia orgánica, el cual en promedio es de 1,3%. No era esperable un nivel alto de materia orgánica en un sustrato de este tipo, pero desde el punto de vista de la erosión, es una condición deseable pues la materia orgánica contribuye a

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

la estructura del sedimento y reduce las tasas de erosión. En general, contenidos de materia orgánica superiores al 2% favorecen la estabilidad y formación de agregados. Si bien en este caso el contenido es inferior a dicho umbral, es superior a lo habitualmente encontrado en sustratos de este tipo.

En algunos puntos fue posible obtener una muestra lo suficientemente agregada como para realizar una determinación de densidad aparente. El análisis de estas muestras se realizó mediante el método del terrón en el Laboratorio de Servicios de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la PUC. Los valores obtenidos también se presentan en la Tabla 16. El valor promedio en las muestras de relave fue de $1,3 \text{ g/cm}^3$, valor muy cercano a los $1,5 \text{ g/cm}^3$ que se registró en la muestra de suelo.

Existen distintos métodos para estimar las tasas de erosión en terrenos abiertos. En base a la información disponible sobre la topografía, composición del relave y disponibilidad de registros de lluvia en el sector afectado, se seleccionó y empleo la versión Revisada de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE). El modelo RUSLE fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Renard, et al., 1997) y ha sido ampliamente utilizado en todo el mundo desde su publicación. Si bien la primera versión del modelo fue desarrollada para suelos agrícolas y forestales (USLE), la versión revisada (RUSLE) fue mejorada y modificada para estimar las tasas de erosión en sitios mineros, en construcción y en suelos degradados.

En RUSLE, la tasa de erosión de un sitio se estima como el producto de seis factores, los cuales se expresan numéricamente a través de la siguiente ecuación:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad [1]$$

donde A es la tasa de erosión promedio anual ($\text{t/ha} \cdot \text{año}$); R es el factor de erosividad de la lluvia ($\text{MJ} \cdot \text{mm/ha} \cdot \text{h}$); K es el factor de erodabilidad del suelo ($\text{t} \cdot \text{h/MJ} \cdot \text{mm}$); L es el factor de longitud de la ladera (adimensional); S es el factor de la pendiente de la ladera (adimensional); C es el factor de cubierta vegetal (adimensional) y P es el factor de prácticas de conservación (adimensional). Si bien el modelo RUSLE fue originalmente propuesto para estimar la tasa de erosión promedio anual, es posible desagregar ese total a valores mensuales en función de la distribución de precipitaciones (Figura 7). Esto se puede realizar gracias a la relación lineal que existe entre el índice de erosividad R y la tasa de erosión A.

Para el empleo de RUSLE se identificaron siete sectores en el sitio del relave (Figura 15), considerando los primeros seis en el cálculo de la erosión. Los primeros cuatro sectores corresponden al área cubierta por el colapso del tranque. Los sectores 5 y 6 corresponden a los taludes del tranque. El sector 7 corresponde al área no colapsada de la parte superior del

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

tranque, y no se consideró en la estimación de la erosión pues el material de la superficie se encuentra consolidado y la superficie presenta una pendiente promedio de 0,3%. Cada uno de los sectores modelados con RUSLE se representó mediante un rectángulo, donde las propiedades del relave y la topografía se asumieron homogéneas. La Figura 15 muestra un diagrama con la disposición espacial y características de cada uno de los sectores y rectángulos empleados.

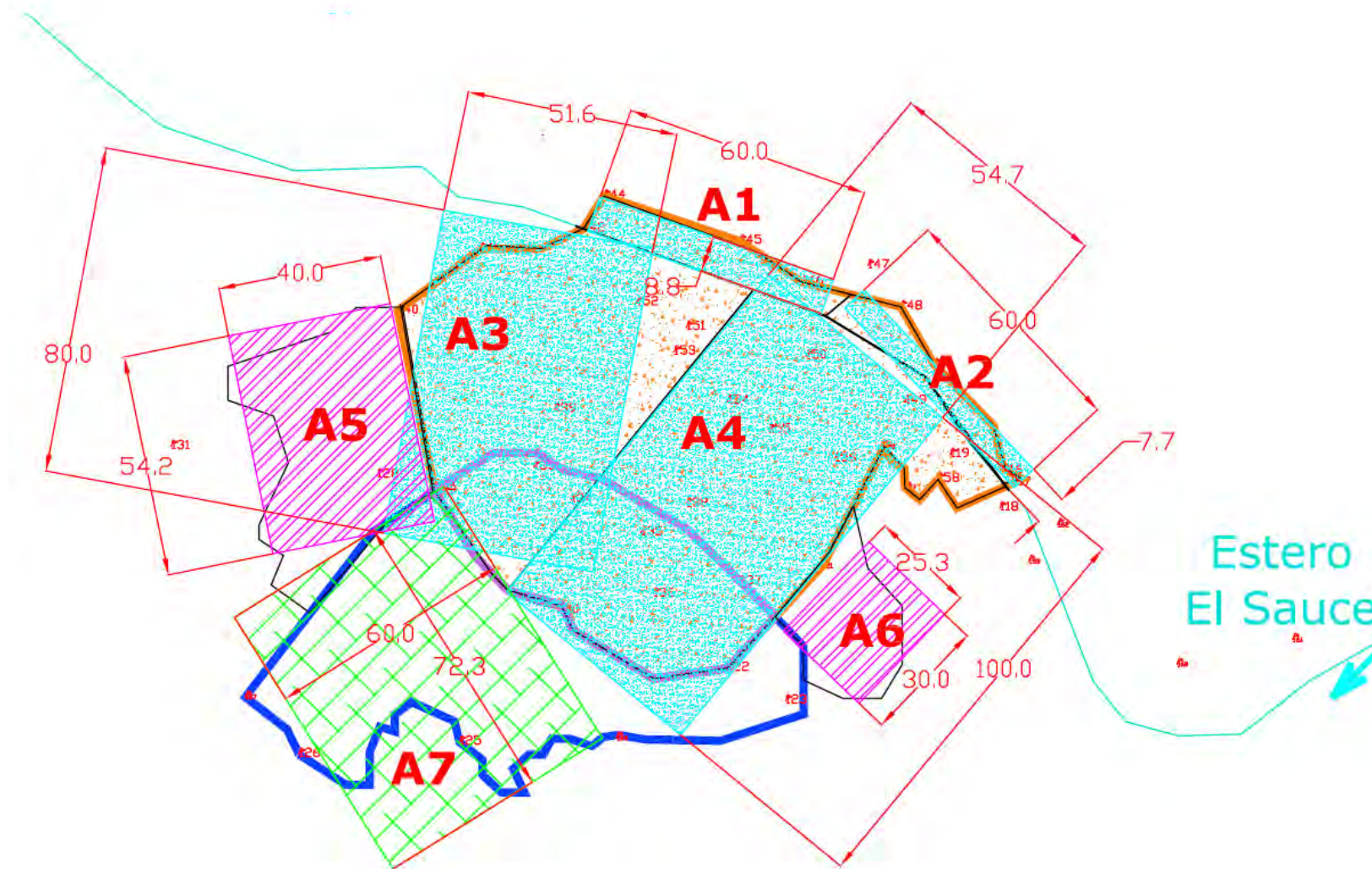


Figura 15. Disposición espacial y características de los sectores empleados en el cálculo de las tasas de erosión.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Los parámetros del modelo RUSLE se determinaron en base a información tomada en terreno y documentación previamente existente (Tabla 17). El factor de erosividad de la lluvia R se calculó a partir de la precipitación media mensual y la relación de Renard y Freimund (1994) modificada por Bonilla et al. (2009). El factor de erodabilidad del suelo K se calculó mediante la relación propuesta por Wischmeier y Smith (1978) en base a la composición promedio de las muestras de relave. El valor de K así calculado fue de 0,0275 t·h/MJ·mm. Los factores de longitud L y pendiente S de ladera se calcularon en base a la información presentada en la Figura 15 y las relaciones matemáticas propuestas por Renard et al. (1997). Los valores de los factores L y S se indican en la Tabla 17. Los dos factores restantes, el factor de cubierta vegetal C y el factor de prácticas de conservación P, se asumieron iguales a 1, lo cual corresponde a una condición de suelo desagregado y sin vegetación en el caso del factor C, y a la no implementación de prácticas de conservación de suelo en el caso del factor P. Como superficie expuesta a erosión se emplearon las dimensiones de los rectángulos indicados en la Figura 15. El área de mayor tamaño fue la del sector 4, con 0,55 ha, seguida del sector 3, con 0,41. El área más pequeña fue la del sector 2, con 0,05 ha.

Tabla 17. Parámetros empleados en el modelo de erosión RUSLE.

Sector	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
R (MJ·mm/ha·h)	0,00	0,00	0,23	0,94	8,95	18,32	21,02	7,02	2,51	0,59	0,42	0,01
K (t·h/MJ·mm)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
LS (adimensional)	1	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
	2	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
	3	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21	6,21
	4	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
	5	8,20	8,20	8,20	8,20	8,20	8,20	8,20	8,20	8,20	8,20	8,20
	6	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77	5,77

El resultado de la estimación de la erosión del relave se presenta en la Tabla 18 y en la Figura 16. Se distinguen claramente dos condiciones: la generación de relave a partir de la erosión de los taludes del tranque (sectores 5 y 6) y el relave expuesto por el colapso (sectores 1 al 4). Esta distinción es importante pues es posible que los sectores 5 y 6 ya estuviesen generando una cantidad importante de sedimento antes de ocurrido el movimiento telúrico y posterior colapso del talud del tranque. El sector 5 (talud expuesto hacia aguas abajo del tranque) tendría una tasa de erosión cercana a las 14 t/ha·año, lo que multiplicado por su superficie corresponde a

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

un aporte neto de 3 toneladas de relave por año. En lo que a material de relave expuesto por el colapso respecta, destaca el sector 3, el cual se ubica entre el sector 5 y el Estero El Sauce. El sector 3 presentaría la segunda tasa de erosión más alta por unidad de superficie (10 t/ha·año), lo que considerando el tamaño del área, corresponde a un aporte neto de 4 toneladas de relave por año. En base a las estimaciones de erosión realizadas, el sector 4 resulta ser el que contribuiría con la mayor cantidad de material anualmente (5 t/año).

En términos de la distribución de la erosión a lo largo del año, se observa en la Figura 16 que el mes más crítico resulta ser julio, con un 35% de la erosión total anual. Le siguen en magnitud los meses de junio y mayo, con un 31 y 15%, respectivamente.

Se estima que la producción anual de sedimento en el total del área afectada sería del orden de 13 t/año. A modo de comparación, un nivel aceptable de erosión en terrenos agrícolas puede ir de 2 a 12 t/ha·año. En el caso del tranque colapsado, sólo el sector 5 tendría una erosión promedio superior al umbral de 12 t/ha·año. Sin embargo, los sectores 3, 4 y 6 también presentan valores cercanos, todos superiores a las 9 t/ha·año. En términos de volumen de material removido, considerando las densidades aparentes indicadas en la Tabla 16 (1,30 g/cm³ en promedio) se estima que el volumen de material arrastrado sería en total igual a 10 m³/año.

Tabla 18. Tasas de erosión mensual estimadas para el área afectada por el tranque de relave.

Sector	Total Anual	Mes												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
A (t/ha)	1	0,71	0,00	0,00	0,00	0,01	0,11	0,22	0,25	0,08	0,03	0,01	0,00	0,00
	2	1,90	0,00	0,00	0,01	0,03	0,28	0,58	0,67	0,22	0,08	0,02	0,01	0,00
	3	10,27	0,00	0,00	0,04	0,16	1,53	3,14	3,60	1,20	0,43	0,10	0,07	0,00
	4	9,06	0,00	0,00	0,03	0,14	1,35	2,77	3,18	1,06	0,38	0,09	0,06	0,00
	5	13,53	0,00	0,00	0,05	0,21	2,02	4,14	4,74	1,58	0,57	0,13	0,09	0,00
	6	9,53	0,00	0,00	0,04	0,15	1,42	2,91	3,34	1,11	0,40	0,09	0,07	0,00
A (t/sector)	1	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,08	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	3	4,24	0,00	0,00	0,02	0,07	0,63	1,29	1,48	0,50	0,18	0,04	0,03	0,00
	4	4,97	0,00	0,00	0,02	0,08	0,74	1,52	1,74	0,58	0,21	0,05	0,03	0,00
	5	2,94	0,00	0,00	0,01	0,05	0,44	0,90	1,03	0,34	0,12	0,03	0,02	0,00
	6	0,72	0,00	0,00	0,00	0,01	0,11	0,22	0,25	0,08	0,03	0,01	0,01	0,00
total	12,99	0,00	0,00	0,05	0,20	1,94	3,97	4,55	1,52	0,54	0,13	0,09	0,00	

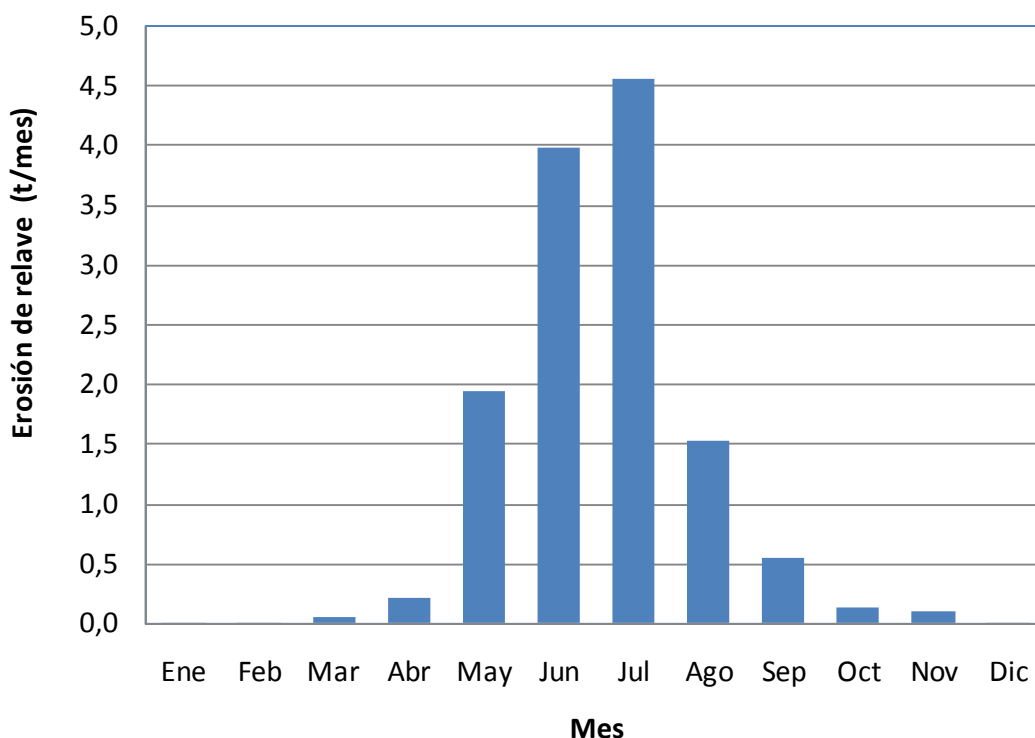


Figura 16. Estimación de la erosión en el área afectada por el colapso del tranque de relave.

En la elaboración de la Tabla 18 se emplearon los registros de lluvia media mensual, por lo cual las estimaciones realizadas corresponden a valores de erosión esperados en promedio. Con el fin de tener una aproximación sobre lo que podrían llegar a ser las tasas de erosión bajo un escenario de precipitación mayor al año normal, se realizó un análisis de probabilidad sobre los registros de lluvia. Se ajustó un modelo log-normal a los valores mensuales registrados en la estación climatológica Catemu, y se estimaron las precipitaciones mensuales con períodos de retorno de 5 a 100 años. Con estos valores se calcularon las tasas de erosión en el tranque de relave colapsado (Tabla 19). Como se puede observar en la Tabla 19, en un año normal la cantidad de material removido sería del orden de 13 t/año, cifra que se incrementa a 22 t/año para un T=5. En una situación más extrema, ya sea T=50 o T=100, la remoción de material podría llegar a las 117 t/año y 172 t/año, respectivamente. Respecto a estas últimas estimaciones, es necesario considerar que en el caso de la ocurrencia de eventos de lluvia de gran magnitud, las propiedades de rugosidad y resistencia a la erosión (erodabilidad) de la superficie del relave pueden cambiar considerablemente. En la mayoría de los casos dichos cambios reducirían las tasas de erosión a causa de un aumento en la consolidación del material de superficie. De acuerdo a esto, los valores presentados en la Tabla 19 constituirían una estimación del tipo peor escenario.

Tabla 19. Estimación de las tasas de erosión en el tranque de relave para distintos períodos de retorno.

		Erosión (t/mes)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Promedio		0	0	0	0	2	4	5	2	1	0	0	0	13
T	Prob. excedencia													
5	0,20	0	0	0	0	3	7	8	3	1	0	0	0	22
10	0,10	0	0	0	1	6	13	14	4	2	0	0	0	41
25	0,04	0	0	0	2	11	25	26	8	4	1	1	0	77
50	0,02	0	0	1	3	15	39	39	11	6	2	2	0	117
100	0,01	0	0	1	4	22	58	56	16	9	4	3	0	172

Respecto al destino final del material erodado y su distribución a través de la red de drenaje, es necesario indicar que los valores presentados en la Tabla 19 corresponden a la cantidad de material arrastrado desde el relave al curso de agua más cercano, en este caso el Estero El Sauce. No obstante lo anterior, y en forma preliminar, es posible indicar que dada la composición granulométrica del relave (41% limo y 15% arcilla), un 56% del material erodado podría ser arrastrado a distancias considerables en la red de drenaje. Una vez arrastradas por el agua, las partículas de tamaño inferior a 0,05 mm podrían permanecer en suspensión por largas distancias. El 44% restante, correspondiente partículas con el tamaño de la arena, podría ser depositadas en el fondo del cauce a corta distancia de su punto de origen. El transporte de la arena aguas abajo ocurriría sólo en el caso de eventos de crecidas y arrastre de fondo.

3.6 Potencial de liberación de contaminantes del relave en matriz acuosa

Se realizaron tres experiencias en el laboratorio para estimar el comportamiento y liberación de contaminantes del relave frente a condiciones de lluvia-escorrentía. La primera tiene que ver con un comportamiento más pasivo de liberación de contaminantes por procesos de disolución y desorción. La segunda tiene que ver con un proceso oxidativo de los sulfuros y la posible neutralización del ácido generado por parte de minerales presentes. La tercera tiene que ver con la asociación de los contaminantes a distintas fases minerales que controlan diferencialmente la liberación de contaminantes.

Experiencia 1- Elución de sólidos en columna

Elución es la extracción de una sustancia absorbida desde un lecho poroso (en este caso relave), al cual se le hace circular agua (un disolvente). Se espera que el agua que pase por el relave incorpore algún tipo de contaminante, y se analiza por TXRF.

Se dispuso 200g de relave en una columna y se eluyó con 250 mL de solución que simula el escurrimiento (0,1 M NaNO₃, CE= 7,65 mS/cm pH=7,00±0,05). Se usó esta composición para favorecer elución de especies lábiles débilmente sorbidas a las superficies minerales, al mismo tiempo que lograr una disolución de sales. La carga hidráulica de la columna fue cercana a los 10 cm, usando un volumen de eluyente de 400mL, y obteniendo volúmenes eluidos desde 280 a 320 mL, tal como se indica en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados del experimento de elución de sólidos en columna. Se observa un aumento de la conductividad (proceso disolución), hay una leve basificación (pH>7). La última columna indica los elementos eluidos por TXRF (no incluye elementos livianos como Na, Mg, etc.). Se observa que no se eluyen elementos tóxicos en concentraciones significativas. Probablemente el azufre se eluye como sulfato.




Muestra		Espesor sólido en columna (cm)	Masa sólido (g)	Volumen eluyente (mL)	Volumen eluido (mL)	pH eluido	CE eluido (mS/cm)	Elementos eluidos, medidos por TXRF (número atómico>Mg)
869	Suelo ribera Estero El Sauce	8,5	200	400	314	7,17	8,57	Ca (295-366 mg/L) K (4-16 mg/L) S (10-158 mg/L)
878	Relave	8,5	200	400	333	7,57	9,29	
880		9,0	200	400	<40	No registrado	No registrado	

*Nota: Solución elución: 0,1 M NaNO₃, CE= 7,65 mS/cm pH=7,00±0,05

Experiencia 2- Evaluación de potencial de acidificación y neutralización por pruebas estáticas

Se evaluó la *capacidad neta de generación de ácido (NAG)* por el método de Miller (Miller, S.D., A. Robertson, and T.A. Donohue. , 1997, Advances in acid drainage prediction using the Net Acid Generation (NAG) test. IN: Proceedings of the Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, Canada, May 31 - June 6) y la capacidad de neutralización por el método de Sobek (Sobek, A., Schuller, Freeman, W.J. and Smith, R. (1978), Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoil, EPA report no. EPA-600/2-78-054 p.47-50).

Tabla 21. Resultados de la evaluación de los test estáticos de producción y neutralización de ácido. El pH NAG es superior al pH de la pasta de modo que se estima que el sólido no tiene capacidad neta de producir ácido. El test de potencial de neutralización arroja valores positivos superiores a los 100 kg de CaCO₃/ton para los relaves y sedimento fino del lecho del Estero El Sauce. Estas magnitudes indican que la probabilidad de formación de drenaje ácido a partir del contacto del agua con los materiales indicados es baja.

Muestra	Foto	Tipo	pH pasta	pH NAG	Potencial de neutralización (kg CaCO ₃ /ton)
869	No disponible	Suelo ribera	7,68	Resultan valores sobre el pH de la pasta. No hay evidencia de formación neta de ácido	18
871		Sedimento Estero El Sauce aguas arriba derrame	7,52		216
878		Relave	7,77		212
880		Relave	8,00		139

La Tabla 21 presenta los resultados de estas experiencias. Dado que (a) en las pruebas estáticas de drenaje ácido ninguna de las muestras mostró un potencial generador de ácido, (b) las

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

muestras presentan un potencial positivo de neutralización de ácido, (c) los difractogramas de rayos X evidencian la presencia de calcita; y (d) el Estero El Sauce muestra valores de alcalinidad total sobre 150 mg CaCO₃/L, se esperaría que los restos de relave que puedan quedar en el cauce una vez realizada la limpieza del lecho no generen descensos de pH significativos asociados a la oxidación de sulfuros. Bajo estas condiciones, la mantención del pH en los rangos observados actualmente implicaría que no habría un aumento en la disponibilidad de metales tóxicos en la columna de agua.

Experiencia 3- Experimentos de extracción secuencial

La extracción secuencial es un método de caracterización geoquímica que permite tener una estimación indirecta de la especie química a la que se asocian los contaminantes en la fase sólida. La especiación de los contaminantes determina las condiciones que controlan la liberación de contaminantes a la fase acuosa, discriminando entre (a) los de fácil liberación (fracción intercambiable y débilmente asociada), (b) los que se liberan por desorción/disolución (e.g. asociación con óxidos de hierro y manganeso), (c) los que se liberan por procesos de óxido-reducción (e.g. asociación a minerales sulfurados), y (d) los de difícil liberación (fracciones residuales asociadas a silicatos).

El método más conocido es el de Tessier, que bajo el mismo concepto se ha modificado específicamente para evaluar la especiación de contaminantes en relaves asociados a minerales de cobre (Dold B. (2003) *Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste* Journal of Geochemical Exploration 80:55-68 y Dold B. and Fontboté L. (2001). *Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing*. Journal of Geochemical Exploration, 74:3-55).

Para evaluar indirectamente la disponibilidad del cobre, se aplicó el método del Dold hasta el paso de disolución de sulfuros secundarios a: (a) muestras de suelo natural (869, 872), (b) material fino del lecho del río aguas arriba del derrame (871) y (c) relave (878). Se encontró que sobre el 80% del cobre disuelto por el proceso de extracción se obtuvo en el paso asociado a la disolución de sulfuros secundarios (calcosita, calcopirita, covelita) con peróxido de hidrógeno al 20%. Esto sugiere que la fracción remanente de cobre en el relave estaría mayormente asociada a sulfuros y no a fases sorbidas (débilmente o a óxihidróxidos). La muestra que más cobre liberó fue la 871 que corresponde a material fino del lecho del río aguas arriba del derrame, proveniente probablemente de la erosión de las laderas que drenan hacia la cuenca del Estero El Sauce desde la faena minera El Soldado. Esto concuerda con el difractograma de rayos X, que presenta picos consistentes con la existencia de sulfuros, aunque como una fase menor.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Existiría una concentración comparativamente alta de cobre en los sedimentos del lecho del río en forma previa al derrame de relave derivado del terremoto, respecto a las concentraciones de cobre observadas en el relave. Este aspecto debe ser estudiado en más detalle en una fase posterior si se desea evaluar con mayor detalle la contribución del derrame a los niveles de cobre ya existente en sedimentos.

3.7 Riesgos potenciales de los contaminantes liberados

La evaluación preliminar presentada en este informe describe la extensión y naturaleza de los contaminantes detectados a través de muestreo guiado realizado en terreno y análisis de laboratorio. Asimismo, se identifica potenciales formas de movilización de estos contaminantes hacia medios acuáticos receptores: (i) la columna de agua y sedimentos del Estero El Sauce, desde donde se puede distribuir por la red de drenaje hacia aguas abajo, (ii) las aguas subterráneas recargadas por aguas que entran en contacto con el relave expuesto en el derrumbe y las aguas subterráneas eventualmente recargadas desde el Estero El Sauce.

Para evaluar cuantitativamente los efectos negativos de la contaminación sobre la población humana y los ecosistemas impactados sería necesario realizar un análisis de riesgo ambiental. El análisis de riesgo ambiental permite luego tomar decisiones como la tecnología de remediación y estrategia de manejo de la contaminación (Bashkin V. (2006)). Por ejemplo, el análisis de riesgo ambiental permitiría definir tecnologías que sean adecuadas para llevar el riesgo a un nivel aceptable.

Dos conceptos clave para el análisis de riesgo ambiental son las rutas de exposición y la biodisponibilidad.

- a) **Las rutas de exposición:** tienen que ver con el camino que sigue el compuesto tóxico para llegar desde el lugar original de contaminación hasta el receptor ambiental (personas, ecosistemas). La Figura 17 sintetiza las rutas genéricas de exposición de las personas a contaminantes contenidos en suelos y sedimentos contaminados. Para el caso de los relaves del Tranque Veta del Agua, es necesario agregar la erosión e incorporación a las aguas corrientes y posterior ingestión como ruta de exposición. En consecuencia, es importante constatar si existen o no fuentes de agua potable que se alimenten de aguas superficiales o subterráneas aguas abajo del sitio contaminado. Por los antecedentes entregados por la Dirección General de Aguas, el abastecimiento de aguas a los poblados de la zona sería mediante pozos. El riesgo a la salud derivado del sitio contaminado dependerá de la existencia de esta ruta de exposición. Cabe hacer notar que otra ruta de exposición que eventualmente puede ser de interés es la resuspensión de material fino proveniente del relave y su transporte para inmisión a través de inhalación. Se considera que esto no será relevante durante la época más húmeda del año, pero se recomienda el uso de mascarillas al personal que trabaje en el sitio.

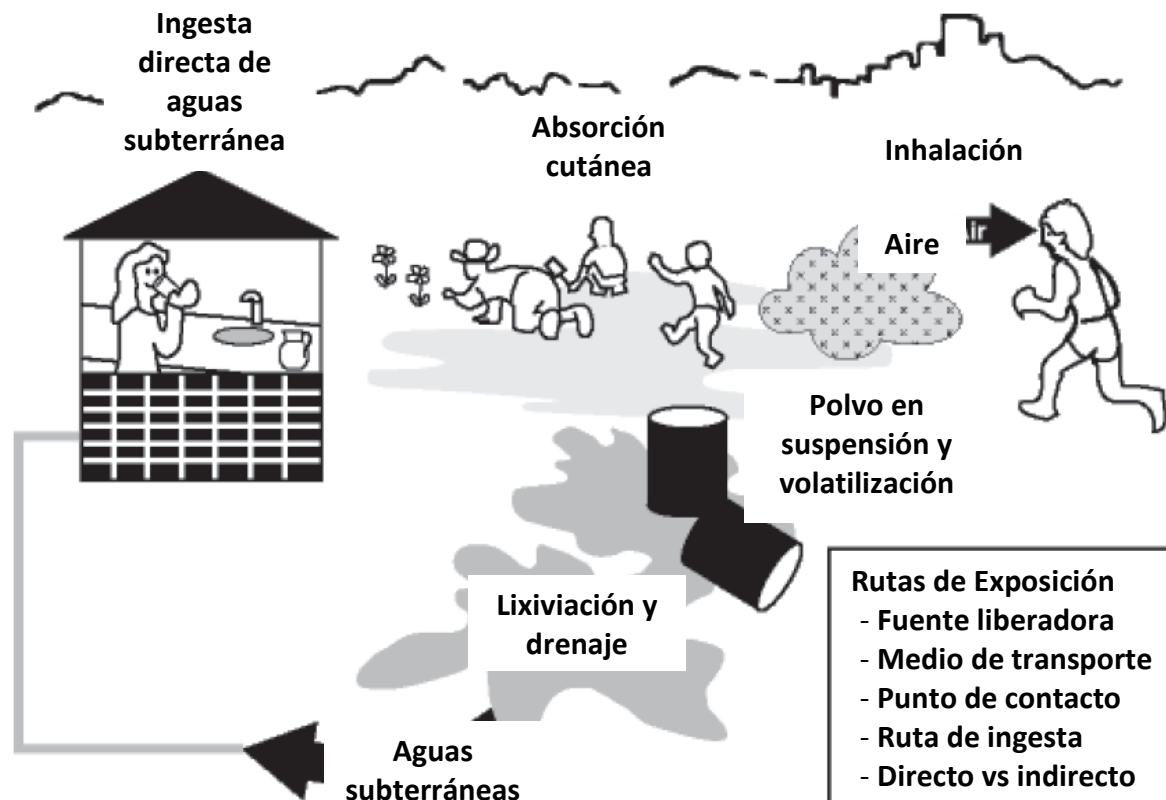


FIGURE 2-1 Major Exposure Pathways for Human Exposure to Contaminated Soils and Sediments. SOURCE: EPA Region 9 Preliminary Remediation Goals website (www.epa.gov/region09/waste/sfund/prg).

Figura 17. Formas y vías de mayor exposición de los humanos a suelos y sedimentos contaminados.

Fuente: National Research Council (2003). *Bioavailability of Contaminants in Soils and Sediments: Processes, Tools, and Applications*. The National Academies Press. EE.UU.

- b) **Bio-disponibilidad:** este término se refiere a la capacidad de un contaminante de interactuar con un organismo vivo. Esto depende de la forma química en que se encuentre el contaminante, de modo que un contaminante que está disuelto en su forma iónica está mucho más biodisponible que un contaminante que está sorbido sobre una superficie sólida. Por ejemplo, el Pb asociado a óxidos de hierro puede estar mucho menos biodisponible que el Zn disuelto desde el relave. La Figura 18 muestra que para que un contaminante tenga un efecto sobre un sitio de acción tiene que ser capaz de ingresar a través de la membrana del organismo. Así, un

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

contaminante sorbido sobre óxidos de hierro o asociado a un sulfuro sólido no pasa a través de la membrana del microorganismo. Sin embargo, para el caso de la ingesta humana de agua contaminada con partículas que contienen cobre, las condiciones imperantes en el organismo humano son capaces de cambiar la especiación química del cobre y convertirlo en la especie iónica tóxica.

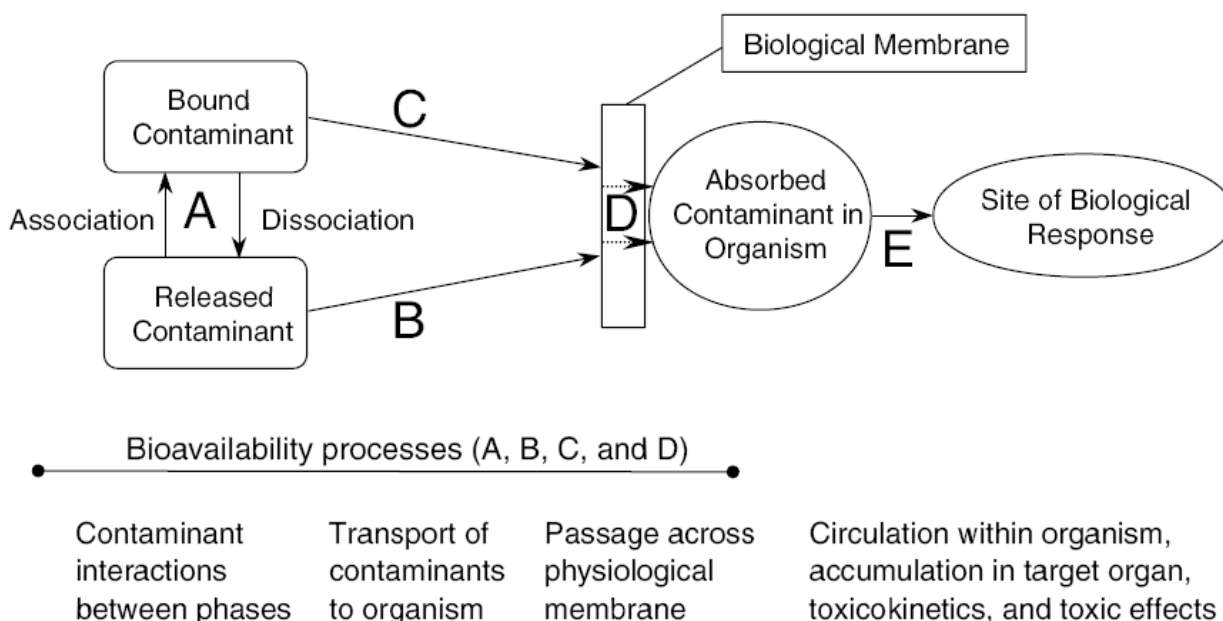


FIGURE 1-1 Bioavailability processes in soil or sediment. Note that A, B, and C can occur internal to an organism such as in the lumen of the gut.

Figura 18. Biodisponibilidad de procesos en suelo y sedimento.

Fuente: National Research Council (2003). *Bioavailability of Contaminants in Soils and Sediments: Processes, Tools, and Applications*. The National Academies Press. EE.UU.

El contaminante de mayor relevancia encontrado en el material de relave es el cobre, que está acompañado por concentraciones significativas de hierro. A continuación se presentan los límites (umbrales) recomendados por la OMS para evitar riesgos para la salud de las personas considerando el consumo de agua potable durante toda la vida (TDI: Tolerable Dayly Intake) y los valores de la norma chilena de agua potable (NCh409/2005).

**Tabla 22. Valores guía de concentración de contaminantes para consumo de agua. (WHO, 1993)-(JECFA, 1982)-
(NCh409/2005).**

Contaminante	Valor Guía (mg/L) OMS	NCh409/2005
Cobre	2	2

Cobre

El cobre es un elemento esencial y su ingesta es de 1 a 3 mg por día. Irritaciones gástricas pueden observarse con consumos de agua sobre los 3 mg/L. En adultos, una ingestión de largo plazo de cobre puede causar daños hepáticos irreparables y cirrosis. El JECFA propuso un límite máximo tolerable de 0.5 mg/kg por peso corporal basado en un estudio en perros. La OMS propone un valor guía de 2 mg/L.

Hierro

El hierro es esencial para la nutrición humana (10-50 mg/día) y es el metal más abundante en la corteza terrestre. Se puede encontrar en aguas naturales en niveles entre los 0.5 y 50 mg/L. Como medida precautoria el JECFA estableció un nivel máximo tolerable de 0.8 mg/kg por peso corporal. Se puede establecer un límite recomendado de 2 mg/L, pero no es valor que represente algún tipo de riesgo para la salud.

Considerando las características específicas del sitio en estudio, se considera que el riesgo asociado al *aumento* de la concentración de cobre en sedimentos y aguas debido a la incorporación de relave derivado del derrame (una vez que se haya despejado el lecho del Estero) es comparativamente menor a la situación base. La situación base ya tiene un nivel alto de concentraciones de cobre, algunas excediendo los criterios de remediación para suelos y sedimentos. Se recomienda hacer una caracterización más profunda de los sedimentos del El Estero El Sauce desde la cabecera de la cuenca hasta el Estero El Cobre para evaluar con mayor detalle la dispersión del material proveniente desde la ladera aportante desde la mina. Esto es relevante toda vez que actualmente está en evaluación la ampliación de la faena minera y este es un aspecto que debería ponderarse en la línea de base.

3.8 Revisión y recomendaciones Diseño del Canal de Desvío (By-pass)

El Canal de Desvío del Estero El Sauce fue trazado y diseñado por la Dirección de Obras Hidráulicas de Valparaíso. Las características principales del canal son las siguientes:

Tipo	=	No revestido
Forma	=	Trapezoidal
Ancho	=	10 metros
Talud	=	0.5
Pendiente	=	0.5%
Largo	=	250 metros aprox.
Volumen cubicado excavación	=	13.275 m ³

Se requiere verificar la capacidad de este canal en función de las distintas crecidas del Estero El Sauce, con el fin de evitar desbordes e inundaciones en zonas de acumulación de relave y camino aledaño. Además, se busca estimar las velocidades máximas de las secciones del canal no revestido con el fin de analizar la erosión del canal.

i. Verificación de Capacidad

Se utilizó el programa HEC-RAS 4.0 de la US Corp Army of Eng. para simular en régimen permanente las respuestas hidráulicas del Canal de Desvío del Estero El Sauce para 3 condiciones de caudal (T=5, 10 y 100 años). El objetivo es verificar que no existan desbordes en los sectores aledaños (camino, relave colapsado) para una tormenta y crecida hasta 100 años de período de retorno.

Los caudales del Estero El Sauce son estimados mediante el método racional y verificados en detalle en el **Anexo 3** utilizando la información de precipitaciones analizada en el **Anexo 2**. Los caudales calculados provienen de la estadística de precipitaciones máximas diarias, por lo que los caudales son considerados máximos diarios bajo distintos escenarios de probabilidad de ocurrencia (período de retorno). Las consideraciones hidráulicas y topográficas utilizadas en el cálculo del eje hidráulico con HEC-RAS se detallan en el **Anexo 8**. Como es un diseño de una obra, no existen mediciones asociadas a alturas de agua que permitan calibrar parámetros para el cálculo del eje hidráulico como la rugosidad de manning, es por esto, que se decide optar por rugosidades de literatura (**ver Anexo 8**). La Figura 19 muestra el ingreso de las secciones del Canal de Desvío a HEC-RAS y como se estructura su numeración. En general las secciones (miradas hacia aguas abajo) van a tener por el lado izquierdo el relave colapsado y por el derecho el terreno o el camino lateral de acceso a la Mina Veta del Agua.

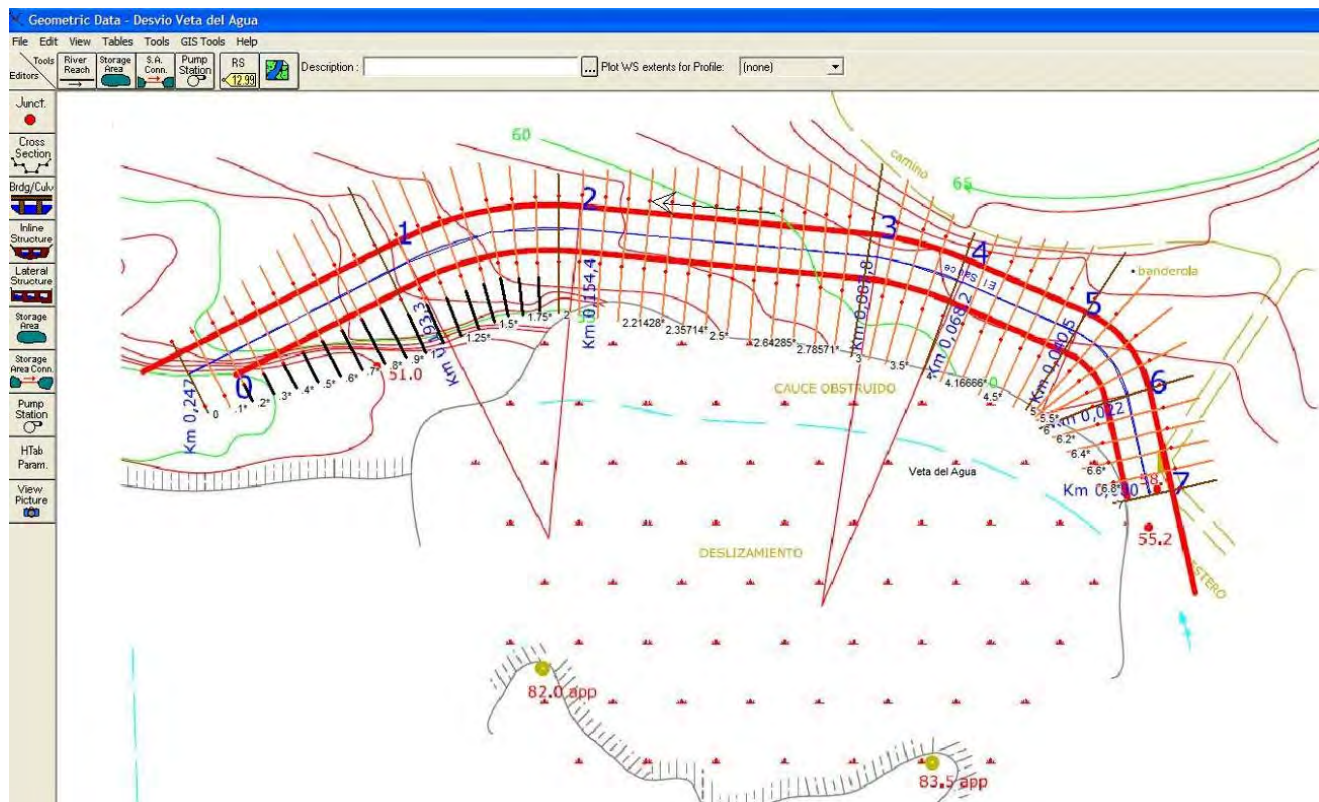


Figura 19. Ingreso de secciones del Canal de Desvío del Estero El Sauce en HEC-RAS 4.0. Se puede observar que las secciones están numeradas desde aguas abajo hacia aguas arriba de 0 a 7 y corresponden a las secciones definidas por la DOH – Valparaíso en su levantamiento. Se interpolaron las secciones para mejorar las estimaciones.

Las figuras siguientes (Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23) muestran el eje hidráulico calculado para las secciones 7, 4, 3 y 1 para los 3 períodos de retorno anteriormente mencionados. Cabe destacar que el Canal de Desvío **no presenta riesgos de desbordes ni inundaciones** considerando crecidas de Estero el Sauce hasta 100 años de período de retorno. Para tormentas más pequeñas, la altura de agua bordearía los 2 metros, mientras que para las más grandes sobrepasaría levemente los 3 metros. Las secciones del canal más cercanas a la zona del relave son la 7, 6 y 5, y dada la topografía y la profundidad que poseen, no deberían presentarse riesgos de que el agua que escurre alcance la cota del relave. Sin embargo, se recomienda revestir el relave en estas zonas específicas con una geo-membrana, para evitar que éste escurra hacia el canal.

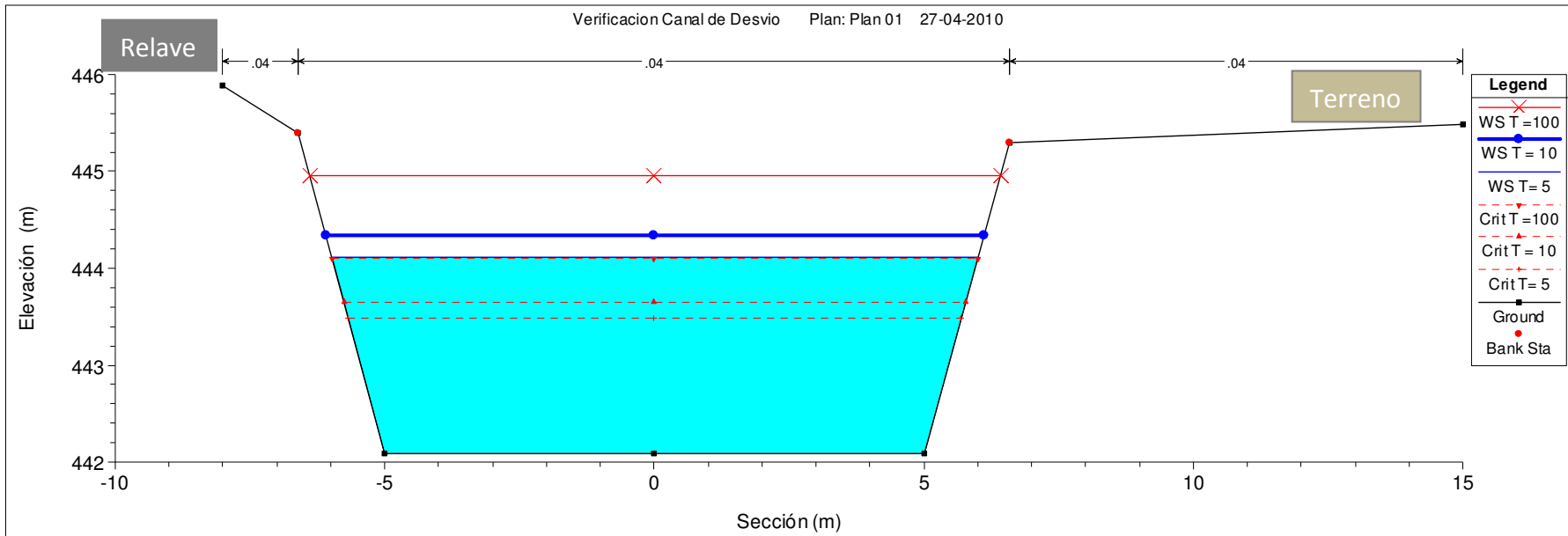


Figura 20. Sección 7 del Canal de Desvío Estero El Sauce. Las alturas de agua para T=5, 10 y 100 años de período de retorno alcanzan los 2.03, 2.25 y 2.86 metros respectivamente. No se aprecian desbordes ni inundaciones para estas condiciones de caudal.

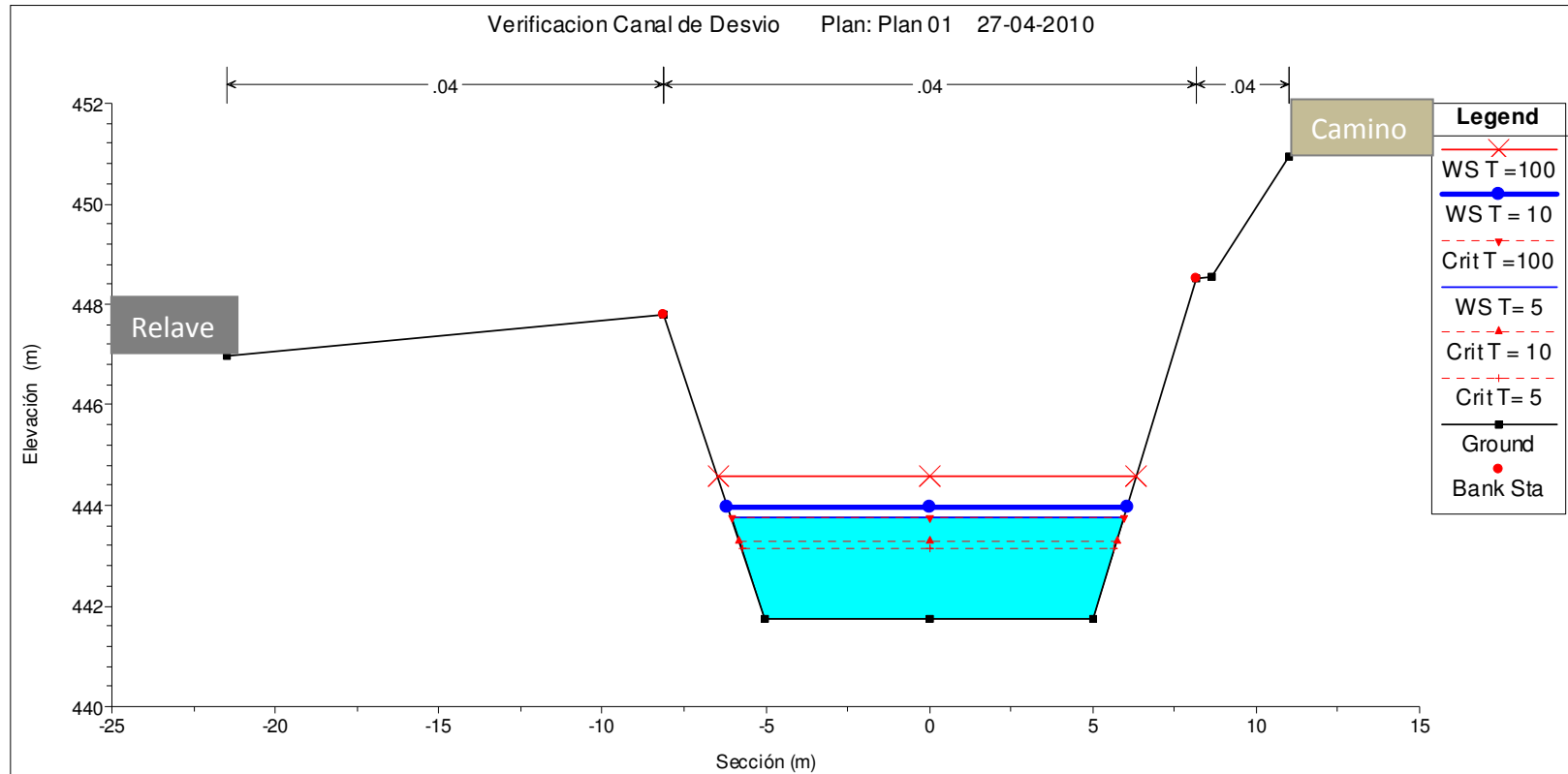


Figura 21. Sección 4 del Canal de Desvío Estero El Sauce. Las alturas de agua para T=5, 10 y 100 años de período de retorno alcanzan los 2.01, 2.23 y 2.83 metros respectivamente. No se aprecian desbordes ni inundaciones para estas condiciones de caudal.

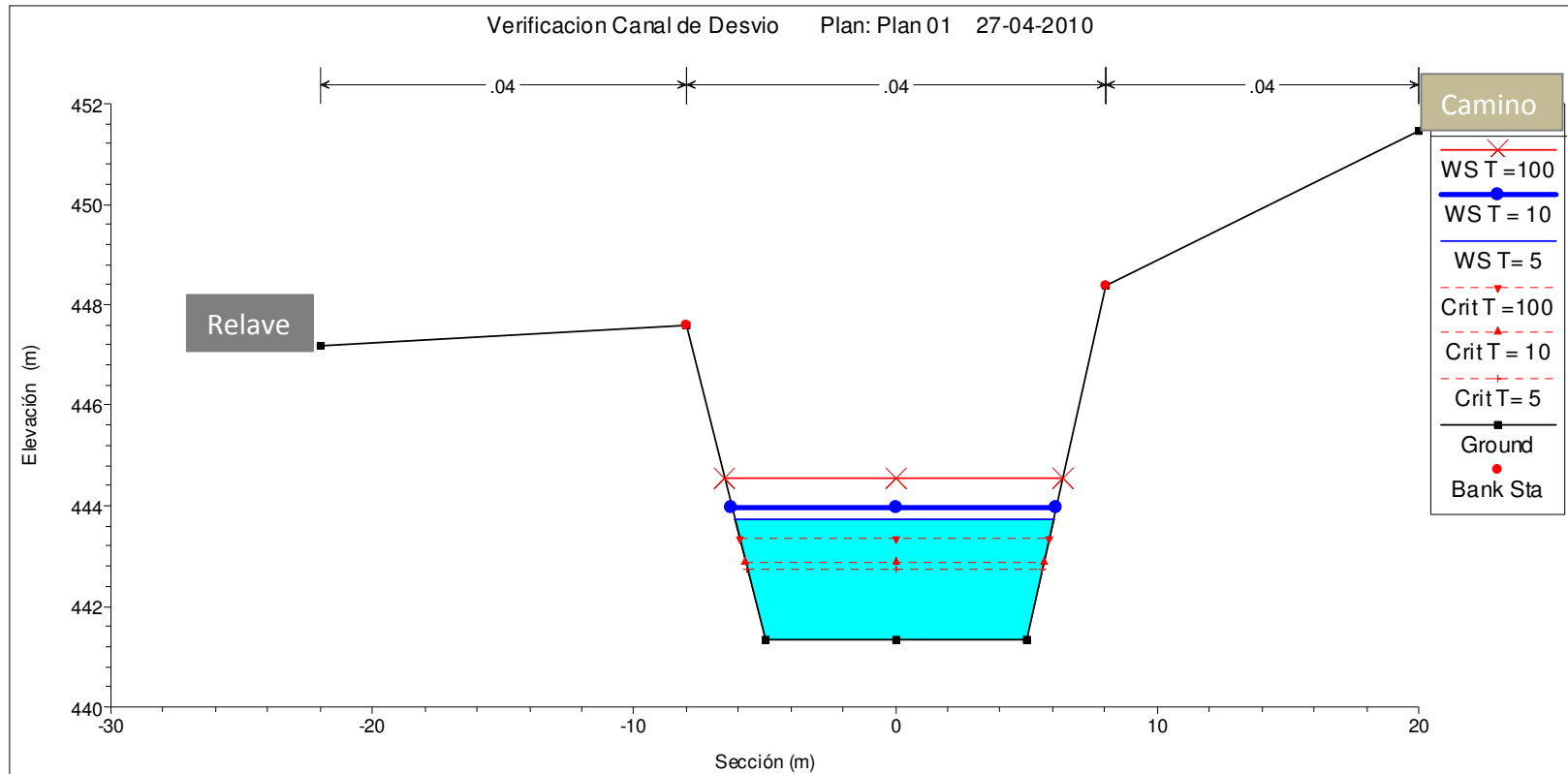


Figura 22. Sección 3 del Canal de Desvío Estero El Sauce. Las alturas de agua para T=5, 10 y 100 años de período de retorno alcanzan los 2.40, 2.62 y 3.22 metros respectivamente. No se aprecian desbordes ni inundaciones para estas condiciones de caudal.

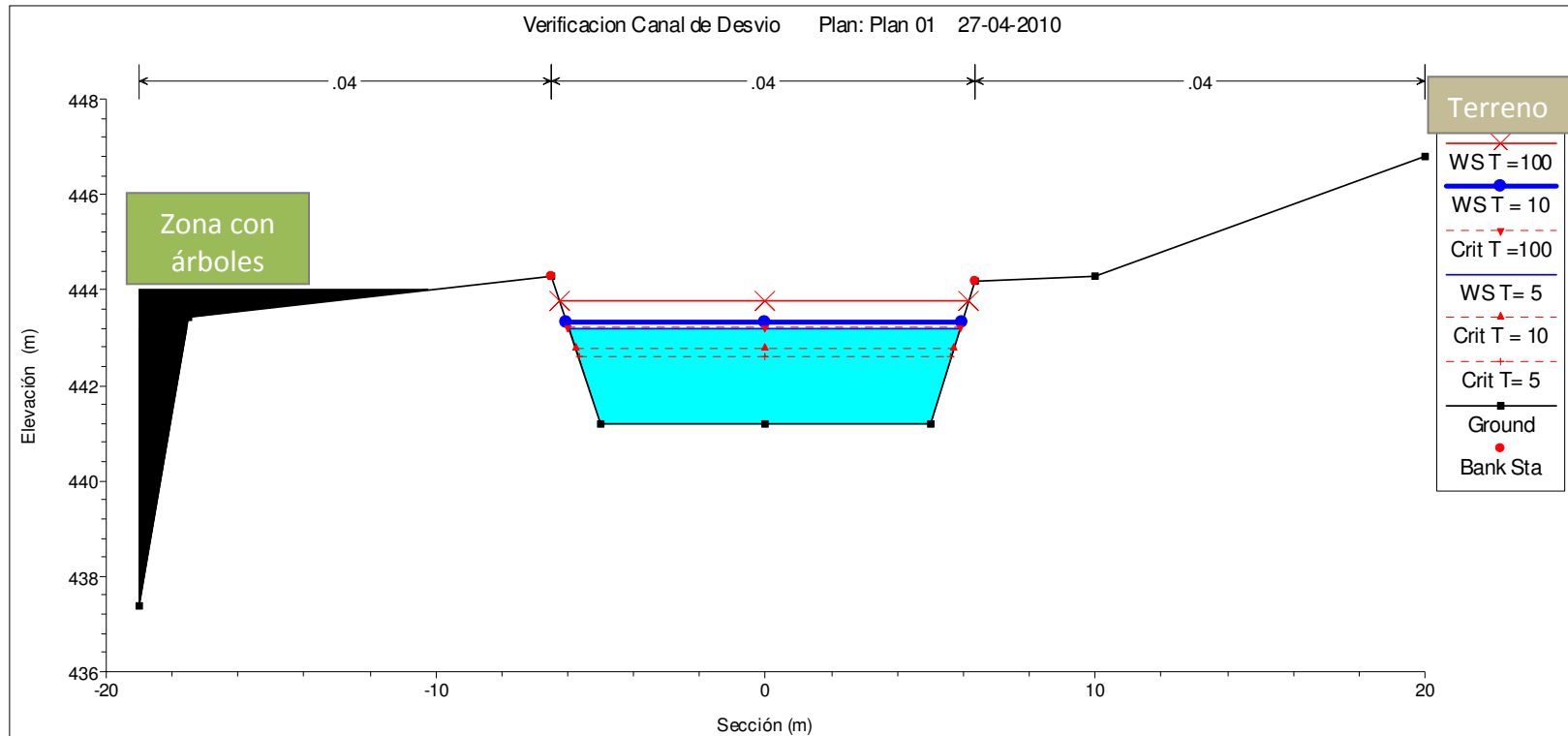


Figura 23. Sección 1 del Canal de Desvío Estero El Sauce. Las alturas de agua para T=5, 10 y 100 años de período de retorno alcanzan los 2.01, 2.23 y 2.83 metros respectivamente. No se aprecian desbordes ni inundaciones para estas condiciones de caudal.

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

La Tabla 23 muestra los caudales empleados (en función del período de retorno), las cotas de fondo y de agua, y las velocidades estimadas para cada sección y caudal (más detalles en **Anexo 8**). Se observan velocidades medias de cada sección que fluctúan **entre los 2 y 3 m/s, velocidades consideradas erosivas para suelos no cohesivos según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Chow, V. (1994))**.

Tabla 23. Resultados de la verificación hidráulica del Canal de Desvío Estero El Sauce utilizando HEC-RAS 4.0 (US Army Corp of Engineers) para 3 condiciones de caudal en régimen permanente (T=5,10 y 100 años).

Sección	Período de Retorno (años)	Q Total Máx Diario (m ³ /s)	Cota Fondo Canal (m)	Cota Altura de Agua (m)	Altura de agua (m)	Vel Agua (m/s)
7	T= 5	53.7	442.09	444.12	2.03	2.41
7	T= 10	63.5	442.09	444.34	2.25	2.54
7	T=100	94.6	442.09	444.95	2.86	2.89
6	T= 5	53.7	441.99	443.99	2.00	2.45
6	T= 10	63.5	441.99	444.21	2.22	2.59
6	T=100	94.6	441.99	444.82	2.83	2.95
5	T= 5	53.7	441.87	443.9	2.03	2.41
5	T= 10	63.5	441.87	444.12	2.25	2.54
5	T=100	94.6	441.87	444.73	2.86	2.91
4	T= 5	53.7	441.74	443.75	2.01	2.43
4	T= 10	63.5	441.74	443.97	2.23	2.57
4	T=100	94.6	441.74	444.57	2.83	2.94
3	T= 5	53.7	441.33	443.73	2.40	2.01
3	T= 10	63.5	441.33	443.95	2.62	2.16
3	T=100	94.6	441.33	444.55	3.22	2.56
2	T= 5	53.7	441.32	443.41	2.09	2.33
2	T= 10	63.5	441.32	443.6	2.28	2.5
2	T=100	94.6	441.32	444.13	2.81	2.97
1	T= 5	53.7	441.2	443.18	1.98	2.49
1	T= 10	63.5	441.2	443.34	2.14	2.7
1	T=100	94.6	441.2	443.77	2.57	3.29
0	T= 5	53.7	440.93	442.81	1.88	2.14
0	T= 10	63.5	440.93	442.98	2.05	2.29
0	T=100	94.6	440.93	443.47	2.54	2.67

ii. Verificación Velocidades Máximas no Erosionantes

La velocidad máxima permisible o velocidad no erosionante es la mayor velocidad promedio que no causará erosión en el cuerpo del canal (Chow, V, 1994). En general, los canales que han sido utilizados anteriormente permiten velocidades máximas permisibles más altas que los canales nuevos, debido a la mejor compactación y estabilización del material de lecho (sedimentación de material fino). Por otra parte, canales más profundos (> 1 m) permiten también velocidades de erosión mayores que los canales menos profundos, esto se debe a que la socavación es causada por las velocidades cerca del fondo, y para la misma velocidad media, las velocidades de fondo son mayores en canales menos profundos. En el caso del Canal de Desvío del Estero El Sauce, el canal diseñado es profundo y nuevo. Si bien las peores condiciones de erosión se contrarrestan, es necesario revisar el diseño presentado, debido a las altas velocidades encontradas en el punto anterior.

a. Método de la Máxima Velocidad Permisible

Es un método de cálculo iterativo que utiliza la fórmula de Manning, cuyos resultados de dimensionamiento hidráulico se comparan con un parámetro de velocidades máximas permisible:

$$U_{\text{máx}} = U_0 \times k_1 \times k_2 \quad [2]$$

Donde:

U₀: Se obtiene de Tabla de Velocidades permisibles del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en función de la granulometría del lecho.

k₁: factor de corrección de forma

k₂: factor de corrección de altura

Las tablas y metodologías de cálculo están descritas en Chow, V. (1994). En base a los análisis de texturas y lo inspeccionado en terreno se supuso un $d_{50} = 10$ mm. Las estimaciones y comparaciones de velocidades se realizaron en forma iterativa considerando distintas alternativas para el talud (m) y el ancho del canal (b).

La Tabla 24 muestra el cálculo realizado para condiciones de caudal de 10 años de período de retorno, manteniendo el número de manning (justificado en el **Anexo 8**) y la pendiente de diseño propuesta. Se varían tanto el ancho (b) entre 10 y 30 metros y el talud (m) entre 0.5 y 3. Como se observa en las columnas de velocidades medias (U) y velocidades máximas permisibles ($U_{\text{máx}}$), **no se logra obtener un diseño que evite la erosión del canal no revestido bajo las condiciones dadas**. Sin embargo, se advierte que se bajan las velocidades de erosión al aumentar el ancho del canal y su talud. **Es importante destacar que ensanchar más el canal no es factible debido a la presencia del relave por un lado y del camino de acceso por el otro.**

Tabla 24. Método iterativo para estimar talud y ancho que permitan bajar las velocidades erosivas. La primera fila indica las condiciones iniciales de diseño para T=10 años.

Suelo	Muestra 872	Textura Areno Francosa
k1	0.87	Medianamente sinuoso
k2	f(h)	Más de 2.2 m de altura
U0	1	m/s Función de Granulometría (d50)
Umáx	f(U0, K1, K2)	
n	0.04	Manning
i	0.005	Pendiente
Q10	63.5	m3/s - 10 años

k2	m	h (m)	b (m)	A (m2)	Pm (m)	U (m/s)	Umáx (m/s)	RH	A (m2)	Pm (m)
1.30	0.50	2.28	10.00	25.40	15.10	2.50	1.13	0.51	56.17	109.76
1.20	1.50	2.05	10.00	26.80	17.39	2.37	1.04	0.45	60.85	134.08
1.20	2.00	1.98	10.00	27.64	18.85	2.30	1.04	0.45	60.85	134.08
1.20	3.00	1.88	10.00	29.40	21.89	2.16	1.04	0.45	60.85	134.08
1.20	0.50	1.75	15.00	27.78	18.91	2.29	1.04	0.45	60.85	134.08
1.20	1.50	1.66	15.00	29.03	20.99	2.19	1.04	0.45	60.85	134.08
1.20	2.00	1.63	15.00	29.76	22.29	2.13	1.04	0.45	60.85	134.08
1.20	3.00	1.57	15.00	30.94	24.93	2.05	1.04	0.45	60.85	134.08
1.20	0.50	1.46	20.00	30.27	23.26	2.10	1.04	0.45	60.85	134.08
1.10	1.50	1.4	20.00	30.94	25.05	2.05	0.96	0.40	66.38	166.66
1.10	2.00	1.39	20.00	31.66	26.22	2.01	0.96	0.40	66.38	166.66
1.10	3.00	1.36	20.00	32.75	28.60	1.94	0.96	0.40	66.38	166.66
1.10	0.50	1.13	30.00	34.54	32.53	1.84	0.96	0.40	66.38	166.66
1.10	1.50	1.11	30.00	35.15	34.00	1.81	0.96	0.40	66.38	166.66
1.10	2.00	1.1	30.00	35.42	34.92	1.79	0.96	0.40	66.38	166.66
1.00	3.00	1.09	30.00	36.26	36.89	1.75	0.87	0.35	73.02	211.50

iii. Recomendaciones generales de Diseño

De los puntos anteriormente analizados se puede concluir:

1. El diseño del Canal de Desvío Estero El Sauce **no presenta riesgos de desbordes ni inundaciones** considerando crecidas hasta 100 años de período de retorno. Para tormentas más pequeñas, la altura de agua bordearía los 2 metros, mientras que para las más grandes sobrepasaría levemente los 3 metros.
2. Se observan velocidades medias de cada sección que fluctúan **entre los 2 y 3 m/s, velocidades consideradas erosivas** para suelos no cohesivos según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Chow, V. (1994).).
3. Mediante el método de velocidades máximas permisibles se establece que se debe modificar la geometría del canal dentro de la factibilidad que da el espacio entre el relave acumulado y el camino de acceso a la mina. **Se recomienda ensanchar el canal a lo menos a 15 metros de ancho y extender el talud (2.5-3).**
4. Una alternativa distinta para enfrentar el problema de velocidades erosivas, y evitar así el ensanchamiento del cauce y/o una canalización en hormigón armado, es la utilización de **Defensas Longitudinales de Riberas**, descritas en extenso en el Volumen 3, Sección 3.708.101 del Manual de Carreteras 2008.
5. Las defensas longitudinales de riberas son utilizadas para prevenir inundaciones en terrenos aledaños al cauce, como para evitar la erosión y dar estabilidad a las riberas sometidas a velocidades erosivas. Se diseñan de manera de no reducir el área hidráulica original (respetar los taludes originales). La Figura 24 muestra un esquema de las zonas donde debe ubicarse la defensa longitudinal, caso similar al trazado del Canal de Desvío El Sauce, el cual tiene dos zonas con curvaturas (a la entrada y a la salida). Estas zonas deberán protegerse con una mayor densidad de gaviones o enrocados ubicados en las zonas externas de las curvas. Debido a las velocidades erosivas discutidas anteriormente es recomendable la parte recta del Canal de Desvío también disponga de defensas fluviales. La Figura 25 y la Figura 26 muestran las alternativas de enrocados y gaviones, respectivamente.

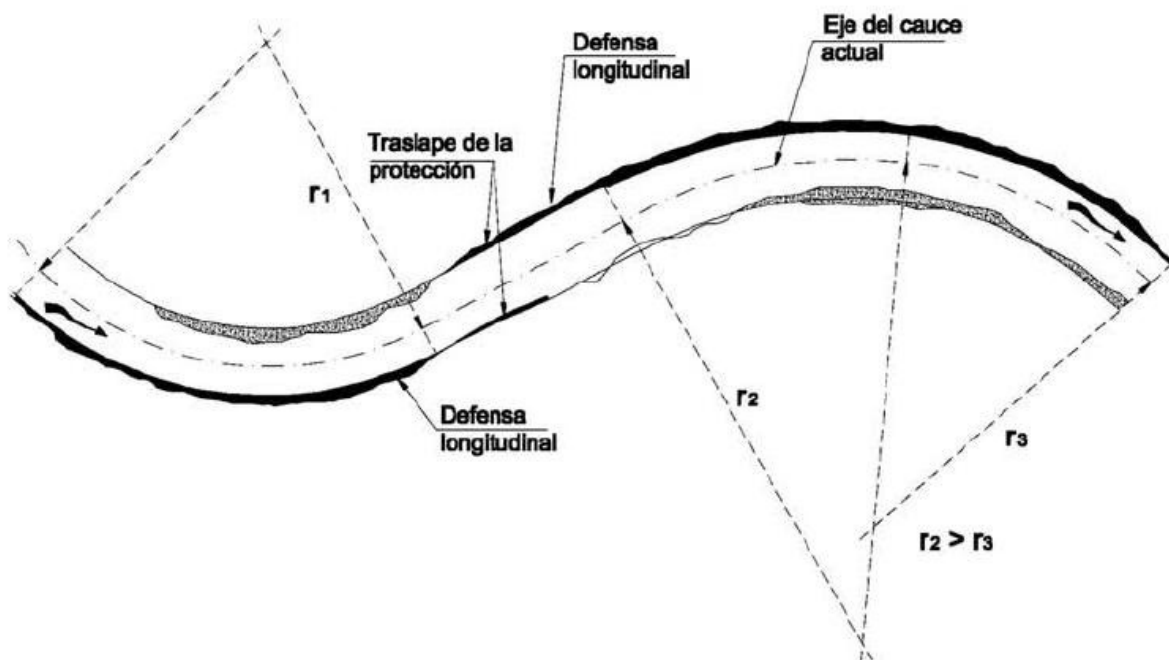


Figura 24. Esquema Defensa Longitudinal corridas en curvas y contra curvas. La defensa longitudinal debe ser paralela al eje del río. Fuente: MOP (2008). Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras Volumen N°3. Instrucciones y Criterios de Diseño. Sección 3.708 Diseño de Obras de Defensas Fluviales.

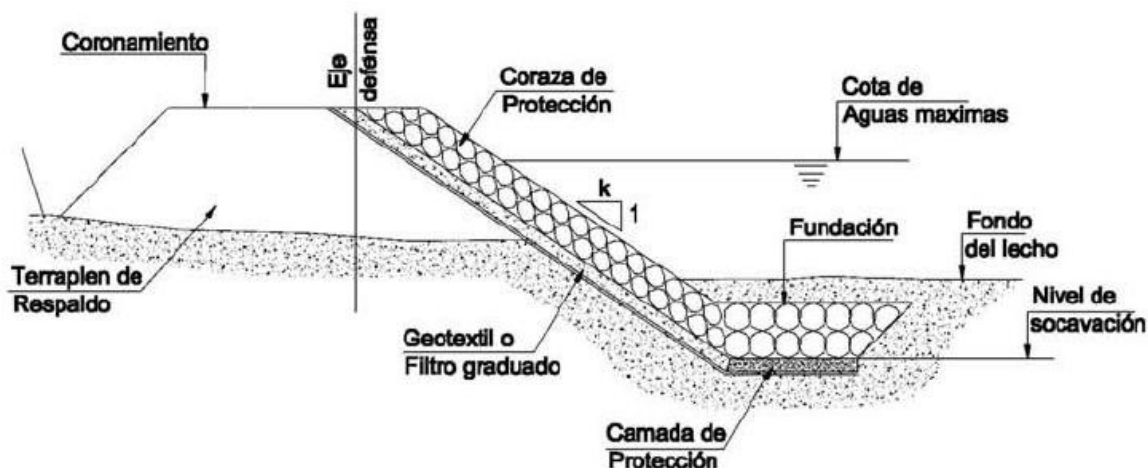


Figura 25. Esquema Defensa Longitudinal de Enrocado.
Fuente: MOP (2008). Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras Volumen N°3. Instrucciones y Criterios de Diseño. Sección 3.708 Diseño de Obras de Defensas Fluviales.

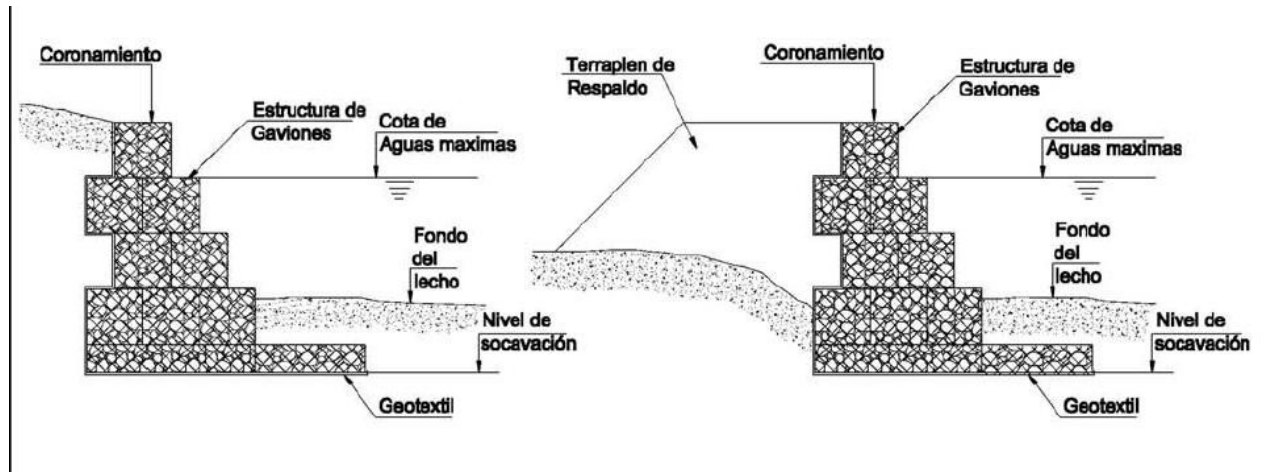


Figura 26. Esquema Defensa Longitudinal de Gaviones.

Fuente: MOP (2008). Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras Volumen N°3. Instrucciones y Criterios de Diseño. Sección 3.708 Diseño de Obras de Defensas Fluviales.

3.9 Referencias

American Public Health Association, W. E. F., American Water Works Association. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater (20 ed.)*. New York.

Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Mc Graw Hill.

Chow, V. Maidment, D. Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Mc Graw Hill.

Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Continuidad Operativa Sustentable Mina El Soldado. Anglo American Sur S.A. Diciembre, 2009.

Francisco Calabuig García, Estudio Hidrológico Anexo C. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Continuidad Operativa Sustentable Mina El Soldado. Anglo American Sur S.A. Diciembre, 2009.

MINVU (1996). *Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos: Guía de Diseño*.

MOP (2008). Dirección de Vialidad. *Manual de Carreteras Volumen N°3. Instrucciones y Criterios de Diseño. Sección 3.708 Diseño de Obras de Defensas Fluviales*.

MOP (2010). Planos DOH de Valparaíso. Proyecto Encauzamiento Estero El SAUCE. Carlos Verdugo, Julio Garrido.

Normas oficiales chilenas:

NCh409/1 Of.2005: Agua Potable – Parte 1 - Requisitos

NCh411/2 Of. 96: Calidad del agua-Muestreo-. Parte 2: Guía sobre técnicas de muestreo continentales superficiales.

NCh411/3 Of. 96: Calidad del agua -Muestreo - Parte 3: Guía sobre la preservación y manejo de las muestras.

NCh2313/10 Of. 96, DS N°879 de 1996 del MOP: Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 10: Determinación de metales pesados - Método de espectrofotometría de absorción atómica con llama

NCh2313/14 Of. 97, DS N°949 de 1997 del MOP: Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 14: Determinación de cianuro total

NCh2313/17 Of. 97, DS N°1144 de 1997 del MOP: Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 17: Determinación de sulfuro total

Provoost, J., Cornelis, C., & Swartjes, F. (2006). Comparison of soil clean-up standards for trace elements between countries: Why do they differ? *Journal of Soils and Sediments*, 6(3), 173-181.

Renard, K.G. y J.R. Freimund. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology* 157:287-306.

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, *Agricultural Handbook No. 703*.

WHO (1993). *Guidelines for Drinking-Water Quality, 2nd edition. Chemical Aspects*. ISBN 92 4 154460.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La campaña a terreno permite concluir que el colapso parcial del tranque de relaves de la mina Veta del Agua alteró la morfología local cubriendo un área de 2330 m² del cauce del Estero El Sauce. El volumen de relave sobre el cauce es de aproximadamente 24.000 m³ abarcando 127 m de longitud.

Los análisis fisicoquímicos de agua en un punto aguas arriba del colapso, un punto en agua estancada en contacto con el relave y otro aguas abajo demuestran que las concentraciones de elementos de importancia es baja y que las aguas tienen una alcalinidad alta, lo que significa que son estables frente a cambios de pH.

Los análisis de relaves y suelos muestran que el relave contiene concentraciones altas de cobre. Llama la atención que muestras de suelo de la ribera del Estero el Sauce y de sedimentos aguas arriba de la zona involucrada en el colapso tengan concentraciones altas de cobre, sugiriendo fuentes de contaminación anteriores en el Estero.

La evaluación de erosión del relave y transporte a la red de drenaje producto de las precipitaciones determinó una producción de sedimentos de 13 t/año, en los que el 81% son transportados entre los meses de mayo a julio.

Los análisis de liberación de contaminantes desde el relave a la fase acuosa se realizaron mediante tres técnicas: i) elución de sólidos en columna, ii) evaluación del potencial de acidificación y neutralización por pruebas estáticas, y iii) extracción secuencial. Los resultados de estas experiencias indicaron que el relave en contacto con agua libera potasio y calcio, elementos que no tienen implicancias ambientales de importancia. Bajo condiciones de oxidación, se determinó que todas las muestras de relave no tienen capacidad neta de formar drenaje ácido. Esto probablemente se debe a su contenido de calcita. Por último, las experiencias de extracción secuencial demostraron que la fracción remanente de cobre en el relave estaría mayormente asociada a sulfuros y no a fases sorbidas. Interesantemente, la muestra de material fino del lecho del río aguas arriba del derrame fue la que más cobre liberó. Este resultado sugiere que este material probablemente proviene de la erosión de las laderas que drenan hacia la cuenca del Estero El Sauce desde la faena minera El Soldado.

La capacidad del canal de desvío proyectado por la DOH Regional se verificó y se determinó que no presenta riesgos de desborde con crecidas de hasta 100 años de período de retorno. Sin embargo, en el análisis se comprobó que las velocidades de escurrimiento están entre los 2 y 3 m/s, velocidades consideradas erosivas para el tipo de suelo presente en la zona.

Considerando las características específicas del sitio en estudio y la calidad química del relave y suelos aledaños, se considera que existe riesgo de aumento de la concentración de cobre en sedimentos y aguas debido a la incorporación de relave derivado del derrame. A pesar de esto, este efecto es comparativamente menor a la situación base. La situación base ya tiene un nivel alto de concentraciones de cobre, algunas excediendo los criterios de remediación para suelos y sedimentos. Esto se puede observar en el plano general (**ver Anexo 9**), que muestra la gran cantidad de presiones a las que está sometida la red hidrográfica, producto de un serie de tranques de relaves de mayor escala situados a lo largo de los esteros El Sauce y el El Cobre, los cuales desembocan finalmente en el río Aconcagua.

En función de los antecedentes recolectados y análisis realizados, se hacen las siguientes recomendaciones:

- a) Evitar que el relave colapsado sea transportado por el agua del Estero El Sauce. El canal propuesto por la DOH Regional debiera mantener un control de este proceso. A pesar de esto es necesario despejar el cauce y contener el relave de manera segura. En esta contención se debiera incorporar algún mecanismo de control de la erosión.
- b) Para el canal de desvío se requiere evaluar alternativas para prevenir la erosión. Esto puede significar ensanchar el canal y extender el talud, o utilizar defensas longitudinales.
- c) Con respecto a la calidad de los suelos del Estero El Sauce, se recomienda hacer una caracterización más profunda de sus sedimentos desde la cabecera de la cuenca hasta el Estero El Cobre para evaluar con mayor detalle la dispersión del material proveniente desde la ladera aportante de la mina El Soldado.
- d) Implementar un plan de monitoreo de la zona para determinar cambios en la calidad del agua. Los parámetros recomendados a medir son: pH, SST, cobre (total y disuelto), y manganeso.

Anexos

**Anexo 1: Fotografías de Estero El Sauce obstruido y vistas generales:
Visita a terreno Mina Veta del Agua 29-03-2010**

Puntos GPS



Foto 3: **N: 6381733.17, E: 300483.15. UTM (WGS-84). GPS 116.**
Obstrucción Estero El Sauce Sector Oriente



Foto 7: **N: 6381723.60, E: 300481.84. UTM (WGS-84). GPS 118.**
Obstrucción Estero El Sauce Sector Oriente



Foto 51: **N: 6381791.79, E: 300380.65. UTM (WGS-84). GPS 142.**

Obstrucción Estero El Sauce Sector Poniente (mirando hacia aguas arriba)



Foto 50: **N: 6381791.79, E: 300380.65. UTM (WGS-84). GPS 142.**

Obstrucción Estero El Sauce Sector Poniente (mirando hacia aguas abajo)



Foto 27: **N: 6381728.08, E: 300345.44 UTM (WGS-84). GPS 129.**
Vistas Generales



Foto 14: **N: 6381684.80, E: 300416.38 UTM (WGS-84). GPS 122.**
Vistas Generales



Anexo 2: Análisis de precipitaciones máximas en Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Continuidad Operativa Sustentable Mina El Soldado. Anglo American Sur S.A. Diciembre, 2009.

En el estudio de Anglo American Sur S.A. se emplearon los registros diarios de precipitación en la estación Tranque, la cual posee registros entre 1986 y 2008 y es controlada por división El Soldado. Debido a la poca longitud del período con registros, se recolectó la estadística de la estación Tranque con cinco estaciones cercanas con registros de más de 40 años, rellendo así la estadística de la estación. Las estaciones utilizadas en el relleno fueron Catemu, Fundo El Ingenio, Catapilco, Hacienda Puchuncaví y Resguardo Los Patos. Cada una de las estadísticas rellenas fue ajustada a las distribuciones de valores extremos Gumbel I y Log Normal y de estos ajustes se obtuvieron las intensidades máximas para distintos períodos de retorno. Los resultados así presentados en el estudio de Anglo American Sur S.A. se resumen en las Tabla 25 y Tabla 26.

Tabla 25. Precipitaciones en estación Tranque ajustada a una distribución Gumbel I.

T (años)	Catemu	Fundo El Ingenio	Catapilco	Hacienda Puchuncaví	Resguardo Los Patos	Promedio
2	73	66	76	74	72	72
5	97	95	105	102	103	100
10	113	114	124	121	123	119
25	133	138	149	145	149	143
50	148	156	167	162	168	160
100	162	174	185	180	187	177
200	177	192	202	197	206	195
500	197	215	226	220	231	218

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Continuidad Operativa Sustentable Mina El Soldado. Anglo American Sur S.A. Diciembre, 2009.

Tabla 26. Precipitaciones en estación Tranque ajustada a una distribución Log normal.

T (años)	Catemu	Fundo El Ingenio	Catopilco	Hacienda Puchuncavi	Resguardo Los Patos	Promedio
2	72	65	75	73	71	71
5	95	91	104	101	99	98
10	109	109	123	119	118	116
25	127	132	147	142	143	138
50	140	149	165	159	161	155
100	153	166	184	176	180	172
200	166	184	202	194	198	189
500	183	208	227	217	224	212

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Continuidad Operativa Sustentable Mina El Soldado. Anglo American Sur S.A. Diciembre, 2009.

Dada la similitud de los resultados, para cada ajuste se adoptó el promedio de los valores obtenidos en esa distribución. De manera consecuente, y debido también a la similitud de los resultados promedio en las dos distribuciones aplicadas se obtuvo el promedio de los resultados, siendo este último valor el que se consideró representativo de las precipitaciones máximas en 24 horas para el cálculo hidrológico. Los valores así estimados en el informe de Anglo American Sur S.A. se resumen en la Tabla 27. De acuerdo a los valores presentados en la Tabla 27, la precipitación máxima registrada en 24 horas sería del orden de los 100 mm para un período de retorno de 5 años, de 140 mm para T=25, y cercana a 180 mm para T=100.

Tabla 27. Precipitaciones en estación Tranque: promedio de distribuciones Log normal y Gumbel I.

T (años)	Precipitación (mm)
2	72
5	99
10	117
25	140
50	158
100	175
200	192
500	215

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Continuidad Operativa Sustentable Mina El Soldado. Anglo American Sur S.A. Diciembre, 2009.

Anexo 3: Estimación de caudales para la cuenca del Estero el Sauce.

Características de la cuenca aportante

Antes de estimar los caudales, es necesario definir con precisión el área tributaria al cauce del Estero El Sauce. Interesa estudiar el caudal de escorrentía aguas arriba de la zona de obstrucción producto del colapso del Tranque de Relave Veta del Agua. La delimitación de la cuenca aportante es la misma utilizada por la DGA en División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas-MOP, 2010 (ver Figura 27).

Debido al origen del Estero el Sauce en zonas precordilleranas, existen pendientes fuertes, muy marcadas dependiendo la zona donde escurra el estero. Se identificaron 5 zonas, a las cuales se estimó su pendiente para posteriormente obtener la pendiente promedio ponderada por la distancia, representativa del la cuenca aguas arriba de la zona de estudio (ver Tabla 28).



Figura 27. Cuenca aportante de escorrentía al cauce del Estero El Sauce.

Tabla 28. Estimación de pendiente media ponderada.

Punto	Elevación (m)	dx (m)	Pendiente (%)
1	2061	4320	9%
2	1692	2700	9%
3	1444	2440	14%
4	1108	2110	23%
5	618	2050	8%
6	448		
Pendiente Ponderada (%)			12%
Long. Cauce (km)		13.62	

Caudales de la cuenca aportante

Para la estimación de los caudales de crecida (T=2, 5, 10, 100, 200 y 500 años) del Estero El Sauce, se utiliza el **Método Racional**, cuya formulación es la siguiente:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360} \quad (1)$$

- Q: Caudal de escurrimiento de AALL. (m³/s)
- C: coeficiente de escorrentía de la cuenca.
- A: Área de la cuenca aportante (hás).
- i: intensidad de lluvia (mm/h).

El método racional estima caudales para lluvias de períodos de retorno de diseño, incorporando la información estadística de las tormentas del lugar a través de las curvas IDF, que entregan la intensidad de lluvia requerida en función de la duración de la tormenta. Para el cálculo de caudales se tomaron en cuenta propiedades de la cuenca, la información de precipitaciones e hidrológica recabada en el Anexo anterior, y el tipo de suelo.

Validez del Método Racional

El método Racional puede ser aplicado a cuencas rurales o urbanas más bien pequeñas, sin embargo, encuentra validez hasta cuencas de 25 km² (2) o aplicaciones incluso hasta 300 km² (3).

² Dirección General de Aguas (DGA)

³ MINVU. (1996). Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos: Guía de Diseño.

Dentro de este contexto, el **método se puede aplicar**, teniendo en consideración que los caudales podrían verse sobreestimados, lo que acrecentaría el factor de seguridad.

Propiedades de la cuenca

El parámetro de relevancia a calcular es el tiempo de concentración de la cuenca, el cual consiste en el tiempo que demora la gota de agua lluvia en recorrer la distancia más lejana al punto de descarga. Se adoptaron las fórmulas de Kirpich y Giandotti para cuencas naturales.

$$T = 0.0195 \cdot \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (2)$$

Formula Tiempo de Concentración Kirpich para cuencas naturales (1940).

T: tiempo de concentración (min.)

L: longitud de escurrimiento superficial (m).

S: pendiente media de la cuenca (m/m).

$$T = 4 \frac{\sqrt{A} + 1.5 \cdot L}{0.8 \cdot \sqrt{H}} \quad (3)$$

Formula Tiempo de Concentración de Giandotti

T: tiempo de concentración (h.)

L: longitud de escurrimiento superficial (km).

H: diferencia de nivel entre la divisoria de aguas y la salida, m.

A: área aportante, km²

El tiempo de concentración de la cuenca (Tcc) se iguala a la duración de la tormenta de diseño para obtener la intensidad (i) y el caudal por el método racional.

En la Tabla 29 se muestra el resumen del cálculo de caudales para distintos períodos de retorno (T). El coeficiente de esorrentía C fue revisado en bibliografía especializada (Chow, V. Maidment, D. Mays, L. (1994)., MINVU. (1996).) y se considera apropiado dada las características del suelo (alta pendiente, textura de la Tabla 16 : Areno Francosa) que tenga un valor de 0.35. Con las propiedades de la cuenca y las formulas (2) y (3) se obtienen los tiempos de concentración necesarios, los cuales permiten calcular las intensidades horarias para distintos periodos de retorno. Luego, se aplica el método racional y se obtienen los caudales para los distintos escenarios de tormentas. Se selecciona utilizar el caudal promedio obtenido en base a las dos fórmulas de tiempo de concentración de la cuenca.

Tabla 29. Estimación de caudales para la cuenca del Estero El Sauce generados por tormentas de distintos períodos de retorno (T).

Coef. Escorrentía		0.35	CD_1 h		0.16	
Área Aportante (km ²)		32.97				
Tc Kirpich (min)		67.62				
Tc Giandotti (min)		70.32				
		Método Tc Kirpich		Método Tc Giandotti		Promedio Q (m ³ /s)
Pmax 24h (mm)	T (años)	i (mm/h)	Q (m ³ /s)	i (mm/h)	Q (m ³ /s)	
71.7	2	12.03	38.55	12.20	39.11	38.8
99.1	5	16.63	53.29	16.87	54.06	53.7
117.3	10	19.68	63.07	19.96	63.99	63.5
140.3	25	23.54	75.44	23.88	76.53	76.0
157.5	50	26.42	84.69	26.81	85.92	85.3
174.6	100	29.29	93.88	29.72	95.24	94.6
191.8	200	32.18	103.13	32.64	104.63	103.9
214.7	500	36.02	115.44	36.54	117.12	116.3

Una manera de corroborar estos órdenes de magnitud, es estimando el caudal por medio de una sección conocida (puente ubicado en punto GPS 170), cuyas alturas de agua han sido reportada por la gente que vive en los alrededores (vía fórmula de Manning). Utilizando un manning = 0.05 (Chow, V., 1994) (debido a la maleza del cauce), una pendiente del 2% calculada en inciso 3.2.1 (pág. 15), adoptando la sección del puente como rectangular de ancho 11.1 metros (ver Figura 28), se obtienen los siguientes caudales para las alturas reportadas para grandes crecidas.

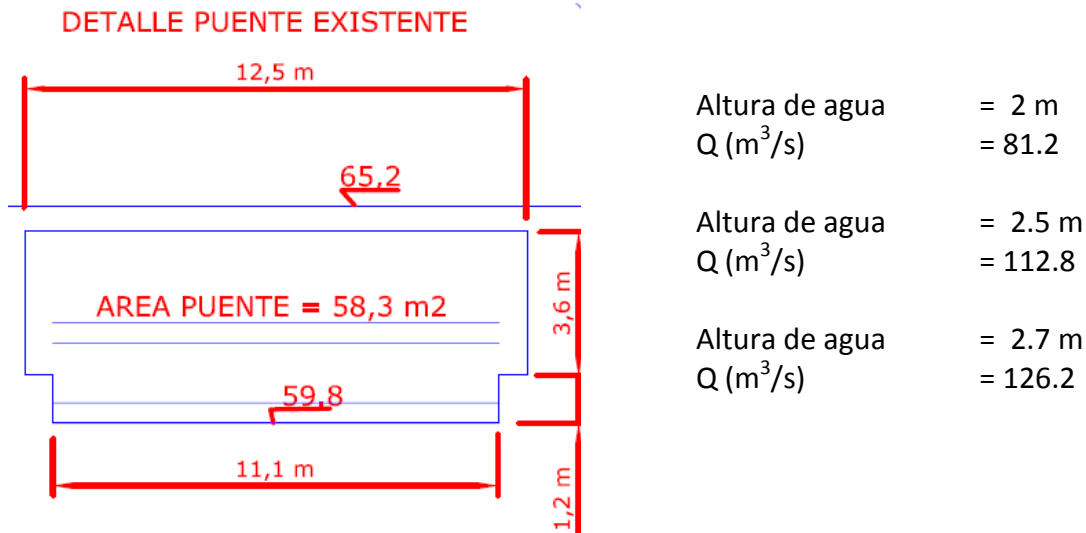


Figura 28. Detalle Puente. Fuente: DOH Valparaíso.

Los caudales estimados son del orden de magnitud de los obtenidos por el método racional para grandes crecidas.

Anexo 4: Fotografías de Muestras: Visita a terreno Mina Veta del Agua 29-03-2010

Foto 100



Foto 78



Foto 107



Foto 112



Foto 127



Foto 27



Foto 17



Foto 20



Foto 178



Foto 66



Foto 99

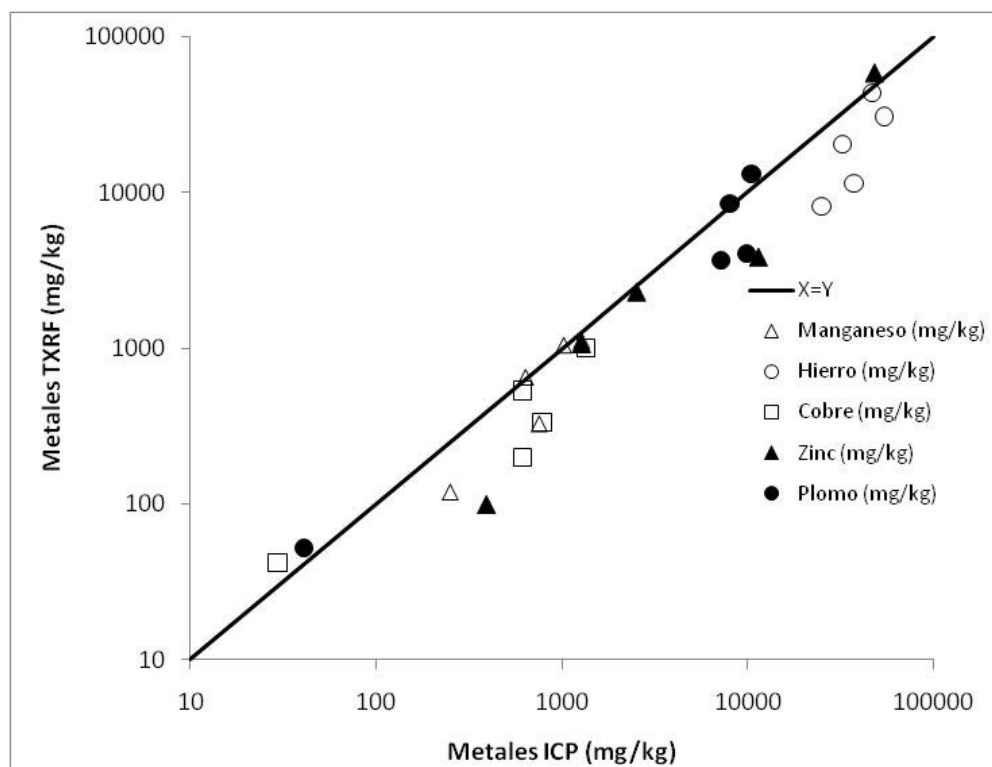


Foto 110



Anexo 5

Comparación de resultados de técnicas analíticas rápidas de screening versus análisis tradicionales de laboratorio (ICP, AA)



Anexo 6: Provoost, J., Cornelis, C., & Swartjes, F. (2006). Comparison of soil clean-up standards for trace elements between countries: Why do they differ? *Journal of Soils and Sediments*, 6(3), 173-181.

Abstract

Goal, Scope and Background. In the nineteen nineties, most European countries issued legislation on soil protection, including soil contamination. In the case of a presumed contamination, soil investigation mostly follows a stepwise approach starting with a preliminary investigation, then an in-depth investigation and, finally, remediation. Soil clean-up standards are often foreseen as trigger criteria to determine the need for an in-depth soil investigation or for remediation. There are, however, large differences in soil clean-up standards. This is partly because of the different roles of soil clean-up standards in each legislative framework and partly because of differences in the soil clean-up standard (SCS) derivation procedures. Despite these differences, there are large similarities in the concepts of the derivation procedures for clean-up standards. A better understanding of the differences in clean-up standards is needed. In order to clarify the variation, the background of the clean-up standards for a selected number of countries was investigated. The objective of this paper is to investigate the underlying reason why countrywide generic soil and groundwater clean-up standards of eight trace elements (cadmium, chromium (III), copper, mercury, lead, nickel, zinc and arsenic) differ between the selected countries. **Main Features.** To avoid misinterpretation of the differences in application of the clean-up standards, a short overview of the legislative role of clean-up standards is given first. Differences in model concepts and parameter values are discussed, followed by a comparison of the generic soil and groundwater clean-up standards for trace elements and a discussion on the sources of variation. The influence of the use of ecotoxicological criteria and data for the derivation of soil clean-up standards will be discussed in more detail. Selected countries were Canada, the Flemish Region (Belgium), France, Germany, Great Britain, the Netherlands, Norway, Sweden, Switzerland and the United States of America (USA).

Results and Discussion. When soil clean-up standards for eight trace elements (cadmium, chromium (III), copper, mercury, lead, nickel, zinc and arsenic) were compared between the selected countries, differences of more than a factor of 1000 arose. Notwithstanding the use of similar derivation procedures, differences were caused by the use of different software models with their specific input data, boundary conditions and applied protection criteria for humans and the ecology. Ecotoxicological criteria tend to lower the soil clean-up standard for the selected trace elements.

Conclusions. In the countries that are included in this study, clean-up standards are used in different ways, this is for the determination of the necessity for remediation or for the need for further soil investigation. This paper shows a wide variation in the clean-up standards, which has further implication on the decision for remediation or further investigation and, hence, the financial costs of soil management. All the clean-up standards have as a primary goal the protection of human health. A number of countries also include the protection of the ecological function of the soil. Differences in selected software model, (standard) parameter values, selected human toxicological and ecotoxicological criteria are reasons for a substantial variation in the clean-up standards for trace elements.

Recommendations and Perspectives. Is this variation justified?

The derivation of soil clean-up standards involves – besides scientific elements – political elements, like differentiation in landuse types (agricultural, residential, recreational, industrial), receptor at risk or protection level. It is obvious that harmonization of these elements will be complicated. However, a European action programme, like the thematic strategy for soil protection [33,34], could initiate this process of harmonization. Nevertheless, soil-clean-up standards could never be uniform over the whole of Europe, because they include country specific elements (geographical, ethnological) and political decisions.

Anexo 7: Certificados de Análisis



Pontificia Universidad Católica de Chile
Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal

LABORATORIO DE SERVICIOS

Avda. Vicuña Mackenna 4860
Casilla 306 código 908
Fono: 3544273 anexos 4103 - 4166
laboratorio@puc.cl

SARA ACEVEDO
PROFESOR CARLOS BONILLA
Avda. Vicuña Mackenna N° 4860 - Macul

Muestra	Suelo	Follo	10722
Fecha Recepción	31/03/2010	Fecha Entrega	08-04-2010
Predio			

Análisis	Nº Lab	99759	99760	99761	99762
	Unidad	869///	872///	877///	879///
Arcilla	%	6,7	4,7	14,7	6,7
Limo	%	36,0	16,0	54,0	32,0
Arena	%	57,3	79,3	31,3	61,3
MO %	%	0,55	4,28	1,01	0,62
Textura Clasificada U.S.D.A		FRANCO ARENOSA	ARENO FRANCA	FRANCO LIMOSA	FRANCO ARENOSA

Recomendaciones Generales

Validado por: Marlene Mejías
Técnico Encargado

Revisado por: Bernardita Salgado,
Ing. Agrónomo, M.Sc.
Jefe Laboratorio

NOTA: Metodología recomendada para los suelos chilenos, CNA.

Nota: EL valor diagnóstico de la analítica practicada está supeditada a la calidad de la muestra colectada y su manejo previo a su recepción.
Las recomendaciones solo tienen carácter de sugerencias y deberán ser evaluadas por el asesor.

Este informe no puede ser usado para trámites de tipo legal.



Pontificia Universidad Católica de Chile
Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal

LABORATORIO DE SERVICIOS

Avda. Vicuña Mackenna 4860
Casilla 306 código 908
Fono: 3544273 anexos 4103 - 4166
laboratoriosfaif@puc.cl

SARA ACEVEDO
CARLOS BONILLA
Avda. Vicuña Mackenna N° 4860 - Macul

Muestra	Suelo	Folio	10723
Fecha Recepción	31/03/2010	Fecha Entrega	09-04-2010
Predio			

Análisis	N° Lab	99763	99764	99765	99766
	Unidad	870///	873///	878///	880///
d.aparente	g/cc	1,5	n/d	1,1	1,5
Arcilla	%	16,7	6,7	8,7	30,7
Limo	%	36,0	20,0	14,0	62,0
Arena	%	47,3	73,3	77,3	7,3
MO %	%	2,34	1,08	2,07	1,45
Textura Clasificada U.S.D.A	FRANCA	FRANCO ARENOSA	FRANCO ARENOSA	FRANCO ARCILLO LIMOSO	

N/D; No detectado

Recomendaciones Generales

Validado por: Marlene Mejías
Técnico Encargado

Revisado por: Bernardita Sallato,
Ing. Agrónomo, M.Sc.
Jefe Laboratorio

NOTA: Metodología recomendada para los suelos chilenos, CNA.
Nota: EL valor diagnóstico de la analítica practicada está supeditada a la calidad de la muestra colectada y su manejo previo a su recepción.
Las recomendaciones solo tienen carácter de sugerencias y deberán ser evaluadas por el asesor
Este informe no puede ser usado para trámites de tipo legal.



INFORME N°

883040

FECHA

05 de Abril de 2010

DIVISION DE INGENIERIA HIDRAULICA Y AMBIENTAL
 Área de Análisis de Aguas y Riles

INFORME DE ENSAYO

IDENTIFICACION

Tipo de Muestra : Agua Cruda
 Fecha de Muestreo : 17-03-2010
 Fecha de Recepcion : 19-03-2010
 Tipo de Análisis : Químico según NCh 1333
 Solicitado por : Pontificia Universidad Católica
 Dirección : Vicuña Mackenna N° 4860, Macul
 Atención : Sr. Pablo Pastén

RESULTADOS

Análisis en muestra según requisitos para riego en NCh 1333

Muestra N°	2480	2481	Máximo Permitido NCh 1333	Fecha de Análisis	Método de Análisis
	El Sauce M-01	El Sauce M-02			
Aluminio (mg/L)	< 0,01	< 0,01	5,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Arsénico (mg/L)	< 0,006	< 0,006	0,10	25-03-10	*SM 31 20 B
Bario (mg/L)	< 0,01	< 0,01	4,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Boro (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,75	25-03-10	*SM 31 20 B
Cadmio (mg/L)	< 0,002	< 0,002	0,01	25-03-10	*SM 31 20 B
Cianuro (mg/L)	< 0,05	< 0,05	0,20	23-03-10	NCh 2313/14
Cloruros (mg/L)	6,3	10,6	200,00	25-03-10	ISO 10304-1
Cobalto (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,05	25-03-10	*SM 31 20 B
Cobre (mg/L)	0,01	< 0,01	0,20	25-03-10	*SM 31 20 B
Cromo (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,10	25-03-10	*SM 31 20 B
Hierro (mg/L)	< 0,03	< 0,03	5,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Manganeso (mg/L)	< 0,01	0,02	0,20	25-03-10	*SM 31 20 B
Mercurio (mg/L)	< 0,001	< 0,001	0,001	29-03-10	ME-15-2007 SISS
Molibdeno (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,010	25-03-10	*SM 31 20 B
Niquel (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,20	25-03-10	*SM 31 20 B
Plomo (mg/L)	< 0,002	< 0,002	5,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Selenio (mg/L)	< 0,004	< 0,004	0,020	25-03-10	*SM 31 20 B
Sulfatos (mg/L)	13,3	13,0	250,00	25-03-10	ISO 10304-1
Vanadio (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,10	25-03-10	*SM 31 20 B
Zinc (mg/L)	< 0,01	< 0,01	2,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	246	240	*	19-03-10	ME-31-2007 SISS

VLM/chb
 Vicuña Mackenna 4860
 Casilla 306 - Correo 22
 Fono: (56-2) 354 4171
 Fax: (56-2) 354 5806
 e-mail: labanal@dictuc.cl
 web: www.dictuc.cl

La información contenida en el presente informe o certificado constituye el resultado de un ensayo, calibración o inspección técnica específica acotado únicamente a las piezas, partes, instrumentos, patrones o productos analizados, y no en ningún caso permite al solicitante afirmar que sus productos han sido "certificados por DICTUC S.A.", ni reproducir en ninguna forma el logo, nombre o marca registrada de DICTUC S.A., salvo que exista una autorización previa y por escrito de DICTUC S.A.. La Acreditación del Área de Análisis de Aguas y Riles de DICTUC S.A. bajo ninguna circunstancia es transferible a otra institución.



INFORME N°

883040

FECHA

08 de Abril de 2010

DIVISION DE INGENIERIA HIDRAULICA Y AMBIENTAL
 Área de Análisis de Aguas y Riles

INFORME DE ENSAYO

Muestra N°	2482	2483	Máximo Permitido NCh 1333	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	El Sauce M-03	El Sauce M-04			
Aluminio (mg/L)	< 0,01	< 0,01	5,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Arsénico (mg/L)	< 0,006	< 0,006	0,10	25-03-10	*SM 31 20 B
Bario (mg/L)	< 0,01	< 0,01	4,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Boro (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,75	25-03-10	*SM 31 20 B
Cadmio (mg/L)	< 0,002	< 0,002	0,01	25-03-10	*SM 31 20 B
Cianuro (mg/L)	< 0,05	< 0,05	0,20	23-03-10	NCh 2313/14
Cloruros (mg/L)	11,4	10,4	200,00	25-03-10	ISO 10304-1
Cobalto (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,05	25-03-10	*SM 31 20 B
Cobre (mg/L)	0,02	0,02	0,20	25-03-10	*SM 31 20 B
Cromo (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,10	25-03-10	*SM 31 20 B
Hierro (mg/L)	< 0,03	< 0,03	5,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Manganeso (mg/L)	< 0,01	0,61	0,20	25-03-10	*SM 31 20 B
Mercurio (mg/L)	< 0,001	< 0,001	0,001	29-03-10	ME-15-2007 SISS
Molibdeno (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,010	25-03-10	*SM 31 20 B
Níquel (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,20	25-03-10	*SM 31 20 B
Plomo (mg/L)	< 0,002	< 0,002	5,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Selenio (mg/L)	< 0,004	< 0,004	0,020	25-03-10	*SM 31 20 B
Sulfatos (mg/L)	16,4	16,4	250,00	25-03-10	ISO 10304-1
Vanadio (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,10	25-03-10	*SM 31 20 B
Zinc (mg/L)	< 0,01	< 0,01	2,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	252	518	•	19-03-10	ME-31-2007 SISS

VL/M/chn
 Vicuña Mackenna 4860
 Casilla 306 - Correo 22
 Fono: (56-7) 354 4171
 Fax: (56-7) 354 5806
 e-mail: laboac@dictuc.cl

La información contenida en el presente informe o certificado constituye el resultado de un ensayo, calibración o inspección técnica específica acotado únicamente a las piezas, partes, instrumentos, patrones o productos que se indican. En ningún caso permite al solicitante afirmar que sus productos han sido "certificados por DICTUC S.A.", ni reproducir en ninguna forma el logo, nombre o marca registrada de DICTUC S.A., salvo que exista una autorización previa y por escrito de DICTUC S.A.". La Acreditación del Área de Análisis de Aguas y Riles de DICTUC S.A. bajo ninguna circunstancia



INFORME N°

883040

FECHA

08 de Abril de 2010

DIVISION DE INGENIERIA HIDRAULICA Y AMBIENTAL
 Área de Análisis de Aguas y Riles

INFORME DE ENSAYO

Muestra N°	2484	2485	Máximo Permitido NCh 1333	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	Estero El Cobre M-06	APR Los Caleos M-07			
Aluminio (mg/L)	< 0,01	< 0,01	5,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Arsénico (mg/L)	< 0,006	< 0,006	0,10	25-03-10	*SM 31 20 B
Bario (mg/L)	< 0,01	0,01	4,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Boro (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,75	25-03-10	*SM 31 20 B
Cadmio (mg/L)	< 0,002	< 0,002	0,01	25-03-10	*SM 31 20 B
Cianuro (mg/L)	< 0,05	< 0,05	0,20	23-03-10	NCh 2313/14
Cloruros (mg/L)	21,2	31,8	200,00	25-03-10	ISO 10304-1
Cobalto (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,05	25-03-10	*SM 31 20 B
Cobre (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,20	25-03-10	*SM 31 20 B
Cromo (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,10	25-03-10	*SM 31 20 B
Hierro (mg/L)	< 0,03	< 0,03	5,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Manganeso (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,20	25-03-10	*SM 31 20 B
Mercurio (mg/L)	< 0,001	< 0,001	0,001	29-03-10	ME-15-2007 SISS
Molibdeno (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,010	25-03-10	*SM 31 20 B
Níquel (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,20	25-03-10	*SM 31 20 B
Plomo (mg/L)	< 0,002	< 0,002	5,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Selenio (mg/L)	< 0,004	< 0,004	0,020	25-03-10	*SM 31 20 B
Sulfatos (mg/L)	17,0	29,6	250,00	25-03-10	ISO 10304-1
Vanadio (mg/L)	< 0,01	< 0,01	0,10	25-03-10	*SM 31 20 B
Zinc (mg/L)	< 0,01	0,03	2,00	25-03-10	*SM 31 20 B
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	346	624	*	19-03-10	ME-31-2007 SISS

OBSERVACIONES

1. Las muestras fueron tomada por el cliente, quien se responsabiliza por la correcta preservación e identificación de ellas.
2. * Máximo dependiente del tipo de cultivo.
3. Analisis dentro del Alcance de la Acreditación del Laboratorio. (Certificado INN LE 150)
4. Los resultados expuestos son válidos para las muestras analizadas.
5. Este informe anula y reemplaza al IN° 881903.

Victoria Leighton Méndez
 MSc. Victoria Leighton Méndez
 Sub Gerente Area de Análisis de Aguas y Riles

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

VI. M. Webb
 Casilla 306 - Correo 22
 Fono: (56-2) 354 4171
 Fax: (56-2) 354 3806

La información contenida en el presente informe o certificado constituye el resultado de un ensayo, calibración o inspección técnica específica acotado únicamente a las piezas, partes, instrumentos, patrones o procesos analizados, lo que en ningún caso permite al solicitante afirmar que sus productos han sido "certificados de conformidad con la norma NCh 2484 o 2485" reproducir en ninguna forma el logo, nombre o marca registrada de DICTUC S.A., salvo que exista una autorización previa y por escrito de DICTUC S.A., La Acreditación del Área de Análisis de Aguas y Riles de DICTUC S.A. bajo ninguna circunstancia



DIVISION DE INGENIERIA HIDRAULICA Y AMBIENTAL
Área de Análisis de Aguas y Riles

INFORME DE ENSAYO

IDENTIFICACION


Tipo de Muestra : Agua Cruda
 Fecha de Muestreo : 29-03-2010
 Fecha de Recepción : 07-04-2010
 Tipo de Análisis : Químico
 Solicitado por : Pontificia Universidad Católica
 Dirección : Vicuña Mackenna N° 4860, Macul
 Atención : Sr. Pablo Pastén

RESULTADOS

Muestra N°	Identificación	Cianuro (mg/L)
3271	867	< 0,05
Fecha de Análisis		08-04-10
Método de Análisis		NCh 2313/14

OBSERVACIONES

1. La muestra fue tomada por el cliente, quien se responsabiliza por la correcta preservación e identificación de ella.
2. Análisis dentro del Alcance de la Acreditación del Laboratorio. (Certificado INN LE 150)
3. Los resultados expuestos son válidos para la muestra analizada.


 MSc. Victoria Leighton Méndez
 Sub Gerente Área de Análisis de Aguas y Riles

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

VLM/chb

Hoja 1 de 1 M-3271

Vicuña Mackenna 4860
 Casilla 306 - Correo 22
 Fono: (56-2) 354 4171
 Fax: (56-2) 354 5806

La información contenida en el presente informe o certificado constituye el resultado de un ensayo, calibración o inspección técnica específica acotado únicamente a las piezas, partes, instrumentos, patrones o procesos analizados, lo que en ningún caso permite al solicitante afirmar que sus productos han sido "certificados por DICTUC S.A.", ni reproducir en ninguna forma el logo, nombre o marca registrada de DICTUC S.A., salvo que exista una autorización previa y por escrito de DICTUC S.A. La Acreditación del Área de Análisis de Aguas y Riles de DICTUC S.A. bajo ninguna circunstancia



DIVISION DE INGENIERIA HIDRAULICA Y AMBIENTAL
 Área de Análisis de Aguas y Riles

INFORME DE ENSAYO

IDENTIFICACION

Tipo de Muestra : Suelo
 Fecha de Recepción : 19-04-2010
 Tipo de Análisis : Químico
 Solicitado por : Pontificia Universidad Católica
 Dirección : Vicuña Mackenna N° 4860, Macul
 Atención : Sr. Pablo Pastén

RESULTADOS

Muestra N°	3714	3715	3716	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	880	871	870		
Calcio (mg/kg)	45447	46081	6074	27-04-10	TMECC04.14
Azufre (mg/kg)	1526	3103	112,4	22-04-10	TMECC04.14
Cobre (mg/kg)	1424	6798	286,4	27-04-10	TMECC04.14
Hierro (mg/kg)	23061	39318	48934	27-04-10	TMECC04.14
Manganeso (mg/kg)	1277	2338	602,1	27-04-10	TMECC04.14
Arsénico (mg/kg)	1,066	32,73	7,175	27-04-10	TMECC04.14
Plomo (mg/kg)	4,141	197,3	1,123	27-04-10	TMECC04.14

VLM/chb


Hoja 1 de 2 M-3714 a 3719

**DIVISION DE INGENIERIA HIDRAULICA Y AMBIENTAL**
Área de Análisis de Aguas y Riles**INFORME DE ENSAYO**

Muestra N°	3717	3718	3719	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	872	877	878		
Calcio (mg/kg)	10921	22593	45129	27-04-10	TMECC04.14
Azufre (mg/kg)	264,1	87,9	6425	22-04-10	TMECC04.14
Cobre (mg/kg)	906,2	2284	9552	27-04-10	TMECC04.14
Hierro (mg/kg)	33377	33837	28725	27-04-10	TMECC04.14
Manganeso (mg/kg)	1351	1789	1555	27-04-10	TMECC04.14
Arsénico (mg/kg)	8,212	< 0,006	86,29	27-04-10	TMECC04.14
Plomo (mg/kg)	10,70	4,103	208,7	27-04-10	TMECC04.14

OBSERVACIONES

1. Las muestras fueron tomadas por el cliente, quien se responsabiliza por la correcta preservación e identificación de ellas.
2. Análisis fuera del Alcance de la Acreditación del Laboratorio.
3. Los resultados expuestos son válidos para las muestras analizadas.


MSc. Victoria Leighton Méndez
Sub Gerente Área de Análisis de Aguas y Riles
División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

VLM/cbb

Hoja 2 de 2 M-3714 a 3719

Vialto Mackenna 4860
Casilla 306 - Correo 27
Fono: (56-2) 354 4171
Fax: (56-2) 354 5806
e-mail: labccol@dictuc.cl
web: www.dictuc.cl

La información contenida en el presente informe o certificado constituye el resultado de un ensayo, calibración o inspección técnica específica acotado únicamente a las piezas, partes, instrumentos, patrones o procesos analizados, lo que en ningún caso permite al solicitante afirmar que sus productos han sido "certificados por DICTUC S.A.", ni reproducir en ninguna forma el logo, nombre o marca registrada de DICTUC S.A., salvo que exista una autorización previa y por escrito de DICTUC S.A.. La Acreditación del Área de Análisis de Aguas y Riles de DICTUC S.A. bajo ninguna circunstancia es transferible a otra institución.



INFORME N°

887038

FECHA

29 de Abril de 2010

DIVISION DE INGENIERIA HIDRAULICA Y AMBIENTAL
Área de Análisis de Aguas y Riles

INFORME DE ENSAYO**IDENTIFICACION**

Tipo de Muestra : Agua Cruda
Fecha de Recepción : 19-04-2010
Tipo de Análisis : Químico
Solicitado por : Pontificia Universidad Católica
Dirección : Vicuña Mackenna N° 4860, Macul
Atención : Sr. Pablo Pastén

RESULTADOS

Muestra N°	3711	3712	3713	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	867	868	874		
Sodio (mg/L)	16,1	18,3	15,1	27-04-10	*SM 3120-B
Cloruros (mg/L)	14,1	13,7	10,2	22-04-10	ISO 10304-1
Sulfato (mg/L)	48,6	38,9	60,6	22-04-10	ISO 10304-1
Bicarbonato (mg/L)	228,2	229,6	170,4	19-04-10	*SM 2320-B
Calcio (mg/L)	84,4	73,4	105	27-04-10	*SM 3120 B
Magnesio (mg/L)	19,3	21,7	15,9	27-04-10	*SM 3120 B
Cobre (mg/L)	0,04	0,06	0,02	27-04-10	*SM 3120 B
Hierro (mg/L)	0,03	< 0,03	0,03	27-04-10	*SM 3120 B
Manganeso (mg/L)	0,02	< 0,01	< 0,01	27-04-10	*SM 3120 B
Arsénico (mg/L)	< 0,006	< 0,006	< 0,006	27-04-10	*SM 3120 B

OBSERVACIONES

- Las muestras fueron tomadas por el cliente, quien se responsabiliza por la correcta preservación e identificación de ellas.
- Análisis dentro del Alcance de la Acreditación del Laboratorio. (Certificado INN LE 150)
- Los resultados expuestos son válidos para las muestras analizadas.

MSc. Victoria Leighton Méndez
Sub Gerente Área de Análisis de Aguas y Riles

División Ingeniería Hidráulica y Ambiental

VLM/cbb

Vicuña Mackenna 4860
Casilla 306 - Correo 22
Fono: (56-2) 354 4171
Fax: (56-2) 354 5806
e-mail: labocata@dictuc.cl
web: www.dictuc.cl
Santiago - Chile

Hoja 1 de 1 M-3711 a 3713

La información contenida en el presente informe o certificado constituye el resultado de un ensayo, calibración o inspección técnica específica acotado únicamente a las piezas, partes, instrumentos, patrones o procesos analizados, lo que en ningún caso permite al solicitante afirmar que sus productos han sido "certificados por DICTUC S.A.", ni reproducir en ninguna forma el logo, nombre o marca registrada de DICTUC S.A., salvo que exista una autorización previa y por escrito de DICTUC S.A.. La Acreditación del Área de Análisis de Aguas y Riles de DICTUC S.A. bajo ninguna circunstancia es transferible a otra institución.
Una mayor especificación acerca de la metodología empleada se encuentra en el reverso de esta página.

Anexo 8: Verificación de Capacidad del Canal de Desvío utilizando HEC-RAS 4.0

Se utilizó el programa HEC-RAS 4.0 de la US Corp Army of Eng. para simular en régimen permanente las respuestas hidráulicas del Canal de Desvío Estero El Sauce para 3 condiciones de caudal (T=5, 10 y 100 años). El objetivo es verificar que no existan desbordes en los sectores aledaños (camino, relave colapsado) para una tormenta y crecida de 100 años de período de retorno. Además, se busca estimar las velocidades máximas de las secciones del canal no revestido con el fin de analizar la erosión del canal.

El Canal de Desvío Estero El Sauce fue modelado a través de 8 perfiles ubicados desde el perfil 7 (aguas arriba) hasta el perfil 0 (aguas abajo) (ver detalles Figura 19 en el cuerpo del informe).

CCBB:

Aguas arriba : altura normal con pendiente del río en tramo representativo S: 0.005

Aguas abajo : altura normal con pendiente del río en tramo representativo S: 0.005

Geometría

Coeficiente de rugosidad de manning⁴

- N de manning utilizado lecho Canal Natural: 0.04.

Perfiles y formas

Planos y topografía de: Planos DOH de Valparaíso. Proyecto Encauzamiento Estero El SAUCE. Carlos Verdugo, Julio Garrido.

A continuación se presentan los resultados en detalle de esta verificación:

⁴ Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Mc Graw Hill.

Tabla 30. Resultados de la verificación hidráulica del Canal de Desvío Estero El Sauce utilizando HEC-RAS 4.0 (US Army Corp of Engineers) para 3 condiciones de caudal en régimen permanente (T=5,10 y 100 años).

Sección	Período de Retorno	Q Total (m ³ /s)	Cota Fondo Canal (m)	Cota Altura de Agua (m)	Cota Altura Crítica (m)	Vel Agua (m/s)	Área Flujo (m ²)	Ancho Sup (m)	Froude
7	T= 5	53.7	442.09	444.12	443.48	2.41	22.32	12	0.56
7	T= 10	63.5	442.09	444.34	443.65	2.54	24.98	12.22	0.57
7	T=100	94.6	442.09	444.95	444.1	2.89	32.68	12.82	0.58
6	T= 5	53.7	441.99	443.99	443.39	2.45	21.89	11.87	0.58
6	T= 10	63.5	441.99	444.21	443.55	2.59	24.52	12.07	0.58
6	T=100	94.6	441.99	444.82	444.01	2.95	32.02	12.64	0.59
5	T= 5	53.7	441.87	443.9	443.27	2.41	22.32	11.99	0.56
5	T= 10	63.5	441.87	444.12	443.43	2.54	24.98	12.21	0.57
5	T=100	94.6	441.87	444.73	443.88	2.91	32.56	12.8	0.58
4	T= 5	53.7	441.74	443.75	443.13	2.43	22.07	11.99	0.57
4	T= 10	63.5	441.74	443.97	443.29	2.57	24.72	12.2	0.58
4	T=100	94.6	441.74	444.57	443.75	2.94	32.23	12.8	0.59
3	T= 5	53.7	441.33	443.73	442.73	2.01	26.67	12.2	0.43
3	T= 10	63.5	441.33	443.95	442.89	2.16	29.36	12.4	0.45
3	T=100	94.6	441.33	444.55	443.35	2.56	36.95	12.95	0.48
2	T= 5	53.7	441.32	443.41	442.72	2.33	23.05	12.03	0.54
2	T= 10	63.5	441.32	443.6	442.88	2.5	25.36	12.21	0.55
2	T=100	94.6	441.32	444.13	443.33	2.97	31.9	12.72	0.6
1	T= 5	53.7	441.2	443.18	442.6	2.49	21.6	11.85	0.59
1	T= 10	63.5	441.2	443.34	442.76	2.7	23.55	12	0.61
1	T=100	94.6	441.2	443.77	443.22	3.29	28.8	12.4	0.69
0	T= 5	53.7	440.93	442.81	442.15	2.14	27.91	17	0.57
0	T= 10	63.5	440.93	442.98	442.29	2.29	30.8	17	0.57
0	T=100	94.6	440.93	443.47	442.64	2.67	39.1	17	0.59

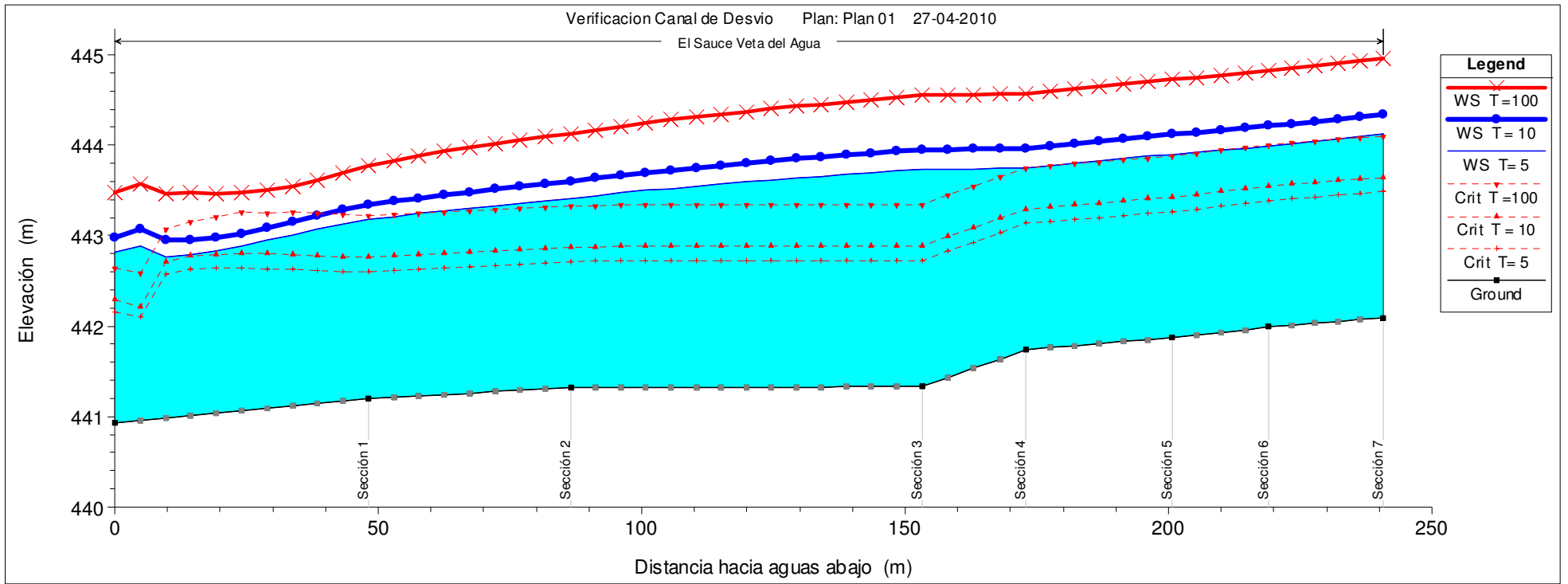


Figura 29. Eje hidráulico del Canal de Desvío Estero El Sauce. Se indican alturas de aguas para T=5, 10 y 100 años de periodo de retorno y sus respectivas alturas críticas.

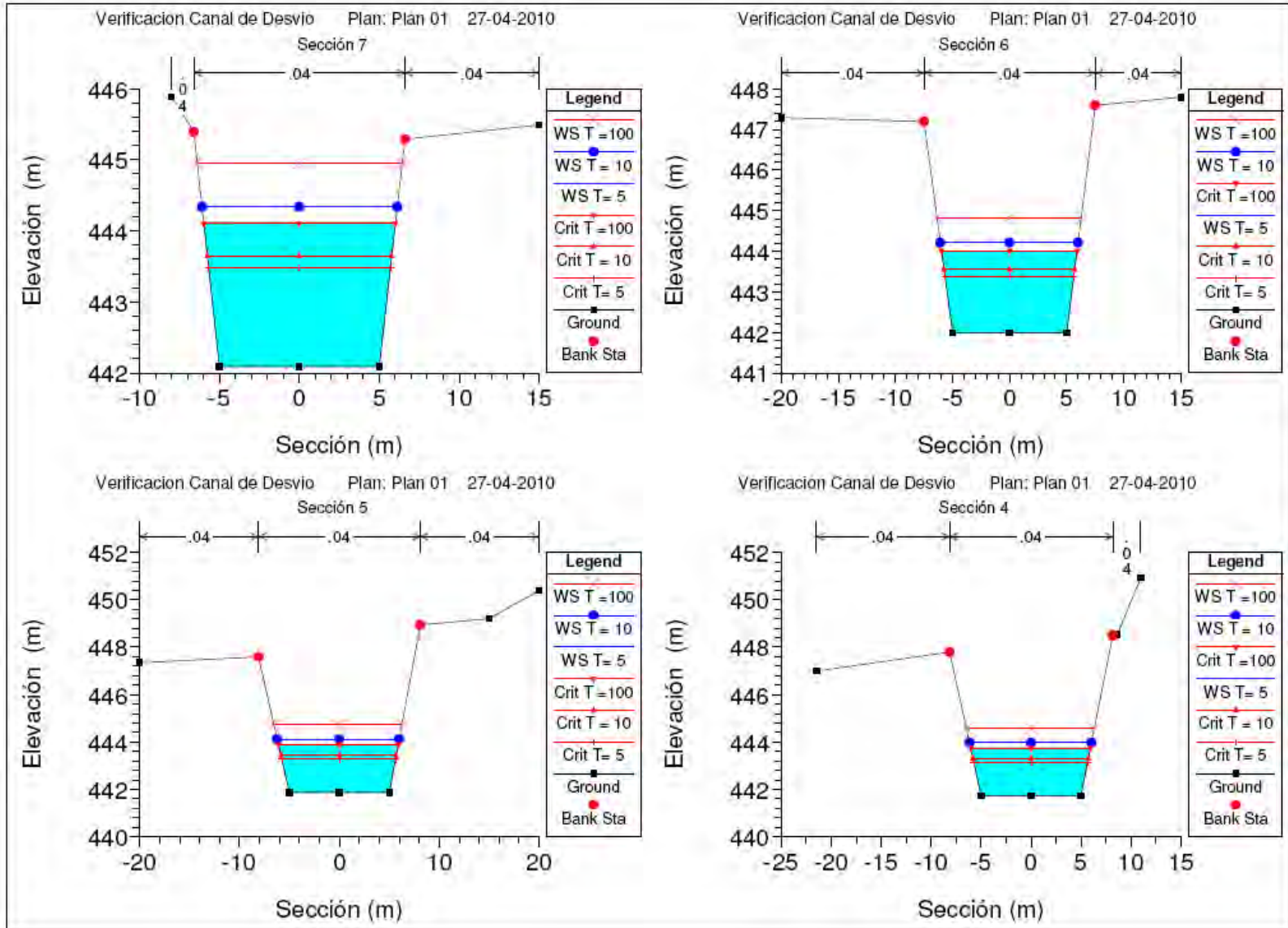


Figura 30. Secciones 7 a la 4 del Canal de Desvío Estero El Sauce. Se indican alturas de aguas para T=5, 10 y 100 años de periodo de retorno y sus respectivas alturas críticas.

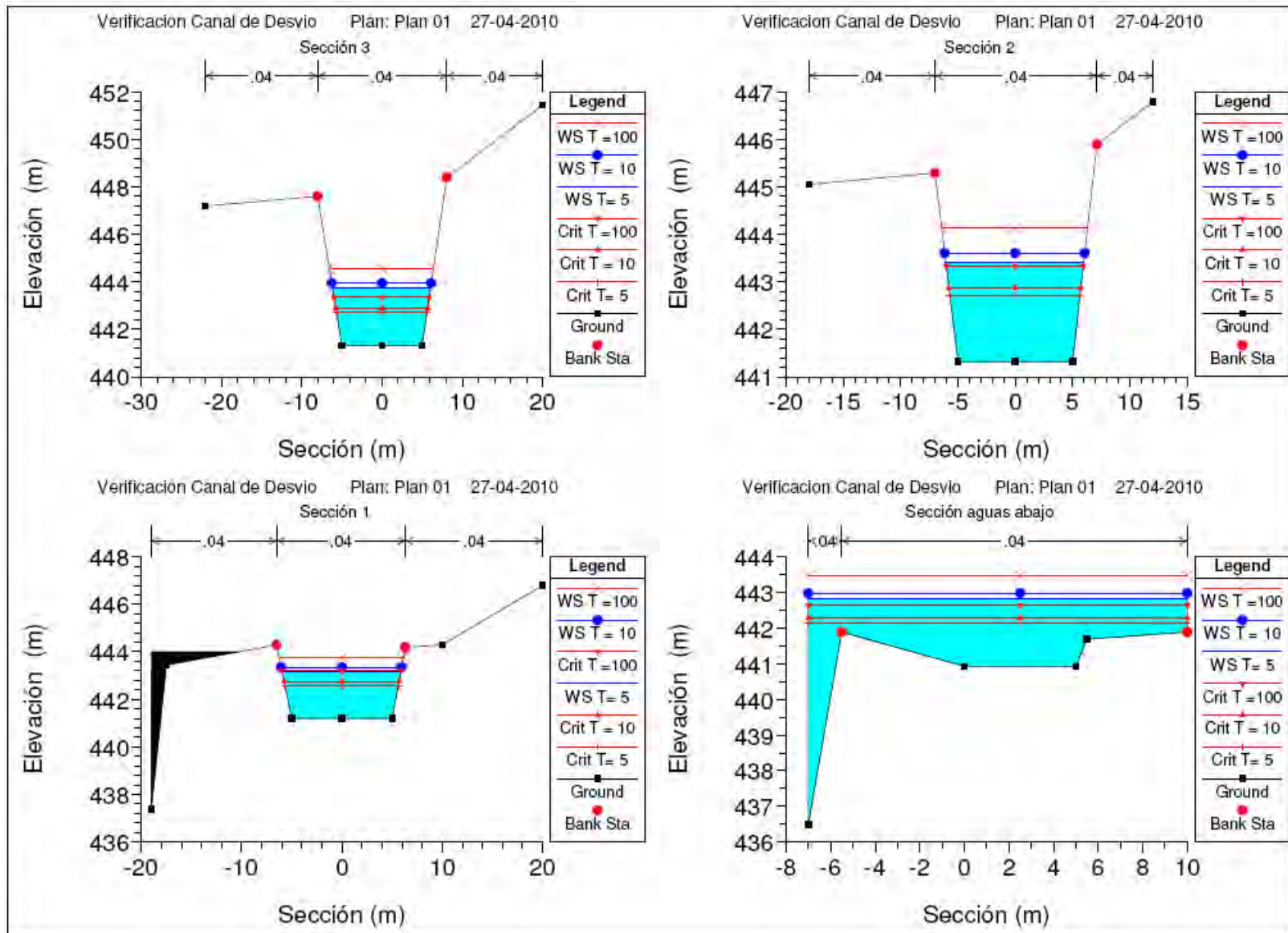
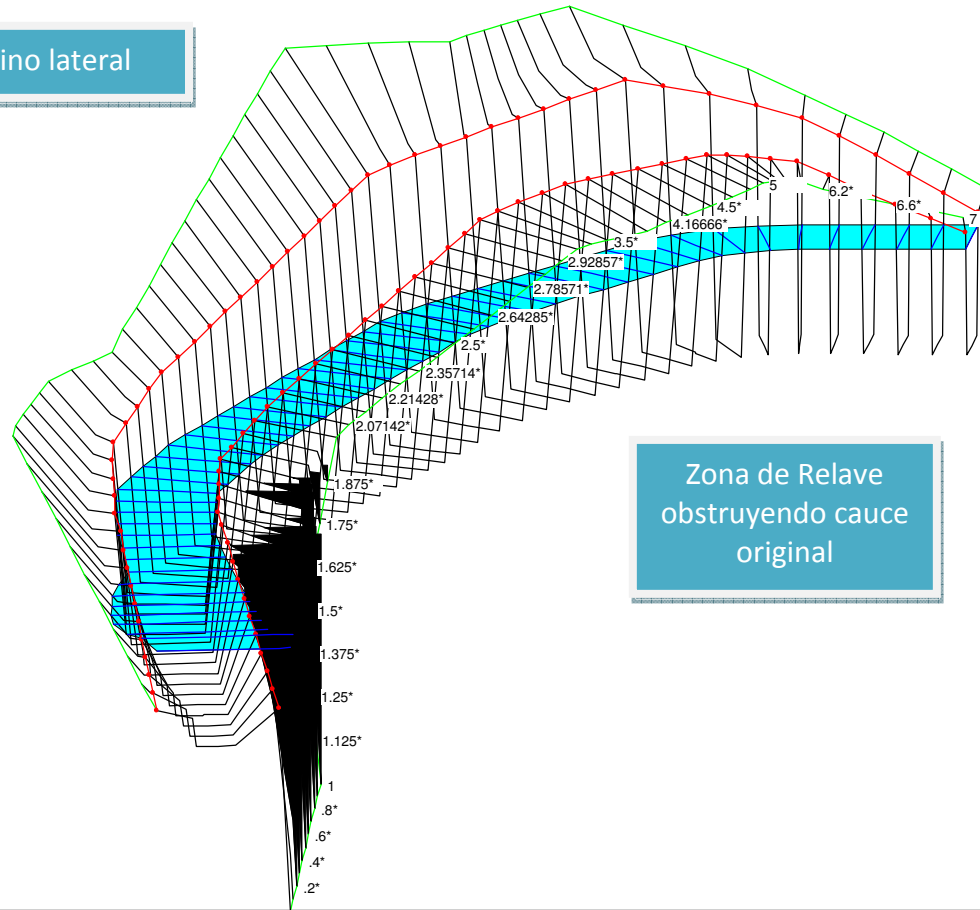


Figura 31. Secciones 3 a la 0 del Canal de Desvío Estero El Sauce. Se indican alturas de aguas para T=5, 10 y 100 años de periodo de retorno y sus respectivas alturas críticas.

Camino lateral



Zona de Relave obstruyendo cauce original

Legend	
	WS T = 100
	Ground
	Bank Sta
	Ground

Figura 32. Vista isométrica Canal de Desvío Estero El Sauce.

Anexo 9: Mapa General del Área Afectada

