

Ministerio de Desarrollo Sostenible
y Medio Ambiente

Secretaría Nacional de Minería

Proyecto Piloto Oruro



SWEDISH
GEOLOGICAL AB

ENVIROMENTAL AND MINERAL RESEARCH

DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINERALES EN EL ÁREA DEL PPO I. CARACTERIZACIÓN DE COLAS.

Proyecto Piloto Oruro

**Ministerio de Desarrollo Sostenible
y Medio Ambiente
Secretaría Nacional de Minería**

Swedish Geological AB

Fecha Mayo 20, 1996
ID: R-Bo-E-9.45-9605-PPO 9609

Contenido

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA	3
2.1 Drenaje ácido de roca (DAR).....	3
2.3 Métodos aplicados.....	5
2.3.1 Pruebas estáticas.....	5
2.3.2 Pruebas cinéticas	6
3. DEPÓSITOS DE COLAS.....	11
3.1 Tipos de depósitos y sus ubicaciones	11
3.2 Volúmenes depositados y caracterización mineralógica de las colas.....	11
3.3 Las colas de Itos e Iroco.....	15
4. PROPIEDADES DE OXIDACIÓN Y LIXIVIACIÓN	17
4.1 Pruebas estáticas.....	17
4.1.1 Información básica.....	17
4.2 Pruebas cinéticas	20
4.2.1 Información básica.....	20
4.2.2 Resultados de las pruebas cinéticas.....	24
4.2.3 Comparación de una infiltración natural con el licor de una prueba en celda húmeda.....	25
4.2.3 Variación con la profundidad.....	26
4.2.4 Discusión.....	26
5. CATEGORIZACIÓN DE DEPÓSITOS	27
5.1 Generalidades.....	27
5.2 Categorización multiparamétrica	28
5.3 Categorización según la superficie.....	29
5.4 Categorización según la masa del depósito, a corto y largo plazo	29
5.5 Pruebas estáticas versus pruebas en celdas húmedas	30
6. CONCLUSIONES.....	31

RESUMEN

Siglos de explotación actual y pasada han dejado en el área del Proyecto Piloto Oruro (PPO) grandes cantidades de residuos minerales correspondientes a diferentes períodos de la historia minera de la zona. Un tipo es el de las colas, fracción fina de los residuos resultantes de procesos de concentración aplicados a minerales sulfurosos. **El objetivo general de este estudio ha sido evaluar los depósitos de colas respecto a su potencial para producir drenaje ácido de rocas o DAR.** La descarga ácida, a su vez, es responsable por el - en comparación con la descarga natural desde el bedrock- **elevado transporte de metales tóxicos desde las colas** al sistema hidrológico local. Se utilizó la evaluación del potencial de generación DAR para determinar la potencia de cada depósito, y un cálculo adicional para clasificar los depósitos teniendo en cuenta la priorización para una posible futura mitigación. Los estudios abarcan parte del Proyecto Segmento 3c (Inventarios de las fuentes no puntuales de contaminación).

El **ritmo del transporte de metales** en el licor de un depósito de residuos individual es regido principalmente por tres factores: 1) procesos de transporte, por ejemplo, el ritmo de flujo de agua (ritmo de producción de licor), que a su vez es dependiente de los factores climáticos y la permeabilidad del material residual, 2) las propiedades de lixiviación del residuo, que determinan la concentración de metales en dicho licor 3) las propiedades de neutralización y oxidación del residuo, las cuales determinan el pH del licor, y por lo tanto, influyen en el ritmo de disolución de metales.

No es posible simular el proceso de transporte de una forma estrictamente real, en parte debido a la complejidad del sistema, y en parte debido tanto a la dependencia del transporte con respecto al tiempo como a la escala del depósito de residuos. Sin embargo, se puede hacer uso de varias pruebas para aproximar los procesos de transporte.

Se realizan **pruebas estáticas** con el fin de determinar el potencial de una unidad de residuo para producir ácido no neutralizado internamente y por lo tanto, con la capacidad de disolver metales del residuo. El potencial a corto y largo plazo para la formación de DAR es reflejado por la **prueba del potencial neto de neutralización (PNN)**, que en principio calcula el contenido total de azufre de la muestra (potencial de acidez) y el potencial bruto de neutralización, luego substraer el potencial de acidez máximo del potencial bruto de neutralización, obteniendo un potencial neto de neutralización. **La prueba de pH en pasta** indica la reactividad inmediata de los minerales neutralizadores en la muestra, al medir el pH de la pasta formada por una submuestra y agua en proporción de 1:2.

Entre las posibles pruebas cinéticas fueron seleccionadas las pruebas en celdas húmedas. Además de confirmar los resultados de las pruebas estáticas, el propósito de las pruebas en celdas húmedas es estimar el ritmo y la variación temporal de la generación de ácido y determinar la calidad total de los licores.

La evaluación incluyó cuatro categorizaciones diferentes: 1) una categorización multiparamétrica con influencia de todos los factores importantes, 2) una categorización relacionada con la superficie, que considera la descarga anual de contaminantes de cada depósito, 3) una categorización relacionada con la fuerza de la fuente, que muestra la cantidad inicial totalmente lixiviable de metales y sales (lixiviación a corto plazo), y 4) una categoría,

también relacionada con la fuerza de la fuente, que muestra la fracción totalmente lixiviable de metales y sales (lixiviado a largo plazo, si la oxidación no es obstaculizada).

Las categorizaciones anteriormente mencionadas se basan, exclusivamente, en los resultados de diversas pruebas y parámetros físicos del material residual. No se ha considerado la posición geográfica ni el impacto en los ecosistemas humanos o naturales. En el informe final se realizará una clasificación completa de los depósitos de residuos que incorporará esos factores.

La categorización multiparamétrica (método 1) define que los depósitos de colas de Santa Fe son la fuente de contaminación más significativa en esta categoría de residuos minerales. El depósito de Bolívar es la segunda fuente de contaminación más importante, mientras que Poopó ocupa sólo el sexto lugar; sin embargo, las categorizaciones por la fuerza de la fuente, tanto a corto como a largo plazo (métodos 3 y 4) ubican a Poopó en el tope. **Estos tres depósitos: Santa Fe, Bolívar y Poopó son las unidades con mayor producción de DAR estudiadas aquí.** También están localizadas entre las cuatro más altas de una categorización compuesta, basada en las cuatro categorizaciones. Las colas del Poopó son las más importantes a largo plazo. Hasta ahora están muy poco oxidadas y el tomar medidas preventivas con el objetivo de interrumpir el transporte de oxígeno a los residuos tendrá, probablemente, un buen resultado. Las colas de Santa Fe son las menos importantes entre las tres primeras que deben ser remediadas a largo plazo. Considerando sólo la lixiviación a corto plazo, el depósito de Bolívar es el más importante y el de Santa Fe es el segundo en importancia para ser mitigado.

En lo que concierne a los depósitos clasificados como de menor magnitud, de acuerdo a la caracterización multiparamétrica, los depósitos de Avicaya, Totoral y algunos de los ubicados en Machacamarca y Huanuni sólo han producido 10-20% de descarga de DAR por unidad, en comparación con los tres depósitos más importantes.

Considerando la descarga total potencial de DAR en función del área de los depósitos (método 2), debería asignarse prioridad a Totoral, Poopó y alguno de los depósitos en Machacamarca. Debido, tanto a la fuerza potencial para producir DAR, como a la descarga total potencial de DAR, (todos los métodos), los depósitos en Japo, Morococala y algunos depósitos en Machacamarca y Huanuni tienen baja prioridad, puesto que sólo representan un bajo porcentaje del total lixiviable de todos los depósitos del área. Es obvio que ya han sido completamente oxidados y están casi totalmente lixiviables.

La estrategia, al investigar la situación del DAR en una desconocida área minera con depósitos de colas, debería ser utilizar las pruebas estáticas como un medio para obtener un panorama general de las variaciones en la formación potencial del DAR. Como resultado de estas pruebas se puede seleccionar unas pocas muestras clave para verificación y especificación del potencial de DAR por medio de pruebas cinéticas.

1. INTRODUCCIÓN

Siglos de explotación pasada y presente han dejado en el área del Proyecto Piloto Oruro (PPO) grandes cantidades de distintos tipos de residuos minerales correspondientes a diferentes períodos de la historia minera de la zona. Se realizó una investigación completa de estos depósitos como parte del programa del PPO (Subcomponente 3c, "Inventarios de las fuentes no puntuales de contaminación", según definición en el Programa de Trabajo Detallado, PPO-9401, enmienda PPO-9601).

El objetivo general de este estudio ha sido la evaluación de las colas, en este caso, residuos de grano fino provenientes de procesos de concentración aplicados a yacimientos de minerales sulfurosos. Se evaluó la posición, el volumen, y aquellas características del residuo que rigen la calidad de la descarga a los sistemas hidrológicos desde los depósitos individuales. Se realizó un cálculo para clasificar los depósitos de acuerdo a la prioridad para una mitigación futura. La evaluación no será la única base de categorización. Se monitorean los efluentes de áreas específicas en un estudio separado, cuyo resultado también será usado para asignar una categorización final por prioridades.

Este informe sólo cubre las características de los depósitos de colas. La caracterización de los depósitos de desmontes y sedimentos fluviales contaminados por escape de colas se tratará en informe separado (PPO-9611).

La recolección de datos e informes de campo, fue llevada a cabo por el grupo GEO y por el equipo PPO. Las pruebas de laboratorio han sido realizadas en el *Instituto de Investigaciones Minero Metalúrgicas* (IIMM) de Oruro. El informe fue preparado por Tom Lundgren (Terrateme AB, Suecia, autor principal), Ulf Qvarfort (Universidad de Uppsala, Suecia), José Córdova (PPO), y editado por Pavel Adamek (SGAB). El presente informe incorpora algunas investigaciones, y partes de un informe sobre la revisión ambiental de la Mina de San José, preparado por SGAB (Pavel Adamek, autor principal) en colaboración con COMIBOL(1995).

2. ANTECEDENTES Y METODOLOGÍA

2.1 Drenaje ácido de roca (DAR)

La mayor parte de las rocas extraídas o procesadas en minería, contiene metales que no se recuperan. Algunos de éstos son más tóxicos o indeseables que otros. La mayoría no es móvil en circunstancias naturales. En el bedrock, por ejemplo, sólo una pequeña parte de ellos se movilizaría, aún a largo plazo. Sin embargo, si se exponen rocas con sulfuros a condiciones de oxidación, los sulfuros se oxidarán, dando lugar a la formación de ácido sulfúrico, lo que puede incrementar en varios órdenes de magnitud la capacidad de lixiviación de metales.

Tanto los procesos de oxidación como los de lixiviación se ven afectados por el tamaño del material. Por ejemplo, la superficie total, expuesta a la oxidación y la lixiviación, se incrementa miles de veces en comparación con la de la roca original. Puesto que el objetivo de moler la mena es separar los minerales de estaño de la ganga, es probable que una gran

parte de las partículas de sulfuro sea liberada, quedando así expuesta a oxidación y lixiviación.

Las concentraciones reales de metales en efluentes dependen de factores de ubicación, como los ritmos de oxidación, de flujo de agua y la presencia de agentes neutralizantes. Por lo tanto, para prever futuras descargas provenientes de desmontes, colas y otros residuos de actividades mineras, es necesario investigar todos los parámetros relevantes del material que influyan en su oxidación y su lixiviación. Estos factores interactúan y determinan lo que comúnmente se denomina *potencial de generación de ácido* de la roca o residuo.

2.2 Simulación de la formación de DAR en laboratorio

El ritmo de transporte de metales con el licor, desde un depósito específico, se rige principalmente por tres factores:

- Procesos de transporte, por ejemplo el ritmo de flujo del agua (ritmo de producción de lixiviado), que a su vez depende de los factores climáticos y de la permeabilidad del material.
- Las propiedades de lixiviación del residuo, que determinan la concentración de metales en el licor.
- Las propiedades de oxidación y neutralización del material, que determinan el pH del licor, que influyen al ritmo de disolución de metales en el mismo. Ellas determinan entonces la movilización de metales susceptibles de ser lixiviados. En los desechos oxidados, con un potencial de neutralización neto negativo (PNN), la lixiviación continuará a un alto nivel durante mucho tiempo, posiblemente hasta que todos los sulfuros sean oxidados y lixiviados.

Es obvio que las propiedades del material son importantes. De hecho, esto explica por qué el transporte de metales puede variar en varios órdenes de magnitud entre un depósito de residuos sulfurados y otro. Por consiguiente, resulta esencial definir las propiedades del material residual por medio de pruebas de laboratorio.

Aparte de las propiedades del material, los procesos de transporte influyen tanto en la oxidación como en la lixiviación. La oxidación se ve afectada en gran medida por el ritmo de transporte de oxígeno y la lixiviación por el ritmo de transporte del agua. Como la presencia de agua contrarresta el transporte de oxígeno, el sistema puede ser complejo y sensible, dependiendo nuevamente de las propiedades del material, como la distribución del tamaño del grano, la minerología y la textura.

En realidad, la lixiviación es bastante lenta. Las pilas de residuos, pueden tener hasta 10 metros de alto y aún así una porosidad de 30-40%. Esto quiere decir que con una precipitación neta de sólo 50-75 mm/año, llevaría de 50 a 80 años desplazar sólo un volumen de poros. Normalmente pasarán cientos o miles de años hasta que todas las fracciones lixiviables de los desechos desaparezcan. En la mayoría de los casos, con una producción positiva neta de ácido, el ritmo de oxidación es lo suficientemente alto como para equilibrar la lixiviación y, por lo tanto, ésta se mantendrá a altos niveles durante períodos prolongados.

No es posible simular los procesos de transporte de un modo estrictamente real, en parte debido a la complejidad del sistema, y en parte a la dependencia de tiempo/escala. La lixiviación puede ser simulada por pruebas en columnas, aunque la lixiviación a largo plazo puede requerir pruebas prolongadísimas. La lixiviación de residuos sulfurosos en columnas anaeróbicas no considera la continua movilización de metales y sales por oxidación. Esto puede realizarse en una prueba de celdas húmedas. Al mismo tiempo, la prueba muestra los efectos cinéticos por tener, en el mismo material residual, agentes productores de ácido y agentes neutralizantes con diferentes propiedades de transporte. El funcionamiento de una celda húmeda se describe en la sección 1.4.2. y su construcción en la *Figura 1*.

Aunque ésta simula la oxidación y la percolación de agua, la prueba de celda húmeda no opera en condiciones realistas. Por razones prácticas, el ritmo de transporte del agua debe mantenerse a niveles mucho más altos que en la naturaleza. El ritmo de oxidación puede ser bastante realista para la capa superficial del depósito durante el período de lluvia, pero es definitivamente demasiado alto para las partes más profundas y durante los periodos secos. La aceleración de los procesos en la celda permite estudiar en pocos meses la lixiviación y la oxidación, lo que en la naturaleza tomaría décadas o siglos.

2.3 Métodos aplicados

2.3.1 Pruebas estáticas

Se llevaron a cabo pruebas estáticas para determinar el potencial que tiene una unidad de residuo muestreada para producir ácido no neutralizado internamente y por lo tanto capaz de disolver los metales del residuo que son transportados por los efluentes del depósito.

Potencial neto de neutralización

La prueba se realizó en tres etapas:

- Medida/análisis del contenido total de azufre en la muestra.
- Medida del potencial bruto de neutralización.
- Cálculo del "potencial neto de neutralización" (PNN)

Los siguientes pasos fueron utilizados en las pruebas estáticas; esto ha sido extraído del British Columbia Acid Mine Drainage Task Force Report de agosto de 1989 (" Borrador del Informe Técnico del Drenaje Ácido de Roca, Volumen 1".)

La determinación del contenido total de azufre de la muestra se realizó usando un horno Leco; allí, la muestra fue calentada a aproximadamente 1 600° C con una corriente de oxígeno que pasaba a través de la misma. El dióxido de azufre liberado fue recolectado en una solución que fue titulada para determinar el azufre total. El contenido de azufre total fue transformado a máximo potencial de acidez en kilogramos de CaCO₃ equivalentes a 1 tonelada de muestra. Se utilizó el factor de conversión 31,25 (se asume que 1 % de azufre en la muestra de residuo neutraliza 31,25 CaCO₃ por tonelada de residuo.)

El potencial de neutralización bruto, que es la cantidad total de agentes neutralizantes (por ejemplo carbonatos e hidróxidos) presentes en la muestra, fue determinado tratando una muestra con exceso de ácido clorhídrico. La muestra fue calentada para asegurar que las reacciones neutralizantes se completen. La cantidad de ácido no consumido fue determinada por titración con hidróxido de sodio hasta pH 7 (llamada "back-titration") El potencial de neutralización fue calculado al convertir la cantidad de base consumida, en un equivalente de CaCO_3 , expresado en kg/tonelada de muestra.

El potencial neto de neutralización (PNN) fue calculado restando el potencial máximo de acidez, del potencial bruto de neutralización, un valor negativo indica el potencial neto de acidez. Basados en la experiencia general, las muestras con hasta +20 kg de CaCO_3 por tonelada de residuo pueden generar ácido. El rango de incertidumbre (± 20 kg) se atribuye a los errores cometidos al determinar los potenciales de acidez y de neutralización, por usar un factor de conversión restringido al convertir el azufre total en acidez, y también a los errores analíticos. Las muestras con un valor de PNN sobre +20 kg de CaCO_3 por tonelada de residuo no necesitan ser examinadas con pruebas cinéticas respecto a su capacidad para producir ácido.

pH en pasta

Para indicar la reactividad inmediata de los minerales neutralizantes en la muestra, se determinó el pH de una pasta compuesta por una submuestra molida y agua en proporción 1:2. El valor obtenido indica también si se produjo una generación significativa de ácido antes de la medición.

Las submuestras cuyo pH en pasta difieren más de 2 unidades no fueron incluidas en la muestra principal. En cambio, se tomó una muestra principal adicional, que representa el volumen divergente del desecho.

2.3.2 Pruebas cinéticas

Para confirmar los resultados de las pruebas PNN e indicar la cantidad de los productos de intemperismo móviles acumulados antes de la evaluación y reflejar el proceso de su lixiviación, se realizan pruebas que toman en cuenta los factores dependientes del tiempo, como solubilización de agentes neutralizantes y transporte de solutos, denominadas pruebas cinéticas. En general, se realizan dos diferentes tipos de pruebas con dos o tres subtipos, de acuerdo con el esquema de la *Tabla 1*. En este proyecto, las pruebas en celdas húmedas fueron seleccionadas como el método principal de pruebas cinéticas para la caracterización de colas.

Tabla 1. Caracterización de las pruebas realizadas en muestras de roca sulfurosas

Tipo de prueba	Tipos de muestra	Objetivo
Celda húmeda	Seleccionada, grano fino	Confirmar la prueba-PNN, determinar el ritmo de generación de ácido
Pila de prueba	Seleccionada, grano grueso	
Prueba de columna-pequeña	Seleccionada, grano fino	Determinar las características de lixiviación, particularmente las concentraciones inmediatas al lixiviar y la fracción totalmente lixiviable en la perspectiva a largo plazo.
Prueba de columna-mediana	Seleccionada, grano medio	
Prueba de pila	Seleccionada, grano grueso	

Pruebas en celda húmeda

La prueba en celda húmeda es un método cinético ampliamente aceptado para estimar las propiedades de intemperismo de residuos minerales de grano fino. El método implica la exposición de la muestra durante largo tiempo (varias semanas) al oxígeno y a la humedad, simulando los procesos de intemperismo. Por lixiviación periódica de las muestras se remueven los elementos resultantes solubles en agua, y por análisis de los licores, se puede estudiar el proceso de intemperismo. Además, para confirmar los resultados de las pruebas estáticas, el propósito de las pruebas en celdas húmedas, es estimar el ritmo y la variación temporal de la generación de ácido, y determinar la calidad global del licor. También es posible probar algunas opciones de mitigación, como la reducción de oxígeno, del transporte de agua al depósito o la adición de cal.

El diseño de la celda corresponde a una cámara cerrada de cualquier forma; aunque se hubiera preferido una celda cilíndrica, se eligió una prismática por razones prácticas, demostrando ser simple y confiable. La celda fue diseñada por M. Lindvall (Boliden Mineral/SGAB) y G. Solís (IIMM), y construida por el personal del IIMM. La celda, $l = 240$ mm, $w = 160$ mm y $h = 300$ mm, es de vidrio y está dividida en tres (A, B y C, *Figura 1.a*) por dos placas del mismo material, una vertical y una horizontal perforada.

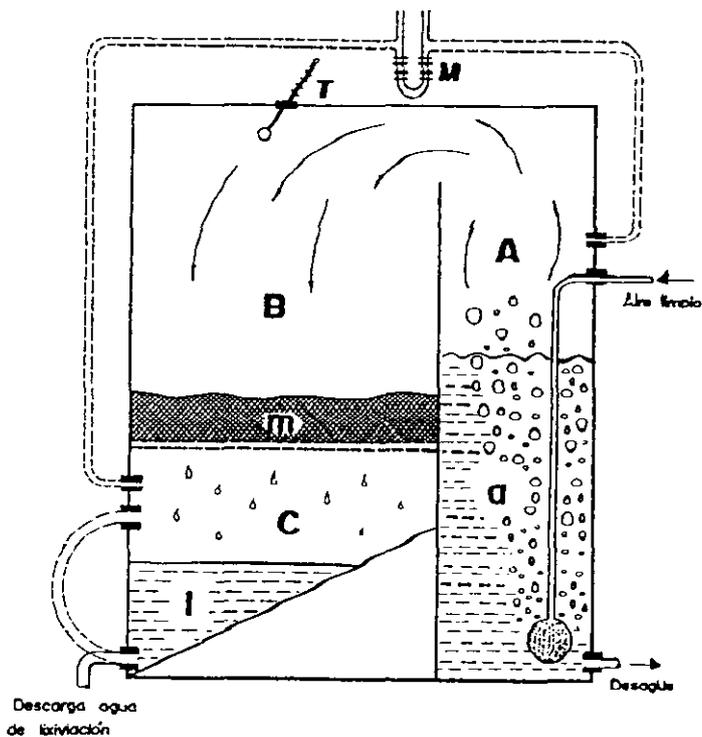
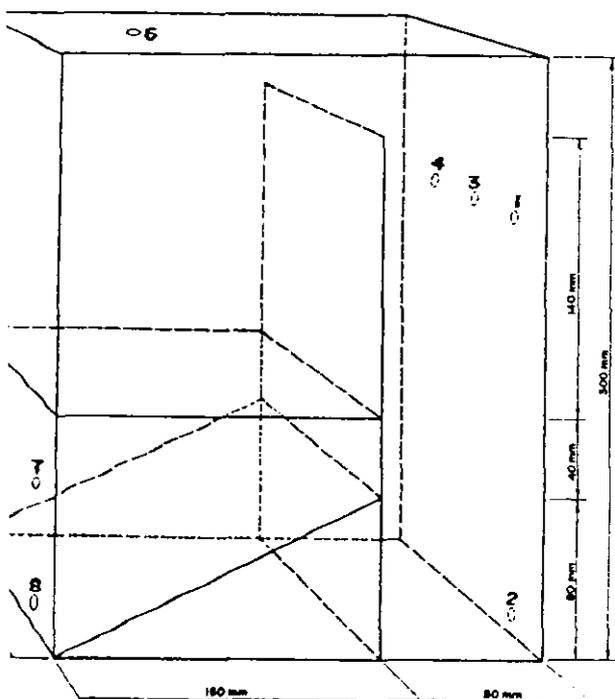
La muestra (250 g secos) fue mezclada con un peso igual de vidrio Pyrex triturado (2-4 mm) para incrementar la superficie expuesta y así reducir la extensión del periodo de prueba. La adición de vidrio redujo también la posibilidad de canalizaciones y bloqueos por precipitación de sales. La mezcla homogeneizada de muestra y vidrio fue depositada, formando una capa, sobre un filtro de esponja ubicado sobre la placa horizontal perforada (ver *Figura 1 b*).

El aire humidificado se produce en el compartimiento vertical A, soplando aire prefiltrado en el agua destilada que llena parcialmente el compartimiento. El aire humidificado llega a la muestra del compartimiento B a través de una abertura en el tope de la cámara. El licor alcanza el compartimiento C infiltrándose a través de la placa horizontal perforada y puede ser drenado por un orificio de salida (8 en la *Figura 1a*) al fondo del compartimiento. Para facilitar el drenaje, fue ubicada una placa de vidrio inclinada que dirige la lixiviación a la manguera de drenaje. A fin de medir y controlar la diferencia de presión entre los compartimientos A y C, se instaló un manómetro externo. La diferencia de presión refleja la presión capilar en la muestra. Un orificio en la tapa de la celda (6 en *Figura 1a*) permite tanto el lavado periódico de la muestra con agua destilada, como la medición de la temperatura de la celda con un termómetro ya instalado.

Para las pruebas se usaron muestras húmedas ($L/S > 20$). Las pruebas duraron de 10 a 25 periodos de 7 días. En cada periodo la muestra fue expuesta tres días al aire seco, luego tres días al aire húmedo. El séptimo día se agregó 1 litro de agua destilada por el orificio 6 (*Figura 1a*) y la muestra se empapó durante una hora, luego se permitió que la celda drenara durante 10 minutos antes de la recolección. (Una semana de este método corresponde a 1 litro de licor drenado desde la celda). Se realizó un segundo lavado, pero esta vez, la muestra fue empapada sólo 15 minutos antes de drenarla por diez minutos.

El agua lixiviada recolectada fue graduada según el pH y la conductividad eléctrica y analizada por concentración de sulfato y As, Ca, Cu, Cd, Fe, Mg, Pb, Sn y Zn. Todos los análisis fueron realizados en el laboratorio del IIMM.

Se construyeron doce celdas idénticas y se ubicaron en forma paralelas para permitir la operación racional y el manejo de las pruebas.



1. Diseño de las celdas de humidificación (1 - entrada para el agua destilada, 2 - salida para el drenaje del agua destilada, 3 - orificio para la introducción de aire prefiltrado, 4 - 5 - orificios para un tubo manométrico, 6 - orificio para el lavado de la muestra y para medir la temperatura, 7 - orificio de estabilización, 8 - orificio para la evacuación del agua de lixiviación.

Figura 1b. Dibujo (sección vertical) de una celda de humidificación en funcionamiento (A, B, C compartimientos de la celda, a - agua destilada, m - muestra, l - agua de lixiviación T - termómetro y M - manómetro).

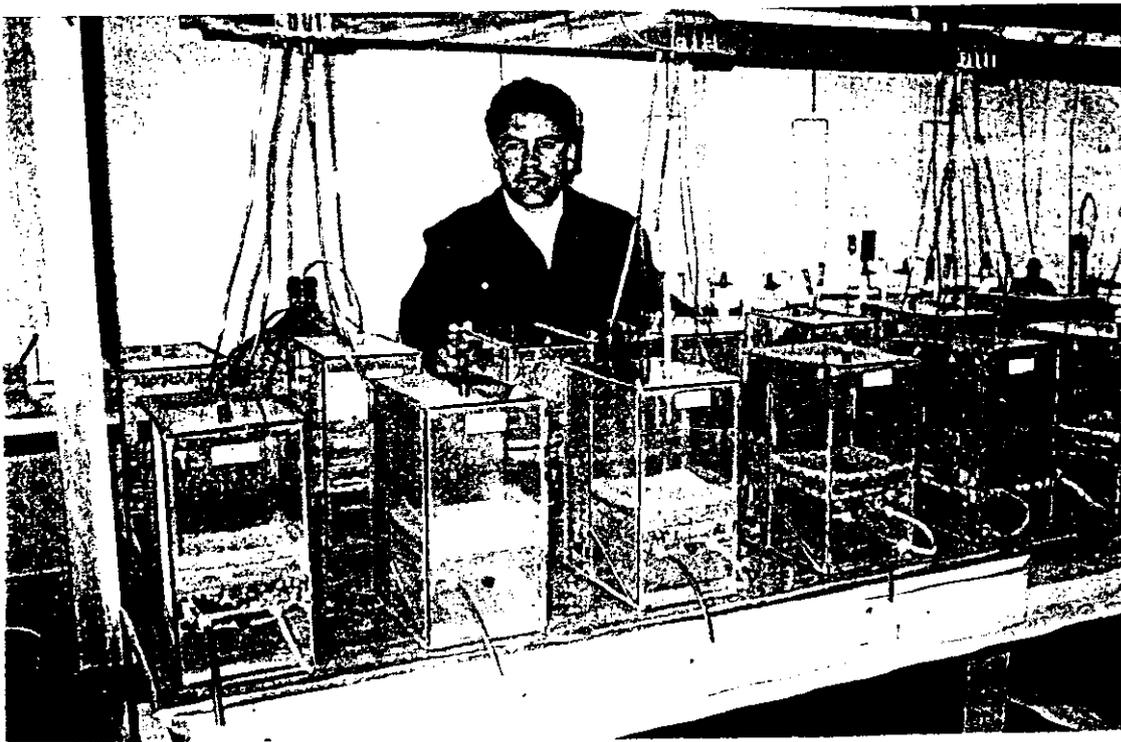
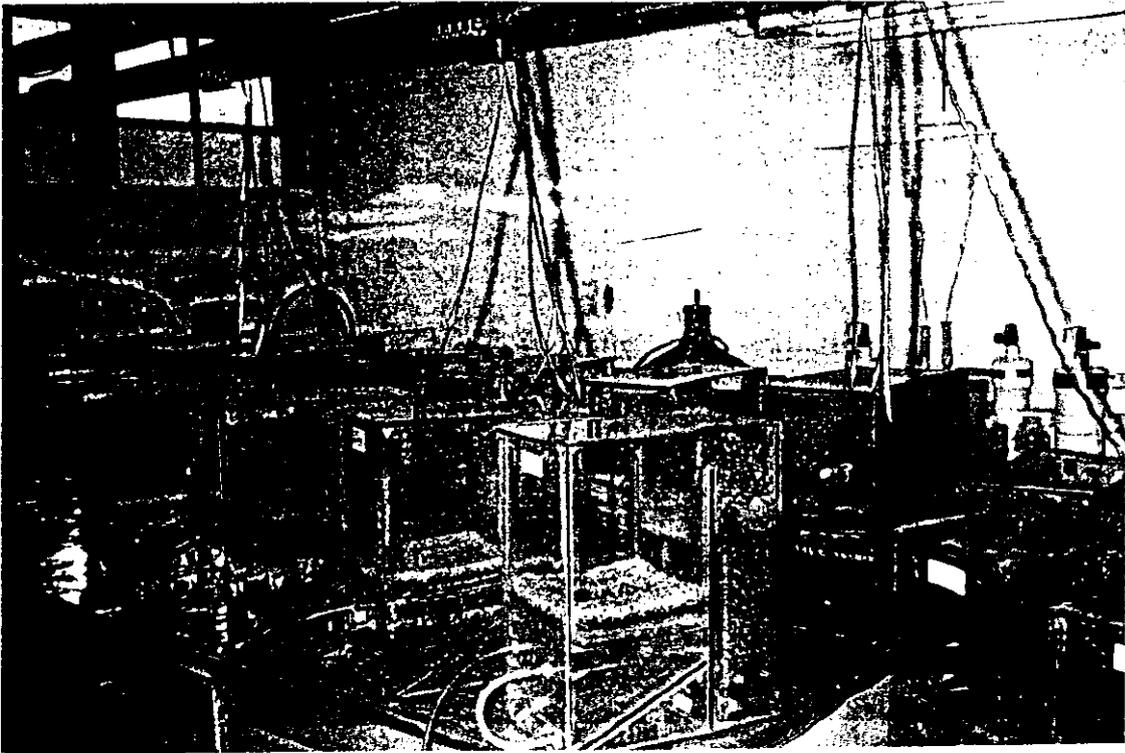


Figura 2a, 2b. Celdas húmedas diseñadas por el PPO y operadas en el laboratorio del IIMM.

3. DEPÓSITOS DE COLAS

3.1 Tipos de depósitos y sus ubicaciones

En general hay sólo tres tipos de colas: de jig, (grano grueso), de otros procesamientos gravimétricos (grano fino) y de flotación (grano fino). Por supuesto, las colas pueden también clasificarse por su mineralogía o su estado de oxidación (edad). El estado de oxidación varía mucho y es difícil de describir. La composición principal se presenta en la *Tabla 3*. Gran parte de los residuos ha sido retratada en varias etapas, aspecto que fue registrado según la disponibilidad de información. Las colas que fueron transportadas por los ríos y depositadas aguas abajo con otros sedimentos naturales han sido examinadas y clasificadas como sedimentos contaminados.

Los 20 depósitos de colas con más de 1 000 m³ de desecho han sido mapeados y muestreados. *La Figura 4* muestra la ubicación de todos ellos. Todas las unidades han sido examinadas geodésicamente y descritas en escalas apropiadas.

3.2 Volúmenes depositados y caracterización mineralógica de las colas

Además de los depósitos de la *Tabla 2*, hay una gran cantidad de colas en la mina de Kori Kollo de la empresa minera Inti Raymi. Las colas están confinadas en un dique circular de 2500 de diámetro, ubicado sobre un revestimiento de arcilla de alta calidad de 3 m de espesor. Kori Kollo produce aproximadamente 18 000 toneladas de colas diarias.

Fotografías de los depósitos seleccionados se encuentran en la *Figura 3*, a continuación, en el Apéndice 2 y en la cubierta del informe (colas de Itos).

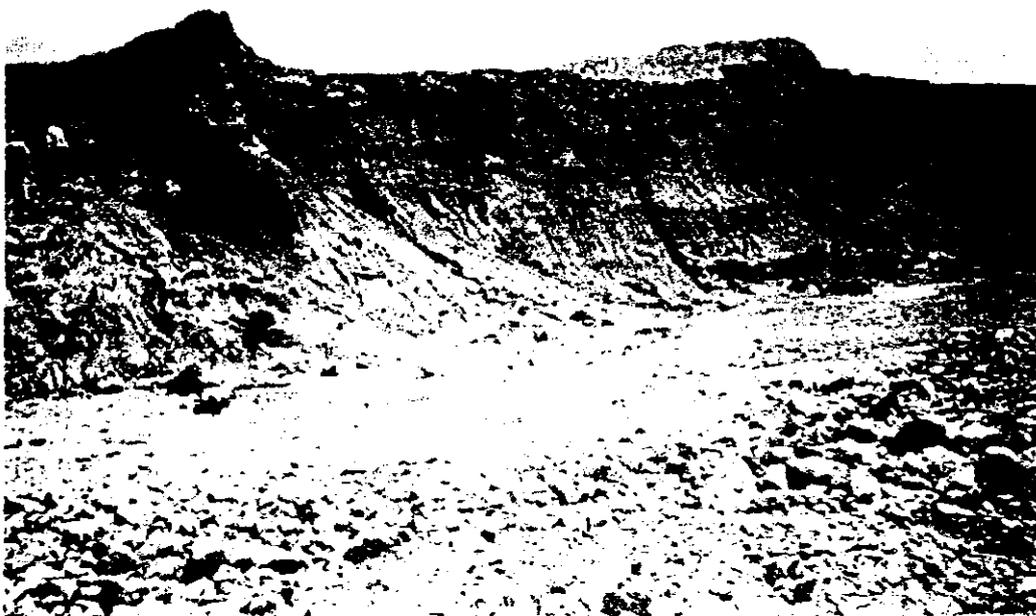


Figura 3. Colas de Avicaya altamente intemperizadas. En el Apéndice 2 se pueden encontrar otras fotografías de los depósitos de colas seleccionados.

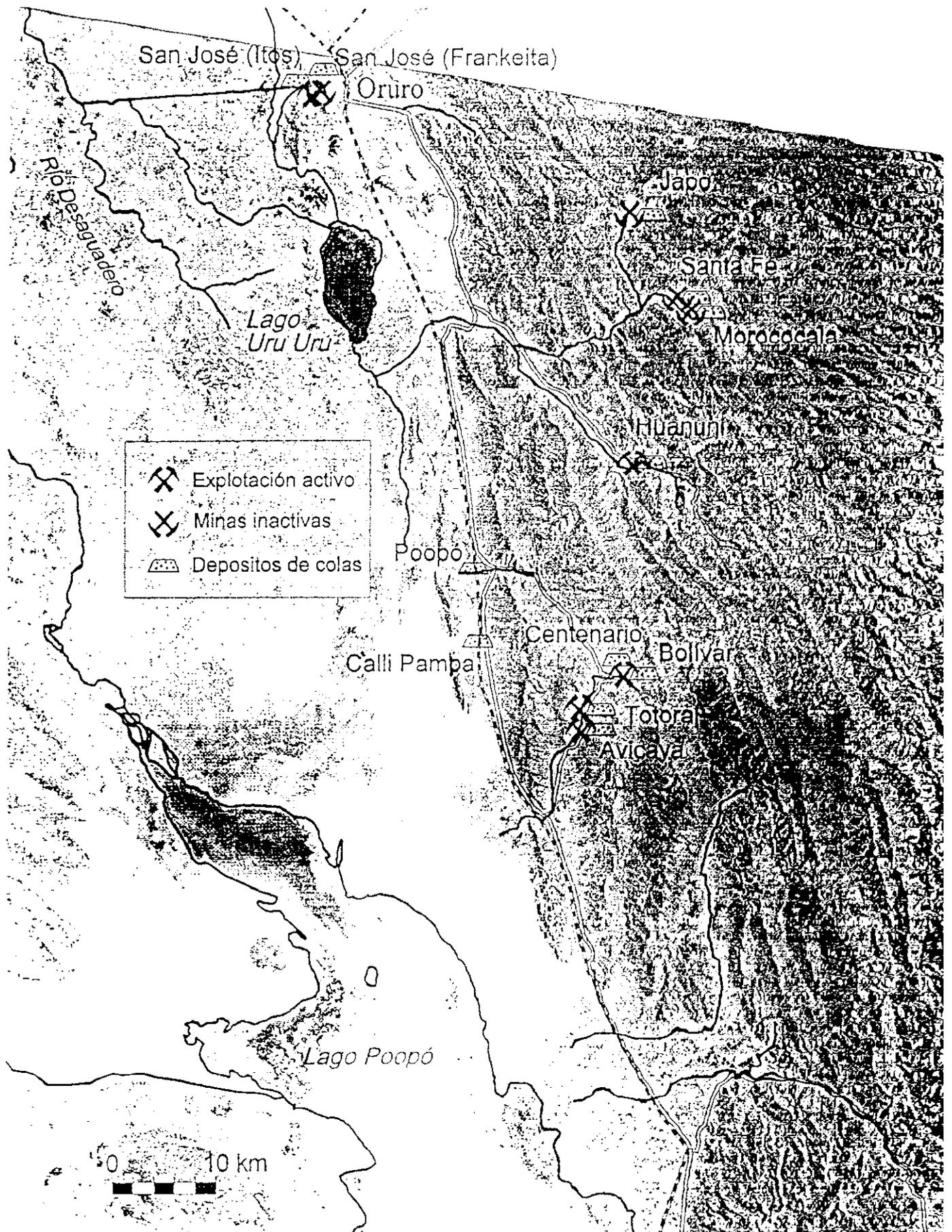


Tabla 3. Tipo, tamaño de grano y composición mineral de colas.

Minera / Ingenio: Depósito de colas	Tipo	Tamaño de grano	Composición mineral
Apo Morococala	Colas mixtas de gravimetría y flotación, arenosas a finas	< 2 mm	- 90% cuarzo, - 10% pirita + casiterita
			- 95% cuarzo, - 5% pirita + casiterita
Santa Fe	Colas de flotación, finas	< 0.2 mm	- 60% pirita + sulfuros, - 40% cuarzo, casiterita minoritaria
Luanuni: Porvenir Duncan	Colas de gravimetría, arenosas	0.25 - 2 mm	90% cuarzo, 8% jarosita y turmalina, 2% casiterita + pirita + marmatita + arsenopirita
Machacamarca: IV II + III	Colas de flotación, finas	< 0.2 mm	+ 95% pirita, sulfuros, > casiterita
	Colas mixtas de gravimetría y flotación, finas a arenosas	< 2 mm	~ 80% cuarzo, + pirita, sulfuros, casiterita
Coopó	Colas de flotación, finas	< 0.2	40-60% pirita y sulfuros, + cuarzo, casiterita minoritaria
Callipampa	Predominan las colas de flotación, finas > arenosas	max. 2 mm mostly < 0.2 mm	Fuertemente piritosa, con a adición de esfalerita
Bolívar	Colas de flotación, finas	< 0.2 mm	Fuertemente sulfurosa (hasta 90%)
Centenario	Colas de flotación, fina	< 0.2 mm	Fuertemente sulfurosa, muy altos contenidos de esfalerita (> pirita)
Chotral	Colas mixtas de gravimetría y flotación, finas a arenosas	< 2 mm	~ 90% cuarzo, + pirita, casiterita
Chicaya	Colas de flotación, finas	< 0.2 mm	Fuertemente sulfurosa (hasta 90%)
San José: Itos # 9 Itos # 8, 10 Iroco Frankeita	Colas de flotación, finas	< 0.2 mm	~ 60% cuarzo, ~ 40% pirita y sulfuros de Sb y As con Pb y Ag
	Colas de jig de gravimetría	2 - 40 mm	+ 90% cuarzo, + pirita > sulfuros
	Colas de flotación, finas	< 0.2 mm	~ 75% cuarzo, 25% pirita y sulfuros de Sb y As con Pb, Ag, + Hg
	Colas de flotación, finas	< 0.2 mm	- 50% cuarzo, ~ 50% arsenopirita + sulfuros

Tabla 2 Resultados del inventario de depósitos de colas en el área del PPO.

Subcuencas/Área de colección	Mina / Ingenio Depósito de colas	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Tonelaje (ton)	Área a cubrir (m ²)
Río Japo	Japo	8 000	388 000	581 000	33 000
	Morococala	8 500	72 000	108 000	10 000
	Santa Fe	9 000	42 000	68 000	9 000
Río Huanuni	Huanuni: Porvenir Duncan	108 500	1 463 000	2 365 000	318 000
		8 500	24 000	36 000	22 000
	Machacamarca ¹	288 000	492 000	779 000	290 000
Río Poopó	Poopó	65 000	327 000	523 000	65 000
	Poopó: (A)	199 000	62 000	74 000	200 000
	(B) + (C)	115 000	21 000	25 000	115 000
	(D)	83 000	52 000	62 000	83 000
	Callipampa	95 000	167 000	250 000	100 000
Río Antequera	Bolívar ²	13 000	26 000	41 000	14 000
	Centenario	92 000	71 000	106 000	92 000
	Totoral	22 000	103 000	154 000	30 000
	Dique Totoral	214 000	236 000	377 000	214 000
	Avicaya	16 000	163 000	262 000	42 000
Oruro	San José: Itos # 9	132 000	1 030 000	1 850 000	700 000
	Itos # 10+12	56 000	416 000	728 000	70 000
	Iroco	489 000	73 000	132 000	489 000
	Frankeita	12 000	26 000	47 000	23 000
Total		2 033 500	5 254 000	8 568 000	2 919 000

¹ Machacamarca es actualmente un ingenio inactivo antiguamente trataba mineral proveniente de la mina San José así como de Huanuni y Bolívar. Cantidades menores también eran suministradas por minas pequeñas no identificadas operadas por cooperativas mineras.

² Las colas registradas en Bolívar son las de producción reciente. Desde 1995, la mina Bolívar y una nueva planta de concentración, son operadas con un contrato de riesgo compartido por COMIBOL y la Compañía minera del Sur (COMSUR), siendo esta última el operador. Las nuevas colas, producidas a un promedio de 750 toneladas secas por día, son depositadas en un dique que cierra un pequeño valle. El confinamiento de colas está impermeabilizado por con arcilla y geotextil. Hay pozos de monitoreo instalados al pie del dique para detectar cualquier filtración de efluentes al agua subterránea. La operación en su conjunto está diseñada para descarga y se realiza de acuerdo normas ambientales internacionalmente aceptadas.

3.3 Las colas de Itos e Iroco

En el distrito minero de San José, la minería pasada dejó aproximadamente 2.5 millones de toneladas de colas. Están depositadas cerca de la planta de concentración inactiva de Itos (ver la fotografía de la portada). En la primera fase de producción de Itos, las colas se descargaron indiscriminadamente sobre la planicie de la Playa Iroco, hacia el oeste del ingenio, de donde fueron arrastradas al río Tajarita, que forma parte del río Desaguadero y del sistema canalizado. Debido a las quejas de los campesinos locales, las colas finas y de jig fueron depositadas en un dique de colas no impermeabilizado. El dique actualmente está roto y las colas se desparramaron en su periferie, llegando hasta la Playa Iroco, a kilómetros de distancia (ver *Figura D Apéndice 2-2*).

Las colas de la Playa merecen una nota especial. Una capa de colas finas de 10 a 50 cm de espesor cubre aproximadamente 500.000 m² de la Playa al este de la laguna Vincunaya/Tajarita, que sólo se forma durante la estación lluviosa y durante los periodos de abundancia de agua (ver informe PPO-9603). En la estación lluviosa las colas quedan parcial o completamente sumergidas en la extensa laguna. Durante la estación seca, las colas quedan expuestas totalmente al intemperismo y las sales altamente solubles forman en la superficie costras de colores, que son periódicamente arrastradas a un río cercano. Los efectos de este proceso en la calidad del agua son descritos en el informe PPO-9607.

En la *Figura 5* se ve un perfil típico de las colas. Su composición química en la Playa Iroco es idéntica a la del dique de colas, excepto por el estrato superior, que tiene un alto nivel de mercurio. Este proviene de varias pequeñas minas de oro de cooperativas situadas en la ladera occidental del Cerro Jafum Compañía, en el borde del depósito San José, y es descargado sobre la Playa y el río. Esas pequeñas minas son las únicas activas en el área Oruro, y las únicas que usan y descargan mercurio libremente en el ecosistema.

Las colas de Itos e Iroco son no sólo la más importante fuente difusa de DAR en el distrito San José, sino también en el área del proyecto. Para neutralizar su potencial de generación de ácido se necesitarían unos 1.2 millones de toneladas de CaCO₃. Sin embargo, el PPO no realizó pruebas cinéticas en estas colas, porque fueron concedidas por COMIBOL a una sucursal de la compañía norteamericana BAREX (BAREX Latinoamericana Limitada). De acuerdo con los términos de concesión, BAREX está obligada a acatar todas las leyes bolivianas y específicamente "...se obliga a cumplir las disposiciones legales vigentes para preservar el medio ambiente en sus áreas de operación". Además, está obligada a operar de acuerdo a estándares generalmente aceptados en la industria minera. Durante el período de concesión, BAREX tiene derechos exclusivos sobre las colas y sobre el área cubierta por ellas.

BAREX, luego de completar pruebas metalúrgicas con las colas, construyó una planta de lixiviación por agitación y un dique impermeabilizado para la ubicación final de las colas retratadas. La planta inició operaciones a mediados de 1995, incluyendo las colas de la planicie Iroco, durarían aproximadamente once años. El proceso de beneficio se basa en una lixiviación clorurante por agitación en caliente (75 ° C). Recupera aproximadamente 85% de plata, 90% de plomo y 40% de antimonio. La operación es actual, fue diseñada para tener descarga cero, utilizando la mejor tecnología disponible.

A nuestro saber y entender, la operación satisface todos los requerimientos ambientales actuales. Se asumió que BAREX completará el programa proyectado y que las colas se dispondrán en forma segura y permanente. Si por alguna razón, el programa es reducido, se deberán buscar soluciones alternativas, precedidas por investigaciones adicionales.



Figura 5. Sección típica - colas descargadas sobre la "Playa Iroco."

Ag g/t	As %	Hg g/t	Pb g/t	S %	Sb %
125	0.21	20.1	0.73	13.8	0.48
175	0.30	0.1	1.01	13.5	0.69
222	0.25	0.0	1.27	11.5	0.53
48	0.10	0.0	0.23	1.9	0.10
13	0.02	0.0	0.05	0.3	0.01

4. PROPIEDADES DE OXIDACIÓN Y LIXIVIACIÓN

4.1 Pruebas estáticas

4.1.1 Información básica

El objetivo principal de las pruebas estáticas es caracterizar una muestra por su potencial para generar drenaje ácido de roca, tanto a corto como a largo plazo. La situación inmediata es reflejada por la prueba de pH en pasta. Se tienen valores bajos del pH en pasta (<4) si la oxidación ya se ha producido, dando productos de oxidación movilizados que incluyen ácidos sulfúricos. En las pruebas realizadas, el pH en pasta fluctúa entre 1.9 y 6.6, revelando una amplia variación en el estado de oxidación de las muestras. Un pH alto no significa necesariamente que no se generará DAR. Esto sólo indica que la muestra no está oxidada. Un pH bajo revela que el material generará DAR a corto plazo, y podría hacer lo mismo a largo plazo. Por tanto, el pH en pasta solamente, no es un buen criterio para categorizar las unidades de residuos para la priorización de medidas de mitigación.

El potencial a corto y largo plazo para la formación de DAR se refleja en el potencial neto de neutralización (PNN), que es el potencial total de la muestra para neutralizar ácidos cuando los ácidos generados internamente ya han sido neutralizados. Usualmente el PNN se expresa en kilogramos equivalentes de carbonato de calcio (CaCO_3) por tonelada de residuo. Básicamente, un valor negativo de PNN señala que la muestra tiene potencial para generar DAR, mientras que un valor positivo muestra que no lo tiene. Sin embargo, se trata de una simplificación, puesto que el ácido no se genera a la misma velocidad con que se liberan los agentes neutralizantes, además no es seguro que exista un contacto totalmente eficiente entre ácidos y bases, o que sean transportados internamente a la misma velocidad. Normalmente, se considera que un PNN de +20 kg CaCO_3 cubre esta incertidumbre. Por lo tanto, valores del PNN menores a +20 kg de CaCO_3 indican la posibilidad de generación de DAR. Cuanto más bajos sean los valores, más alto será el potencial de producción de ácido.

4.1.2 Resultados

No hay correlación evidente entre pH en pasta y potencial neto de neutralización (PNN), ver *Figura 6*, esto puede ser bastante significativo para depósitos específicos, para otros no. El diagrama también revela el potencial generalmente alto para generar DAR.

Como se demostró mediante las pruebas en celdas húmedas (sección 3.2) algunos depósitos han sido completamente oxidados y lixiviados, aunque aún producen un drenaje de bajo pH.

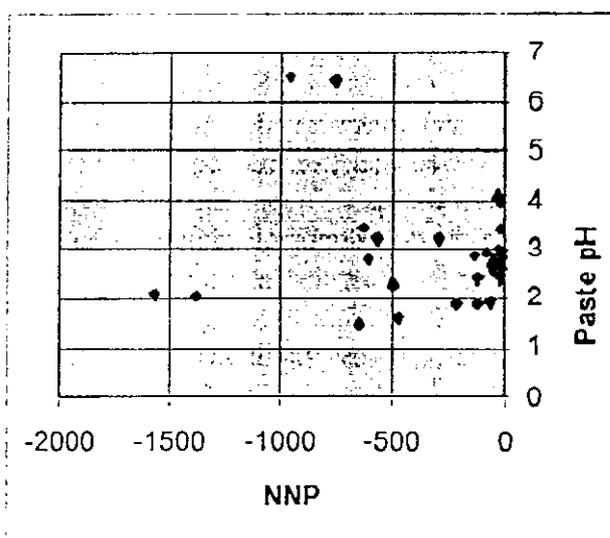


Figura 6. pH en pasta vs. PNN, datos de la Tabla 4.

Estos constituyen una fuente débil de DAR posterior. Y nuevamente, otros tipos de desechos, poseen un alto potencial de DAR, pero como son recientes producirán un drenaje de ácido relativamente alto hasta alcanzar la oxidación. Esto explica la insuficiente correlación entre el pH en pasta y el PPA o el PNN. Es obvio que pruebas cinéticas, como las de celdas húmedas, sean necesarias para priorizar las medidas de mitigación.

La *Tabla 4* muestra los resultados de las pruebas estáticas en muestras de colas del área investigada. Excepto las muestras de Poopó (PO-I) y una de las dos muestras de Bolívar (BJK-I), todas han dado un bajo pH en pasta, en la mayoría de los casos entre 2 y 3, clara indicación del DAR. Las muestras de Poopó, que son bastantes frescas, dieron un pH en pasta superior a 6 lo que no significa que no puedan producir DAR, sino que no lo han producido hasta ahora.

Todas las muestras de colas tienen valores negativos de PNN, esto indica que todas ellas tienen un potencial para generar DAR. Los valores más bajos (más negativos) corresponden a una pequeña porción de residuos piritosos en Machacamarca, con 45-50% de azufre y 39-44% de hierro, señal de que la pirita es muy pura. La cantidad de carbonato necesario para neutralizar este DAR excede la cantidad de residuos a ser tratados en un factor de 1.5! Las otras unidades de residuos de Machacamarca, además de las colas de pirita, dan valores negativos de PNN que corresponden a un potencial de oxidación de bajo a mediano.

Los segundos valores más bajos de PNN están relacionados con las colas frescas en Poopó, con un pH en pasta bastante alto. Estas colas también contienen abundante pirita (45-60%). Aún en este caso, no es realista neutralizar el DAR, puesto que requerirá, teóricamente, de 750 a 1.000 kg de carbonato para tratar cada tonelada de desecho.

Valores casi igualmente bajos de PNN aparecen en las colas de Santa Fe, Bolívar y Machacamarca. Estos varían entre -200 y -600 kg CaCO_3 , lo que indica que el DAR continuará durante largos periodos con concentraciones de metales bastante elevadas. Valores similares de PNN fueron generados por las muestras provenientes de Totoral y Avicaya (-50 a -100 kg de CaCO_3).

Los valores más altos de PNN, pese a ser negativos (-4 a -60), son los de las colas de Japo y Morococala. Los más bajos provienen de la base de las colas de Morococala y de la parte media de las de Japo. En ambos sitios los valores más elevados se encuentran en la superficie de los depósitos donde el déficit de los agentes neutralizantes es inferior al equivalente de 10 kg de CaCO_3 por tonelada de residuo.

Las pruebas estáticas no indican el comportamiento a través del tiempo. Por lo tanto, la clasificación final de los depósitos debería tener en cuenta los resultados de las pruebas cinéticas.

Tabla 4. Resultados de pruebas estáticas con muestras de colas. Potencial de Acidez (PA), Potencial Bruto de Neutralización (PN), y Potencial Neto de Neutralización (PNN) se expresan en kg de CaCO₃ por tonelada de cola.

Mina / Ingenio	Depósito de colas	Nº de Muestra (Profundidad m)	Azufre (%)	pH en Pasta	PA	PN	PNN
Japo		Ja-I (0-1)	0.51	2.65	16	7	-9
		Ja-I (1-3)	1.63	2.58	51	5	-46
		Ja-I (base)	0.83	2.92	26	7	-19
Morococala		Mo-I (0-1)	0.41	2.97	13	6	-7
		Mo-I (1-3)	0.45	2.80	14	10	-4
		Mo-I (3-5)	0.42	3.43	13	0	-13
		Mo-I (base)	1.94	1.94	61	2	-59
Santa Fe		SF-I (0-1)	19.28	2.80	602	4	-508
		SF-I (1-3)	18.29	3.20	572	11	-561
		SF-I (3-5)	20.33	3.45	635	7	-628
Huanuni:	Porvenir	H-7 (0-1)	0.75	3.01	23	0	-23
		H-8 (0-1)	1.70	2.68	53	0	-53
	Duncan	H-15 (0-1)	0.97	4.08	30	0	-30
		H-14 (0-1)	0.60	3.94	19	3	-16
Machacamarcá		Ma-II (0-1)	9.54	3.22	298	9	-289
		Ma-III (0-1)	0.8	2.42	25	13	-12
		Ma-III (1-3)	1.75	2.57	55	14	-41
		Ma-IV (0-1)	50.44	2.1	1576	11	-1565
		Ma-IV (1-3)	44.03	2.05	1376	1	-1375
Poopó		Po-I (0-1)	24.3	6.45	759	11	-748
		Po-I (1-3)	30.91	6.51	966	15	-951
Bolívar		BJK-I (0-1)					
		BJK-I (1-3)					
Totoral		To-I (0-1)	1.77	2.78	55	9	-46
		To-I (1-3)	3.78	2.92	118	41	-77
		To-I (3-5)	5.43	2.85	170	38	-132
		To-I (base)	2.66	2.66	35	0	-35
Avicaya		Av-I (0-1)		2.50			
		Av-I (1-3)		2.40			
		Av-I (3-5)		2.49			
		Av-I (base)		2.40			
San José/ Itos:	Itos # 9	SJ-52 (0-1)	15.8	2.3	494	0	-494
		SJ-53 (0-1)	20.6	1.5	644	1	-643
	Itos # 8	SJ-51 (0-1)	3.7	1.9	116	0	-116
	Itos # 10	SJ-60 (0-1)	3.7	2.4	116	0	-116
	Iroco	SJ-62 (0-1)	6.7	1.9	209	0	-209
	Frankeita	SJ-54 (0-1)	15.1	1.6	472	0	-472

4.2 Pruebas cinéticas

4.2.1 Información básica

Por razones prácticas y económicas se eligió la prueba en celdas húmedas como método experimental cinético a ser aplicado en todas las muestras. El desarrollo de todas las pruebas se describe en la sección 2.3.2. Los resultados registrados fueron los valores de pH, conductividad eléctrica, así como las concentraciones de sulfatos y metales en los licores sucesivamente recuperados en los ciclos de oxidación y lixiviación en la celda.

El desarrollo típico de la prueba incluye cuatro fases:

- Fase 1 Lixiviado (lavado) de la mayor parte del material movilizado por la oxidación y acumulado en la matriz, antes del muestreo.
- Fase 2 Constante, ritmo de lixiviación lento.
- Fase 3 La lixiviación aumenta lentamente y se hace notoria por la caída del pH y por las crecientes concentraciones de sales y metales.
- Fase 4 Condiciones de estado estacionario, cuando la lixiviación equilibra la formación de sustancias movilizadas por la oxidación.

La duración y el desarrollo de las cuatro fases puede variar dentro de límites amplios ya que dependen del estado de oxidación anterior a la prueba, de los ritmos de oxidación (capacidad) y de la lixivabilidad de las muestras. Debido al efecto de dilución de la lixiviación experimental, el nivel final de concentración nunca es tan alto como el del inicio. El ritmo de cambios de agua en la celda puede ser 500 veces más rápido que en el campo antes de que se tomara la muestra. (En la discusión siguiente nótese que se obtuvo 1 litro de licor en un período de 7 días, lo que corresponde a una semana de prueba)

En base a los resultados de las pruebas en la celda de humidificación, las muestras de colas se pueden dividir en cuatro categorías:

Categoría	Ya oxidadas:	Ritmo de oxidación	La oxidación comienza:	Figura de referencia:
1	Si	Moderado	Tarde	<i>Figura 6</i>
2	Si	Lento	Muy tarde	<i>Figura 7</i>
3	No	Rápido	Temprano	<i>Figura 8</i>
4	Si	Rápido	Bastante tarde	<i>Figura 9</i>

Categoría 1 (Figura 7)

El experimento en celdas húmedas, con residuos ya oxidados, arranca con la lixiviación (lavado) de los elementos y sales movilizadas a pH bajo. Al inicio de esta lixiviación, las

concentraciones son muy altas, pero pronto bajan a niveles moderados. Luego de aproximadamente 10 litros de agua (10 semanas), o de 40 veces más agua (en peso) que residuo (L/S = 40), el pH se nivela a un valor bastante alto y las concentraciones de sal y metales a valores bastante bajos. Obviamente, hasta ese momento, la oxidación en la celda no ha sido muy eficiente en la producción de materiales móviles. Sin embargo, después de 15-20 litros (15-20 semanas, L/S = 60-80) la oxidación es importante y se nivela entre los 20 y 25 litros (semanas). Considerando el efecto de disolución, los niveles de concentración son bastante elevados.

Categoría 2 (Figura 8)

En algunos casos, la oxidación pareció comenzar en la etapa inicial de lixiviación, lo que resulta en una lixiviación inicial prolongada. En otros casos, la oxidación fue bastante lenta y no alcanzó un estado constante durante el período de prueba de 15-25 semanas (o 15-25 litros de lixiviado), ver el ejemplo en la *Figura 8*. En estos casos el pH se nivela a un valor superior a 5 y los metales en valores más de 1.000 veces menores que los valores iniciales. Si las pruebas se hubieran realizado por más tiempo se hubiera podido observar una etapa de oxidación débil.

Categoría 3 (Figura 9)

Los experimentos con residuos no oxidados comienzan con valores de pH altos y concentraciones bajas, que ya después de 5-15 litros (5-15 semanas, L/S = 20-60), se transforman en pHs bajos y concentraciones altas. En el paso 2, la caída del pH se evidencia en la *Figura 9*. Después de 19 semanas el pH cae a 3 sin llegar al estado estacionario en la celda 10, mostrada en la figura. Las concentraciones de metales en este punto aumentan; por ejemplo, el cobre supera 1 mg/l, valor inusualmente alto considerando el efecto de dilución en la prueba. El único parámetro que muestra una fase inicial de lixiviación típica, seguida por una de oxidación, es la conductividad eléctrica. Una explicación es que el río que pasa por las colas lleva muchos cloruros y algunos sulfatos. Estas sales naturales incorporadas debieron ser lavadas antes que el nivel de conductividad pueda mostrar la movilización de sulfatos. En toda la prueba la conductividad fue bastante elevada, ésto sugiere que la oxidación ya habría tenido lugar desde el comienzo.

Categoría 4 (Figuras 10 y 11)

No hay dos muestras de colas que comiencen o terminen con los mismos niveles de oxidación/lixiviación. De hecho, los niveles pueden variar dentro de amplios límites. Unas pocas muestras presentan niveles altos, tanto al comienzo como al final del experimento, lo que revela potenciales de oxidación altos que ya han actuado in situ y actuarán durante muchos años, si no se toman medidas para contrarrestarlos (*Figura 10*). Existen también algunos residuos con lixiviación y oxidación moderados (*Figura 11*). Como éstos no contienen muchos sulfuros, pero tienen un pH bastante bajo, se cree que están completamente oxidados y casi totalmente lixiviados.

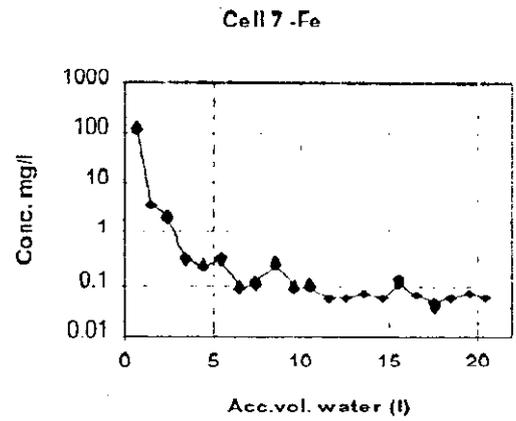
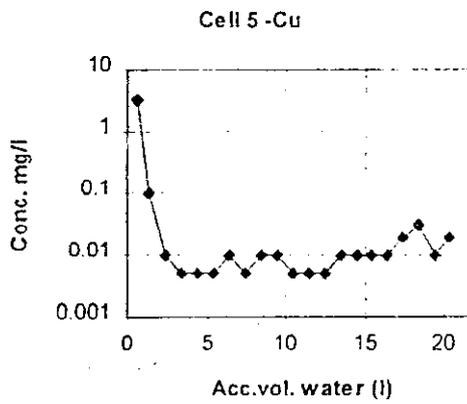
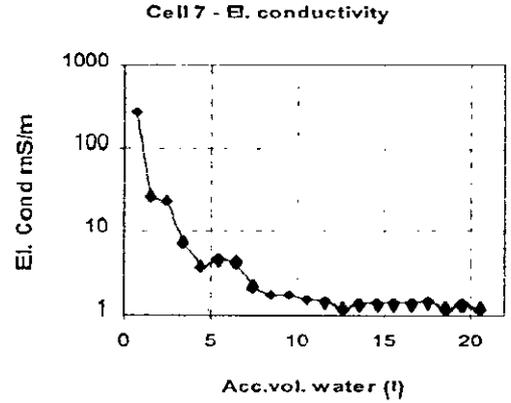
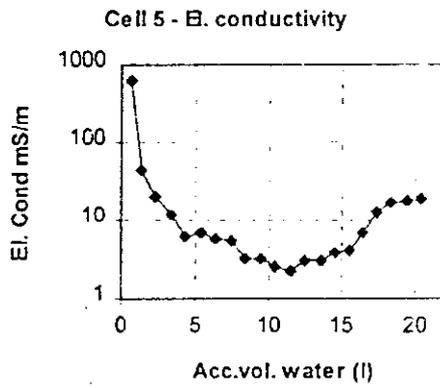
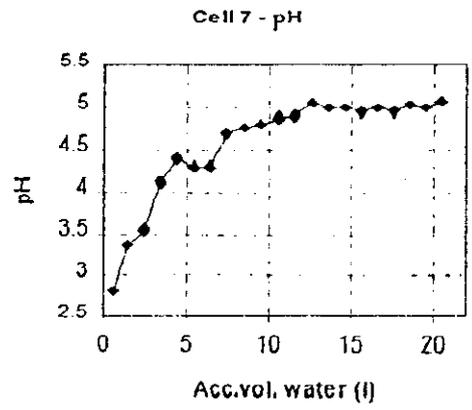
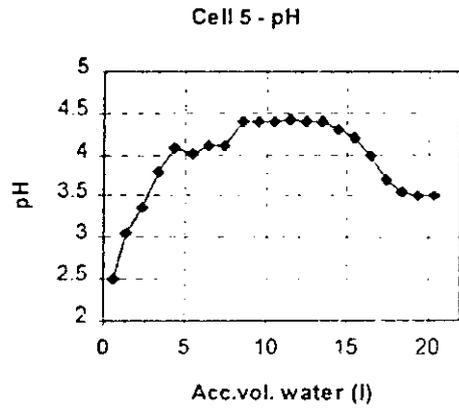


Figure 7. Categoría 1. Pruebas de celdas de humidificación en colas oxidadas de Morococala, que muestran una típica situación de lixiviación y oxidación.

Figura 8. Categoría 2. Ejemplo de una lixiviación inicial prolongada en una prueba de celda de humidificación en colas de Morococala

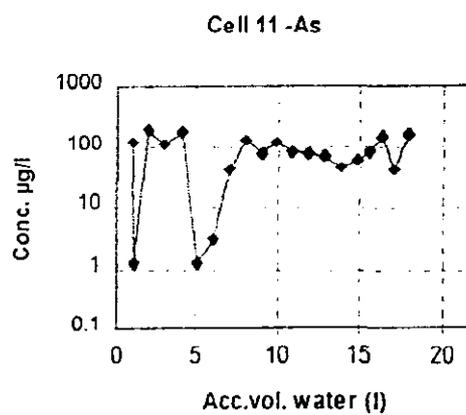
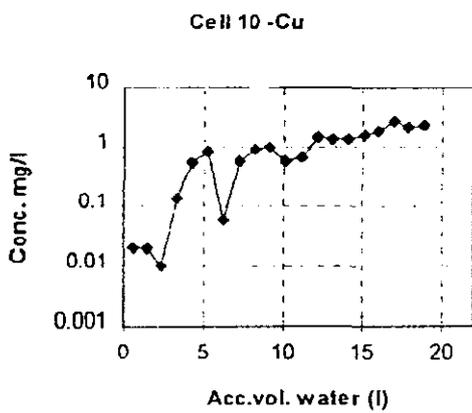
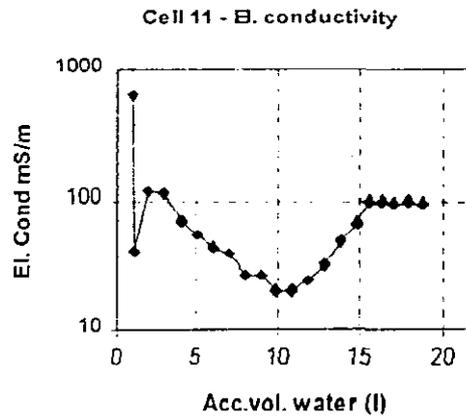
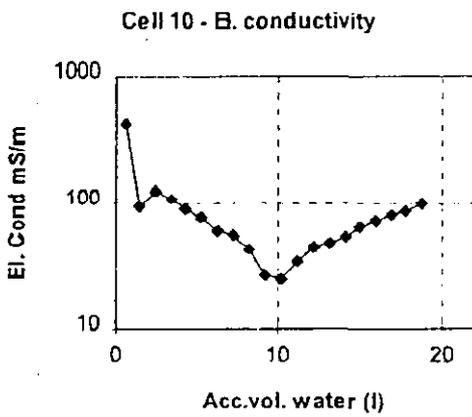
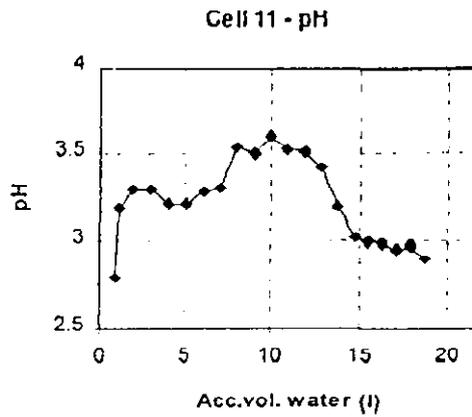
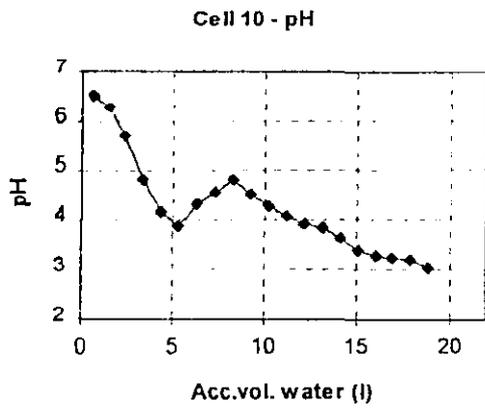


Figura 9. Categoría 3. Ejemplo de una prueba en celda húmeda con colas no oxidadas previamente (de Poopó)

Figura 10. Categoría 4. Ejemplo de una prueba en celda húmeda con colas con alto potencial de oxidación (Santa Fe)

4.2.2 Resultados de las pruebas cinéticas

Dentro de los cuatro tipos de material, como reflejaron los resultados de las pruebas, el comportamiento es constante. Algún tiempo después, el pH ha aumentado o ha decaído, las concentraciones de metal disminuyen o aumentan, respectivamente. Sin embargo, las concentraciones de plomo y arsénico, cuando existen por encima de 1 mg/L y 0,1 mg/l, respectivamente, pueden aumentar o disminuir independientemente los niveles de pH. A niveles más bajos, las concentraciones de plomo y arsénico varían constantemente, dependiendo de la cercanía al límite de detección o de un ciclo repetitivo de precipitaciones de sales y de disolución que fue registrado durante las pruebas (o ambos).

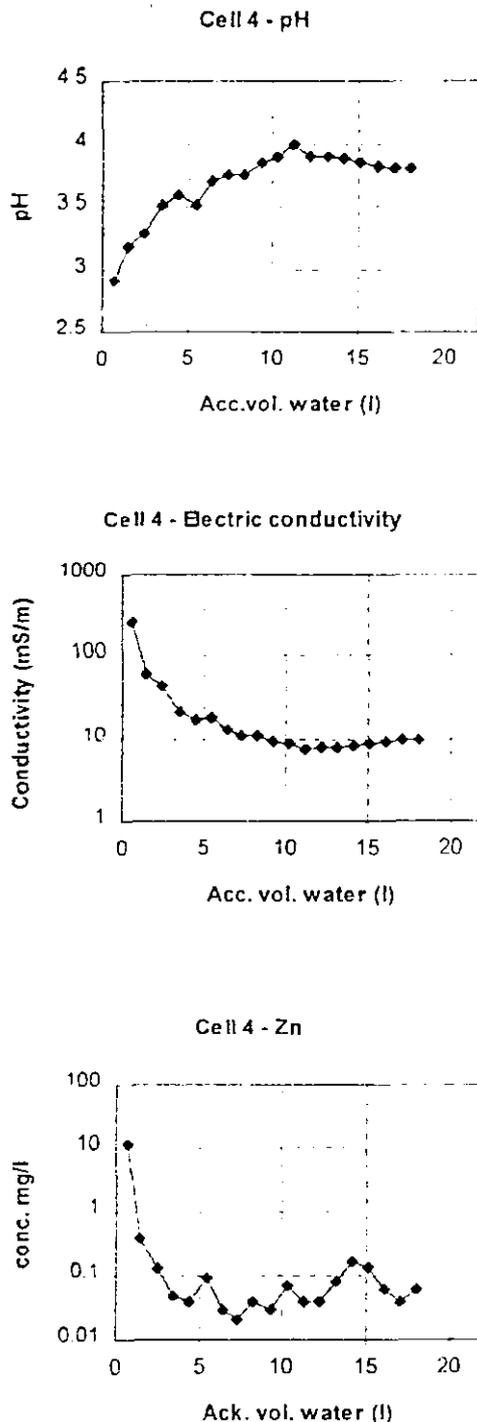


Figura 11. Categoría 4. Ejemplo de una prueba en celda húmeda con colas ya oxidadas y lixiviadas (de Japo)

4.2.3 Comparación de una infiltración natural con el licor de una prueba en celda húmeda.

Una de las raras infiltraciones naturales permanentes derivada de los depósitos de colas se produce al pie del extremo oeste del depósito de colas arenas Porvenir en Huanuni, el más grande en el área del proyecto, con 2.360.000 toneladas. La infiltración de DAR fue muestreada durante un período que va desde marzo hasta julio de 1994 (Huanuni, "Punto de observación X") El principal periodo de lluvia del año no fue monitoreado, por lo que los resultados son solamente representativos para el periodo seco del año.

Durante el monitoreo, los valores de pH, conductividad y concentración promedio de iones seleccionados en la infiltración de DAR de Porvenir fueron:

pH	onduct. : $\mu\text{S}/\text{cm}$	SO_4 mg/l	Fe mg/l	Zn mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l
3,78	2 700	1684	49,4	16,6	184	149

El transporte cuantitativo de iones, obtenido al multiplicar las concentraciones por el flujo de infiltración, fue:

	SO_4 (kg/semana)	Fe (kg/semana)	Zn (kg/semana)	Ca (kg/semana)	Mg (kg/semana)
Transporte	420	16,8	4,2	147,6	37,1

Se estima que el volumen del depósito de colas que drena a través del "Punto de observación X", representa cerca de la mitad del tonelaje total del depósito. Como son probables algunas pérdidas por infiltración al acuífero subyacente, el tonelaje correspondiente a este drenaje es casi un millón de toneladas. Un recálculo en proporción al tonelaje del depósito da los siguientes valores para el flujo contaminante:

	SO_4 (mg/semana)	Fe (mg/semana)	Zn (mg/semana)	Ca (mg/semana)	Mg (mg/semana)
Flujo contaminante	042	0,017	0,004	0,148	0,037

Estos valores, comparados con los resultados de la prueba en celda húmeda, indican una relación entre los ritmos de oxidación alcanzados en la celda y en el terreno.

El ritmo de lixiviación en la celda húmeda, mg/sem; muestra intemperizada H-104, fue:

Prueba	SO_4 (mg/semana)	Fe (mg/semana)	Zn (mg/semana)	Ca (mg/semana)	Mg (mg/semana)
HC Test, semana 1-3	4.5	38	9.5	0.3	7.8
HC Test, semana 4-12	0.79	3.9	0.12	0.03	0.02

El ritmo de lixiviación alcanzado en la celda húmeda mg/sem, muestra fresca (celda 5) fue:

Prueba	SO_4 (mg/semana)	Fe (mg/semana)	Zn (mg/semana)	Ca (mg/semana)	Mg (mg/semana)
HC Test, semana 1- 3	0.64	2.6	2.3	0.015	0.04
HC Test, semana 4 - 15	0.17	0.34	0.45	0.02	0.03

Las comparación ubica a las observaciones de campo correctamente en el rango de resultados de las pruebas, particularmente cuando se usa sulfato como trazador. Debido a mecanismos de precipitación, el hierro y en alguna medida el zinc son menos confiables. Los ritmos de liberación del licor, inicialmente alcanzados durante las pruebas, son, por lo general, más rápidos que en campo. Los ritmos se hacen más lentos hacia el final de la prueba.

4.2.3 Variación con la profundidad

La mayoría de los depósitos de colas investigados han sido muestreados a distintas profundidades para determinar el estado de oxidación y lixiviación y si el carácter del residuo varía con la profundidad. Según los diagramas radiales del Apéndice 1 (que muestran concentraciones de elementos durante la lixiviación inicial y oxidada, para dos o tres profundidades de la mayoría de los depósitos), es obvio que la oxidación y la lixiviación han sido más efectivas en la superficie y los productos movilizados han sido acumulados en niveles más profundos de los depósitos. Esto es natural y muestra que los depósitos son suficientemente permeables para permitir la total percolación de la precipitación neta, aproximadamente 50 mm/año. Esta percolación se verifica en que la infiltración al pie de la pendiente de los diques o de las pilas es muy rara. De hecho, la base del depósito debe ser bastante impermeable para obstaculizar la continua percolación descendente. Sólo los suelos homogéneamente arcillosos tienen tan baja permeabilidad.

En algunos casos, la parte inferior del depósito muestra bajos niveles de sales y metales mientras que partes superiores contienen niveles más altos. Esto puede explicarse por un fondo permeable, que puede consistir en productos residuales más gruesos, o por un basamento permeable.

4.2.4 Discusión

El objetivo final de las pruebas en celdas húmedas es clasificar las unidades de residuos según la necesidad de medidas mitigación. Dichas medidas son costosas, siendo necesaria la concentración de trabajo en los residuos donde las medidas tendrán efecto óptimo, tanto a corto como a largo plazo.

Por tanto, la evaluación debe considerar las propiedades de oxidación y los ritmos de lixiviación a corto y largo plazo:

- El valor del pH al final de la prueba, cuando ha alcanzado un valor estacionario, y la diferencia entre este valor y el pH máximo previo, son buenas medidas del *potencial de oxidación*. Sin embargo, deben complementarse con las concentraciones de sales y metales correspondientes. Otro buen parámetro para el potencial de oxidación es la cantidad de tiempo transcurrido desde el final de la etapa inicial de lixiviación hasta la nivelación en el estado de oxidación.
- Las propiedades de una lixiviación a corto plazo están indicadas por el valor del pH y las concentraciones de metales y sulfato en las primeras descargas de las celdas húmedas.
- El ritmo de lixiviación a largo plazo es indicado por las concentraciones finales de sales y metales junto con las fracciones totalmente lixiviables, es decir, los porcentajes de la cantidad total de un elemento específico que es lixiviado durante la prueba.

CATEGORIZACIÓN DE DEPÓSITOS

1 Generalidades

Las propiedades individuales de las unidades de residuos no deberían ser el único conjunto de parámetros para determinar la necesidad de medidas de mitigación. También deberían considerarse el tamaño y la cantidad total lixiviable de los depósitos. Por ello, la evaluación incluyó 4 categorizaciones diferentes:

Una categorización multiparamétrica, donde han sido incorporados todos los factores derivados de la interpretación de resultados de las pruebas en celdas húmedas. A los parámetros con un límite alto se les asignó un factor ponderal 2 y aquellos que no alcanzan un límite bajo, un factor ponderal cero. Los parámetros que están entre los límites se han multiplicado por el factor 1 (Sección 5.2)

Una categorización relacionada a la superficie, considerando la descarga anual de contaminantes de cada depósito (Sección 5.3)

Una categorización relacionada con la potencia de la fuente, que muestra la cantidad inicial, totalmente lixiviable de metales y sales (lixiviación a corto plazo) (Sección 5.4).

Una clasificación relacionada con la potencia, que muestra la fracción totalmente lixiviable de metales y sales (lixiviación a largo plazo si la oxidación no es obstaculizada).(Sección 5.4).

La *Tabla 5* muestra la compilación de las cuatro categorizaciones basadas en los resultados de las pruebas de celdas húmedas, e incluye una categorización final basada en las sumas de las cuatro categorizaciones, determinada por la suma de los valores obtenidos. El número 1 indica la mayor necesidad de mitigación.

Tabla 5. Evaluación de las pruebas en celdas húmedas -Categorización compuesta de todas las listas de categorización. El número 1 indica la mayor necesidad de mitigación.

Depósito de residuos	Categ. multiparamétrica (Tabla 6)	Categ. según la superficie (Tabla 7)	Categ. por potencia de Fuente corto/plazo (Tabla 8)	Categ. por potencia de Fuente largo/plazo (Tabla 9)	Suma de puntos de las categorizaciones	Categorización compuesta
Chocoma	8	8	8	7	31	8
Proccocala	9	9	9	6	33	9
Opó	6	2	1	1	10	1
Sta Fe	1	5	4	5	15	4
Lívar	2	4	2	4	12	3
Chacamarca	5	3	6	3	17	5
Ural	4	1	5	2	12	2
Ucayali	3	6	3	8	20	6
Sanuni-Porvenir	7	7	7	9	30	7

5.2 Categorización multiparamétrica

La *Tabla 6* presenta una categorización basada en un gran número de parámetros derivados de los resultados del test en celdas húmedas. Para la lixiviación inicial los parámetros fueron: pH inicial; pH máximo; conductividad eléctrica; concentraciones iniciales y la lixiviación inicial total de cadmio, cobre, zinc y arsénico. Para la lixiviación oxidada constante, los parámetros fueron: carácter final de la lixiviación; pH final; delta pH; conductividad eléctrica final y concentraciones finales de cadmio, cobre, zinc y plomo. A cada parámetro se le dio un puntaje del 0 al 2 para cada una de las muestras estudiadas, y los puntajes totales de un área fueron promediados para llegar a la categorización.

Cuadro 6. Evaluación de las pruebas celdas húmedas- categorización multiparamétrica. El número 1 indica la mayor necesidad de mitigación.

Número de Muestra	Lixiviación inicial	Potencial de oxidación	Total points	Promedio puntaje	Clasificación.
Ja-1:1	7	8	15	68/4 = 17	11 (8)
Ja-1:2	11	10	21		
Ja-1:3	11	9	20		
Ja-1:B	8	4	12		
Mo-1:1	4	5	9	37/4 = 9.25	12 (9)
Mo-1:2	4	2	6		
Mo-1:3	5	4	9		
Mo-1:B	8	5	13		
Po-1:1	9	12	21	51/2 = 25.5	7 (6)
Po-1:2	9	21	30		
SF-1:1	18	19	37	105/3 = 35	1
SF-1:2	15	22	37		
SF-1:3	14	17	31		
Bjk-1:1	15	21	36	66/2 = 33	2
Bjk-1:2	10	20	30		
Ma-III:1	9	10	19	43/2 = 21.5	9 (5)
Ma-III:2	11	13	24		
Ma-IV:1	9	10	19	46/2 = 23	8 (5)
Ma-IV:2	13	14	27		
To-1:1	11	12	23	80/3 = 26.7	6 (4)
To-1:2	12	15	27		
To-1:3	13	17	30		
Ma-II:1	11	19	30	30	3 (5)
Av-1:1	16	11	27	113/4 = 28.25	5 (3)
Av-1:2	15	15	30		
Av-1:3	15	13	28		
Av-1:B	16	12	28		
Ma-1:1	15	11	26	88/3 = 29.3	4 (5)
Ma-1:1a	17	13	30		
Ma-1:1b	18	14	32		
H-104	8	13	21	21	10 (7)

(Los paréntesis dan la categorización considerando a Machacamarca como un depósito.)

5.3 Categorización según la superficie

La descarga potencial total de contaminantes no sólo depende de sus concentraciones, sino también del ritmo de flujo de la descarga, que a su vez depende del tamaño del área expuesta a la infiltración. La *Tabla 7* muestra la producción calculada de licor en los depósitos de colas, el transporte de cuatro metales, expresado como porcentaje del total en el área, y un cálculo de las concentraciones a largo plazo en los tests de celdas húmedas. Nótese que la concentración total no corresponde al transporte real, que debería ser más alto debido a la dilución de los contaminantes en las celdas.

Tabla 7. Categorización según la superficie, evaluación de los tests de celdas húmedas, basada en una infiltración efectiva de 60 l/m² y en la lixiviación anual y a largo plazo. El transporte total fue corregido por factores ponderados. El número 1 indica la mayor necesidad de mitigación.

Depósito de residuos	Area expuesta (m ²)	Flujo de lixiviado (m ³ /a)	Transp. de Cu % del total	Transp. de Zn % del total	Transp. de Cd % del total	Transp. de Pb % del total	Transp. total (ton)	Categorización
Japo	7 750	465	0.46	0.14	0.65	0.02	67.6	8
Morococala	8 500	510	0.01	0.01	0.06	4.4	50.4	9
Poopó	65 386	3 923	0.02	19.4	25.1	35.2	2877.0	2
Santa Fe	9 000	540	0.85	16.9	7.4	13.2	896.5	5
Bolívar	12 900	774	0.07	23.2	9.6	10.6	1134.5	4
Machacamarca	288 460	17 308	17.1	12.9	15.0	15.0	1923.3	3
Totoral	214 400	12 864	59.7	19.3	33.8	0.9	4127.8	1
Avicaya	15 933	956	14.1	5.38	6.3	1.8	820.5	6
Huanuni-Porvenir	108 500	6 510	7.77	2.73	2.1	18.9	481.5	7
Total (%)			100	100	100	100		
Factores de corrección ambiental: (como se aplicó en el transporte total)			10	1	100	10		

5.4 Categorización según la masa del depósito, a corto y largo plazo

A fin de tomar en cuenta la masa de las colas que descarga o descargará DAR, el resultado del test en celdas húmedas debe estar relacionado con el tonelaje total de las colas. Esto se indica en la *Tabla 8* (lixiviación inicial o a corto plazo) y la *Tabla 9* (lixiviación continua/oxidada o a largo plazo). En las tablas, "baja" representa el más bajo de los valores y "alta" el más alto de éstos, cuando se llevaron a cabo varios tests de celdas húmedas.

Tabla 8. Evaluación de los tests de celdas húmedas según la masa del depósito - lixiviación potencial total e inicial. "Baja" representa los valores más bajos y "alta" los más altos cuando se llevaron a cabo varias pruebas. El número 1 indica la mayor necesidad de mitigación.

Depósito de residuos	Volumen residuos (m ³)	Específica baja (g/m ³)	Específica alta (g/m ³)	Total baja (ton)	Total alta (ton)	Total promedio (ton)	Categorización
Japo	387 500	25.3	203.6	9.80	78.90	44.4	8
Morococala	72 250	4.6	64.6	0.332	4.667	2.50	9
Poopó	326 930	3104.3	3659.1	1015	1196	1106	1
Santa Fe	42 300	4506.2	5436.4	190.6	230.0	210.3	4
Bolívar	25 800	4093.6	14328	105.6	370.0	237.5	2
Machacamarcá	491 884	62.0	293.4	30.50	144.3	87.4	6
Totoral	235 840	166.7	590.5	39.3	139.3	89.3	5
Avicaya	163 480	1117.3	1703.9	182.7	278.6	230.6	3
Huanuni-Porvenir	1300 000	40.9	40.9	53.2	53.2	53.2	7

Tabla 9. Evaluación de los tests de celdas húmedas según la masa del depósito - movilización potencial total por oxidación. "Baja" representa los valores más bajos y "alta" los más altos, cuando se llevaron a cabo varias pruebas. El número 1 indica la mayor necesidad de mitigación.

Depósito de residuos	Volumen residuos (m ³)	Específica baja (g/m ³)	Específica alta (g/m ³)	Total baja (ton)	Total alta (ton)	Total promedio (ton)	Categorización
Japo	387 500	7.2	23.0	2.79	8.91	5.9	7
Morococala	72 250	2.2	89.3	0.159	6.45	6.6	6
Poopó	326 930	2052.9	2810.3	671.2	918.8	795	1
Santa Fe	42 300	300.9	592.4	12.73	25.06	18.9	5
Bolívar	25 800	814.1	1880.0	21.0	48.50	34.8	4
Machacamarcá	491 884	3.9	154.7	1.92	76.09	39	3
Totoral	235 840	7.0	639.1	1.65	150.7	76.2	2
Avicaya	163 480	16.3	35.6	2.67	5.82	4.2	8
Huanuni-Porvenir	1 300 000	3.2	3.2	4.16	4.16	4.2	9

5.5 Pruebas estáticas versus pruebas en celdas húmedas

La evaluación cinética en celdas húmedas lleva mucho tiempo. Por tanto, es interesante ver cómo sería la categorización sólo con las pruebas estáticas. Esto se muestra en la Tabla 10, que contiene la categorización más importante basada en tests de celdas húmedas (Tabla 5) y la categorización basada en el potencial neto de neutralización (PNN), tomando en cuenta el valor del pH en pasta.

Tabla 10. Comparación de categorizaciones basadas en las pruebas estáticas y cinéticas llevadas a cabo en las muestras de colas.

Sitio/depósito de residuo	Categor. por pruebas estáticas	Categor. por pruebas cinéticas	Evaluaciones y observaciones
Japo	8	8	
Morococala	9	9	
Poopó	1	1	
Santa Fe	3	4	
Bolívar	4	3	
Machacamarca	2	5	Grandes variaciones entre unidades
Totoral	6	2	Lixiviación a l/plazo es alta
Avicaya	5	6	
Huanuni-Porvenir	7	7	

La Tabla 10 muestra que las pruebas estáticas dan un panorama bastante bueno de la situación de DAR. Sin embargo, se puede llegar a juicios erróneos. Por ejemplo, las colas de Machacamarca recibieron en la evaluación cinética una prioridad menor a la prevista en la evaluación estática. Resulta obvio que deben medirse tanto el pH en pasta como el PNN. Es la interpretación conjunta de ambos tipos de pruebas que permite obtener buenos resultados.

6. CONCLUSIONES

Las categorizaciones mencionadas se basan exclusivamente en los resultados de varias pruebas y parámetros físicos del residuo. La posición geográfica y el impacto sobre los ecosistemas humanos y naturales no han sido tomados en cuenta. En el informe final se intentará una categorización amplia de los depósitos de residuos que incorpore aquellos factores.

La clasificación multiparamétrica (método 1, Tabla 6) define los depósitos de colas de Santa Fe como la fuente de contaminación más significativa en esta categoría de residuos minerales, Bolívar es la segunda y Poopó se ubica sólo sexta; pero las dos categorizaciones por la potencia de la fuente a corto y largo plazo (método 3 y 4, Tablas 8 y 9), ubican a Poopó en la cima. Estos tres depósitos, Santa Fe, Bolívar y Poopó son, de lejos, las unidades con mayor producción de DAR aquí estudiadas. También están clasificadas entre las cuatro primeras de la categorización compuesta (Tabla 5). Las colas de Poopó son las más importantes a largo plazo, ya que están muy poco oxidadas y probablemente las medidas destinadas a cortar el transporte de oxígeno tendrán un buen resultado. Las colas de Santa Fe son las menos importantes de las tres primeras para remediar a largo plazo. Considerando sólo la lixiviación a corto plazo, el depósito de Bolívar es el más importante y Santa Fe el segundo.

Clasificados como de menor importancia según la categorización multiparamétrica, los depósitos de Avicaya, Totoral y algunos de los depósitos en Machacamarea y Huanuni sólo han producido un 10-20% de descarga de DAR por unidad en comparación con los tres depósitos tope.

Considerando la descarga potencial total de DAR relacionada con el área superficial de los depósitos (método 2, *Tabla 7*) Totoral, Poopó y algunos de los depósitos de Machacamarea deberían recibir prioridad. En relación tanto al potencial de DAR como a la descarga potencial total del DAR (todos los métodos), a los depósitos de Japo, Morococala y algunos depósitos en Machacamarea y Huanuni se les debería asignar prioridad menor, al representar sólo un pequeño porcentaje del total de lixiviable de todos los depósitos del área. Obviamente han sido completamente oxidados y casi enteramente lixiviados.

La estrategia, al investigar la situación de DAR en un área minera desconocida con depósitos de colas, debería ser usar las pruebas estáticas como un medio para obtener un panorama de las variaciones de la formación potencial de DAR. De estas pruebas, sólo unas pocas pueden ser seleccionadas para la verificación y la especificación del potencial de DAR por medio de las pruebas cinéticas.

Apéndices

- Apéndice 1 Diagramas radiales que muestran las concentraciones de metales en licores de las pruebas de celdas húmedas, lixiviación inicial y oxidada a diferentes profundidades; escalas logarítmicas
- Apéndice 2 Fotografías de depósitos de colas, área del P.P.O.

Apéndice I

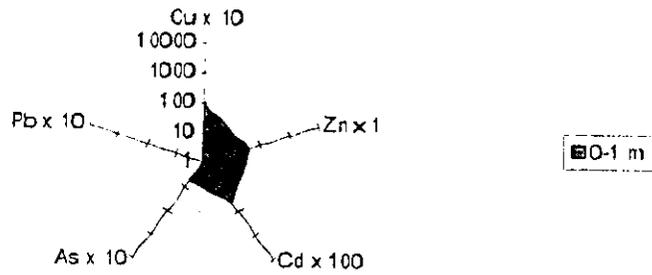
Diagramas radiales que muestran las concentraciones de metales en licores de las pruebas de celdas húmedas, lixiviación inicial y oxidada a diferentes profundidades; escalas logarítmicas

Japo

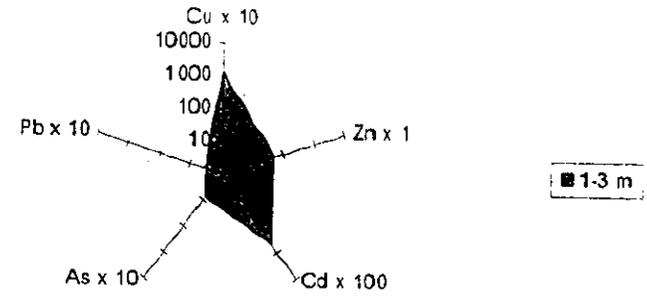
Muestra	Cu inic. mg/250 g	Cu inic. g/ton	Cu oxid. g/ton	Zn inic. g/ton	Zn oxid. g/ton	Pb inic. mg/250 g	Pb inic. g/ton	Pb oxid. mg/250 g	Pb oxid. g/ton	Cd inic. mg/250 g	Cd inic. g/ton	Cd oxid. mg/250 g	Cd oxid. g/ton	As inic. mg/250 g	As inic. g/ton	As oxid. mg/250 g	As oxid. g/ton
		Cu	Cu	Zn	Zn		Pb		Pb		Cd		Cd		As		As
Ja-1 (0-1)	2.29	9.16	9.24	35.2	0.6	0.03	0.12	0.35	1.4	0.12	0.48	0.13	0.52	0.15	0.6	0.31	1.24
Ja-1(1-3)	31.6	126.4	2.56	53.6	33.2	0.08	0.32	0.82	3.28	1.1	4.4	0.4	1.6	0.19	0.76	0.17	0.68
Ja-1 (3-5)	42.2	168.8	5.6	180.8	6.48	0.9	3.6	0.2	0.8	3.05	12.2	0.09	0.36	0.26	1.04	0.09	0.36
Ja-1 (base)	2.08	8.32	4.48	49.76	30.24	0.096	0.384	0.704	2.816	0.64	2.56	0.01	0.04	0.26	1.04	0.04	0.16
Japo-initial		0-1 m	1-3 m	3-5 m	base		Japo-oxidado	0-1 m	1-3 m	3-5 m	base						
	Cu x 10	91.6	1264	1688	83.2		Cu x 10	92.4	25.6	56	44.8						
	Zn x 1	35.2	53.6	180.8	49.76		Zn x 1	0.6	33.2	6.48	30.24						
	Cd x 100	48	440	1220	256		Cd x 100	52	160	36	4						
	As x 10	6	7.6	1.4	10.4		As x 10	12.4	6.8	3.6	1.6						
	Pb x 10	1.2	3.2	36	3.84		Pb x 10	14	32.8	8	28.16						

Japo, diag. radiales, Inicial

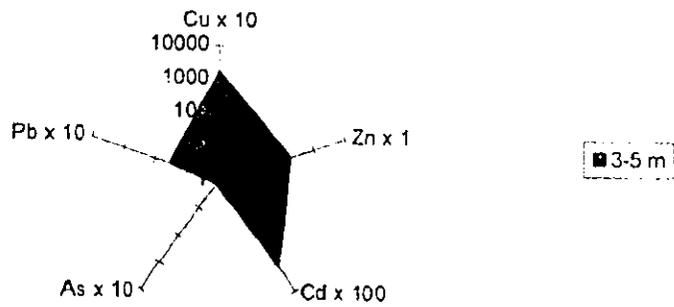
Japo - lixiviación inicial (g/ton)



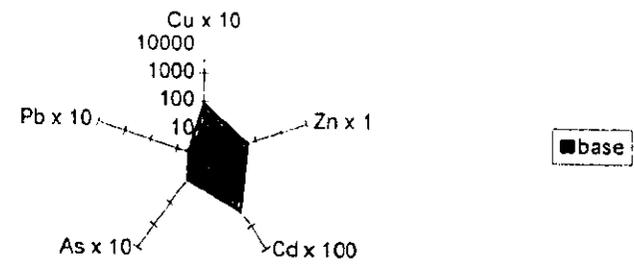
Japo - lixiviación inicial (g/ton)



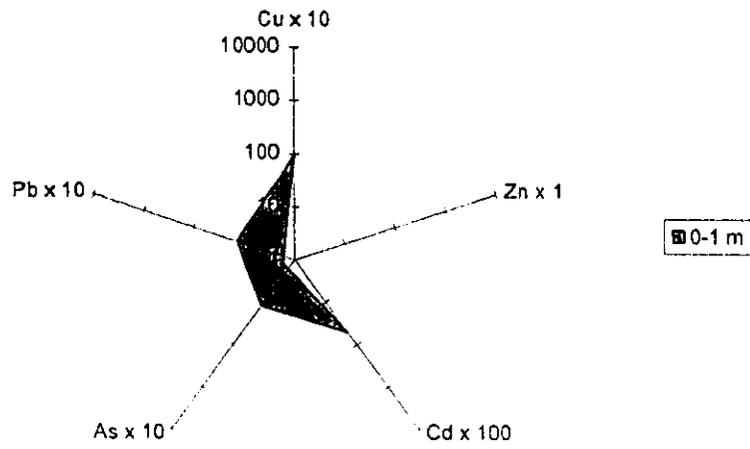
Japo - lixiviación inicial (g/ton)



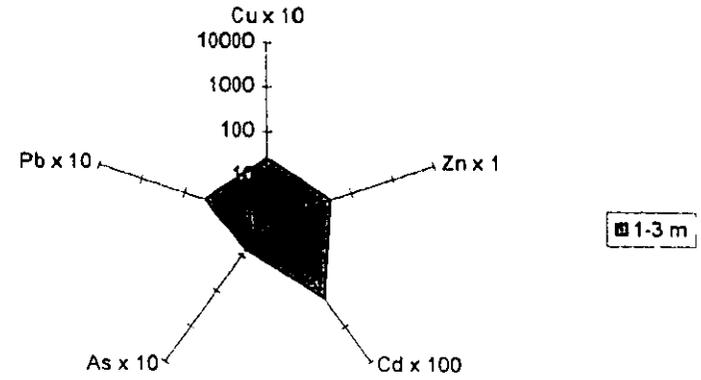
Japo - lixiviación inicial (g/ton)



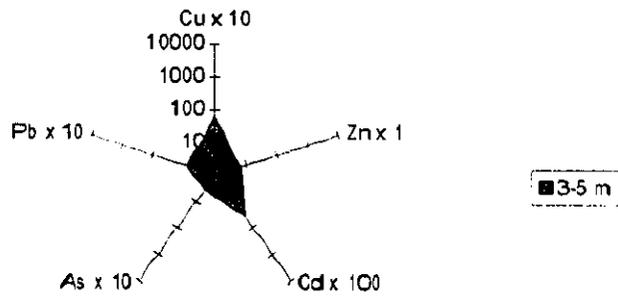
Japo - lixiviación oxidada (g/ton)



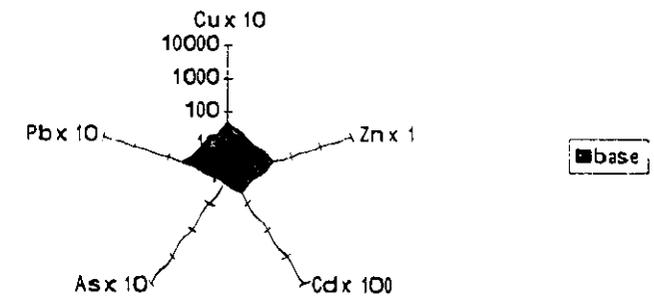
Japo - lixiviación oxidada (g/ton)



Japo - lixiviación oxidada (g/ton)

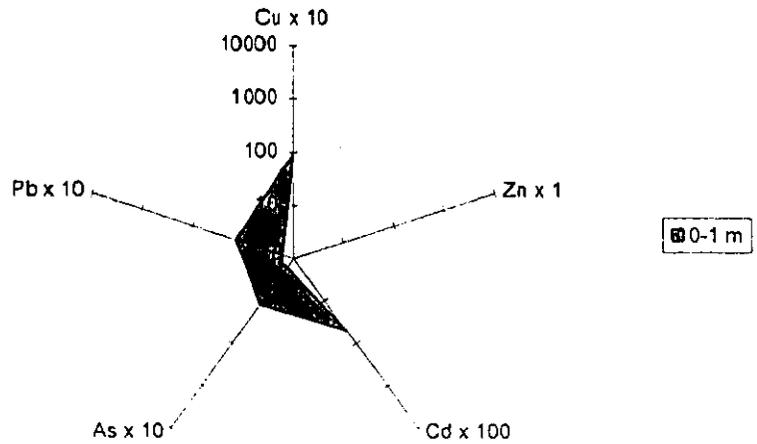


Japo - lixiviación oxidada (g/ton)

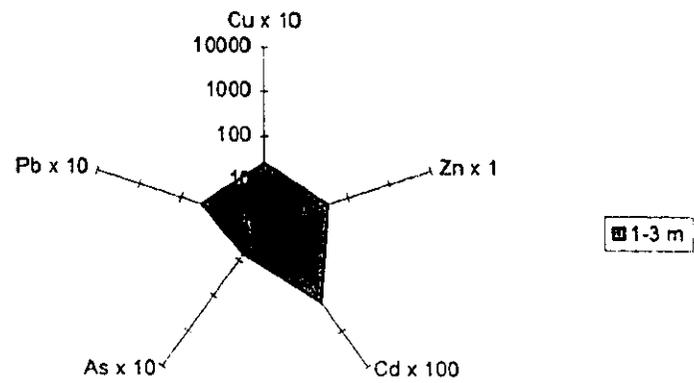


Muestra	Cu inic.	Cu inic.	Cu oxid.	Zn inic.	Zn oxid.	Pb inic.	Pb inic.	Pb oxid.	Pb oxid.	Cd inic.	Cd inic.	Cd oxid.	Cd oxid.	As inic.	As inic.	As oxid.	As oxid.
	mg/250 g	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	mg/250 g	g/ton	mg/250 g	g/ton	mg/250 g	g/ton	mg/250 g	g/ton	mg/250 g	g/ton	mg/250 g	g/ton
	Cu	Cu	Cu	Zn	Zn		Pb		Pb		Cd		Cd		As		As
o-1 (0-1)	0.22	0.88	0.24	3.92	2.6	0.7	2.8	0.199	0.796	0.08	0.32	0.03	0.12	0.08	0.32	0.1	0.4
o-1 (1-3)	0.24	0.96	0.08	8.4	2.16	1.21	4.84	0.3	1.2	0.09	0.36	0.02	0.08	0.03	0.12	0.37	1.48
o-1 (3-5)	0.16	0.64	0.28	7.76	2.2	1.15	4.6	0.27	1.08	0.1	0.4	0.03	0.12	0.2	0.8	0.06	0.24
o-1 (base)	2.31	9.24	6.76	98.96	59.76	1.43	5.72	23.31	93.24	0.255	1.02	0.124	0.496	0.34	1.36	0.13	0.52
Morococala	inicial	0-1 m	1-3 m	3-5 m	base	Morococ	oxidado	0-1 m	1-3 m	3-5 m	base						
	Cu x 10	8.8	9.6	6.4	92.4		Cu x 10	2.4	0.8	2.8	67.6						
	Zn x 1	3.92	8.4	7.76	98.96		Zn x 1	2.6	2.16	2.2	59.76						
	Cd x 100	32	36	40	102		Cd x 100	12	8	12	49.6						
	As x 10	3.2	1.2	8	13.6		As x 10	4	14.8	2.4	5.2						
	Pb x 10	28	48.4	46	57.2		Pb x 10	7.96	12	10.8	932.4						

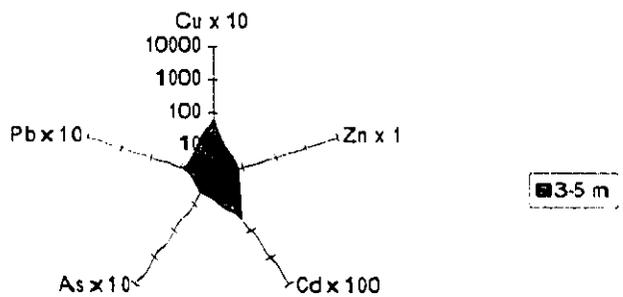
Japo - lixiviación oxidada (g/ton)



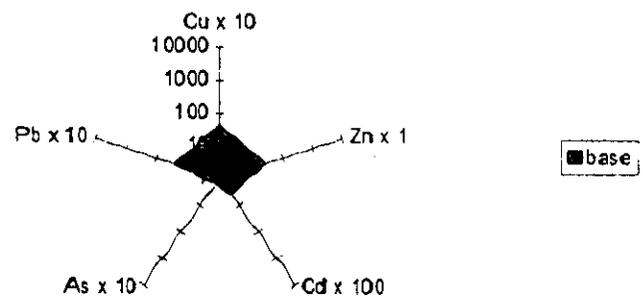
Japo - lixiviación oxidada (g/ton)



Japo - lixiviación oxidada (g/ton)

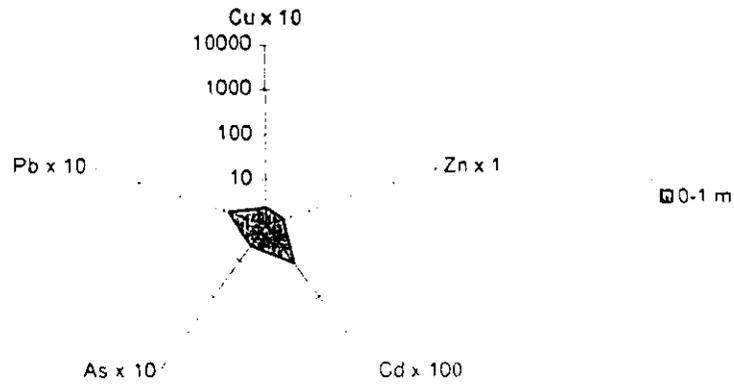


Japo - lixiviación oxidada (g/ton)

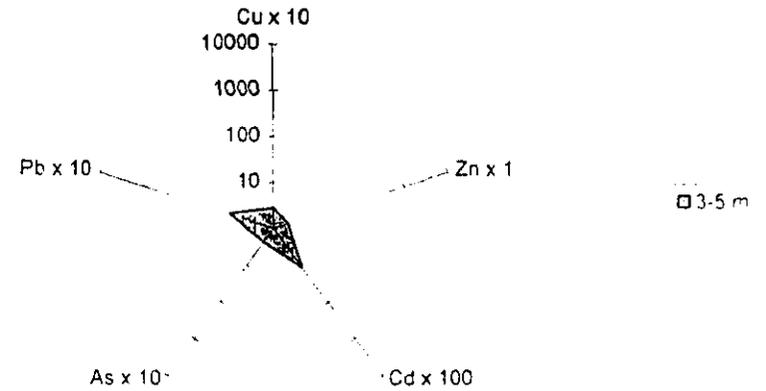


Morococala, diag., oxid.

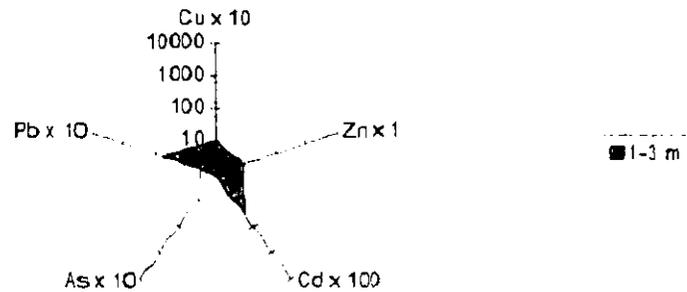
Morococala - lixiviación oxidada (g/ton)



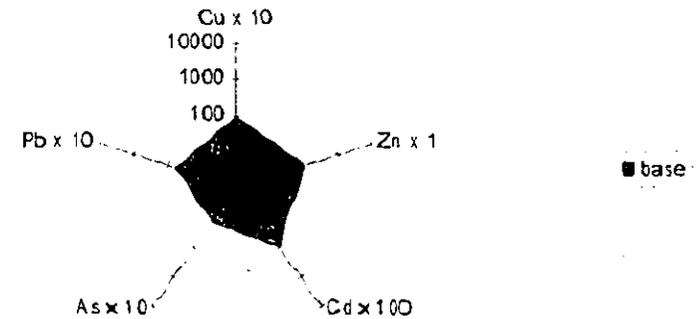
Morococala - olixiviación oxidada (g/ton)



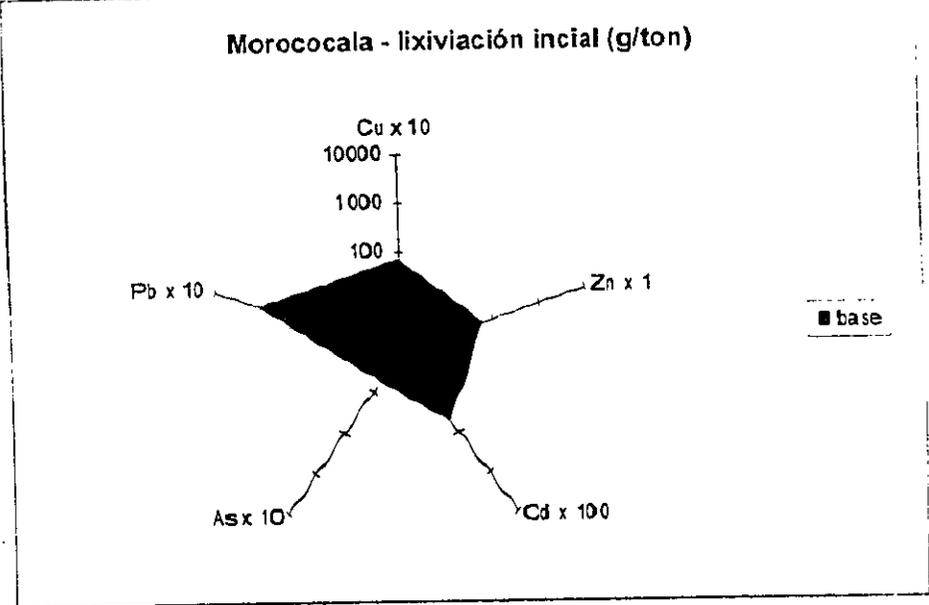
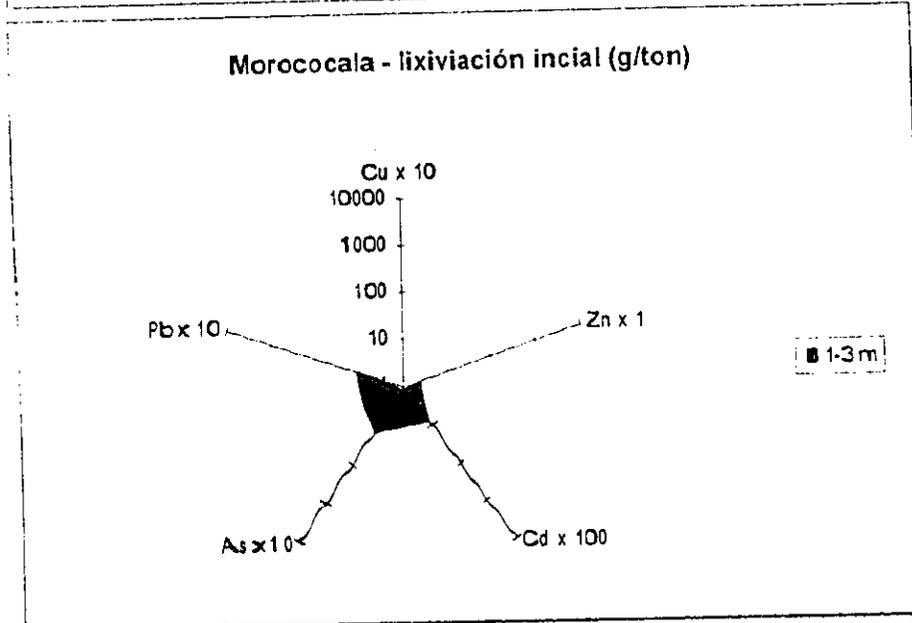
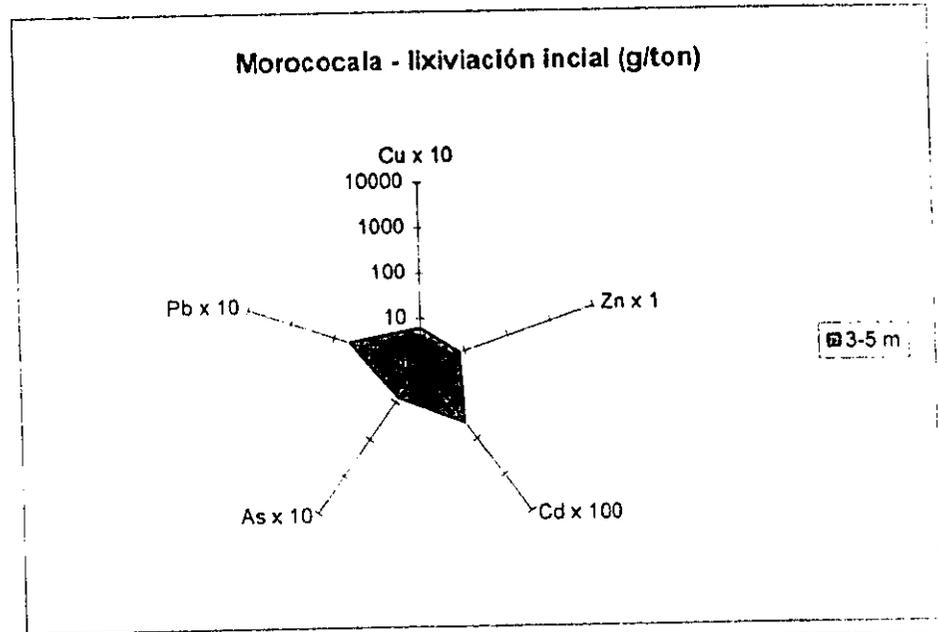
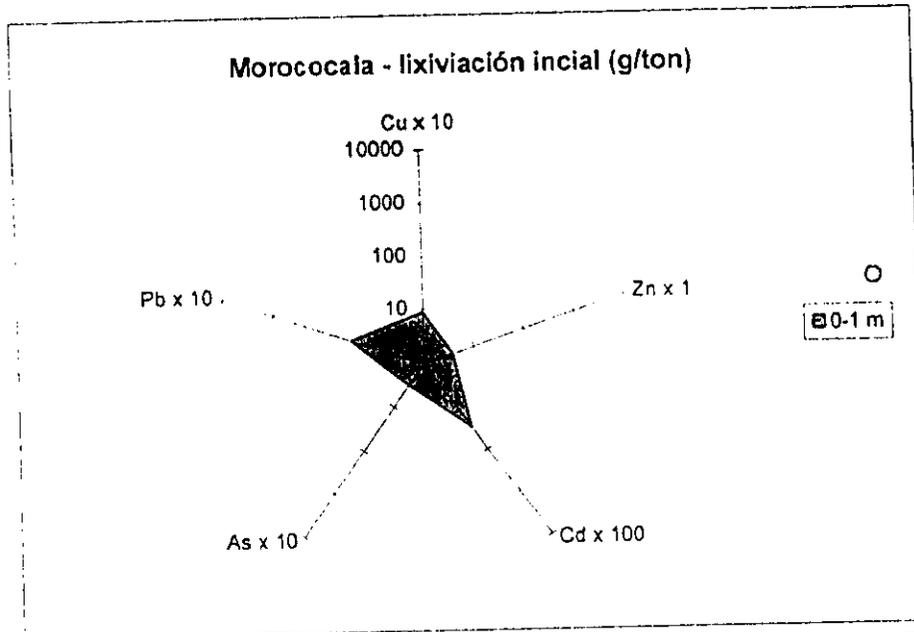
Morococala - lixiviación oxidada (g/ton)



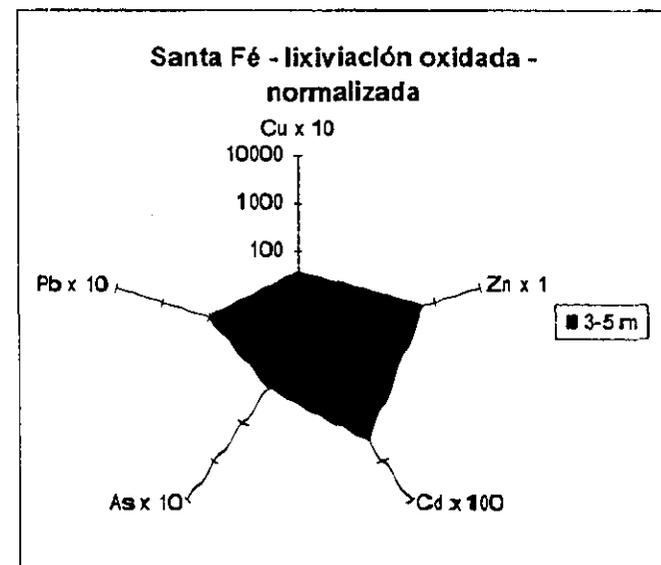
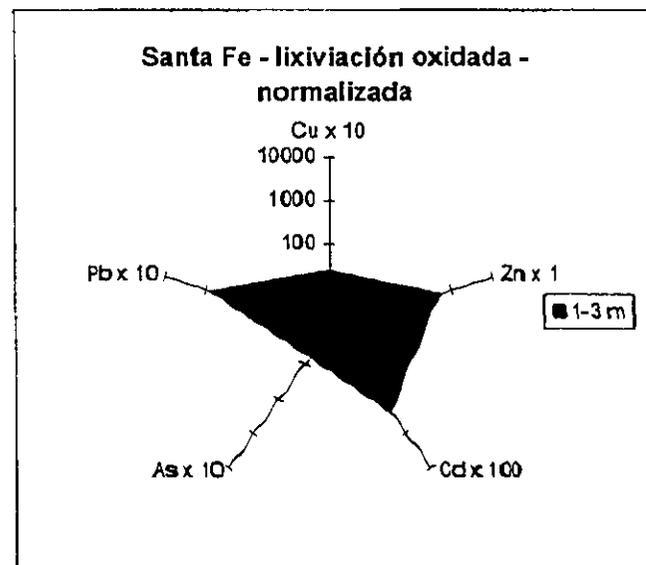
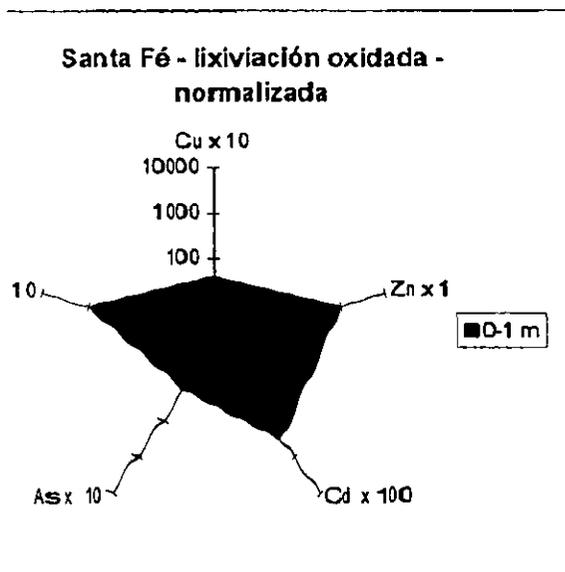
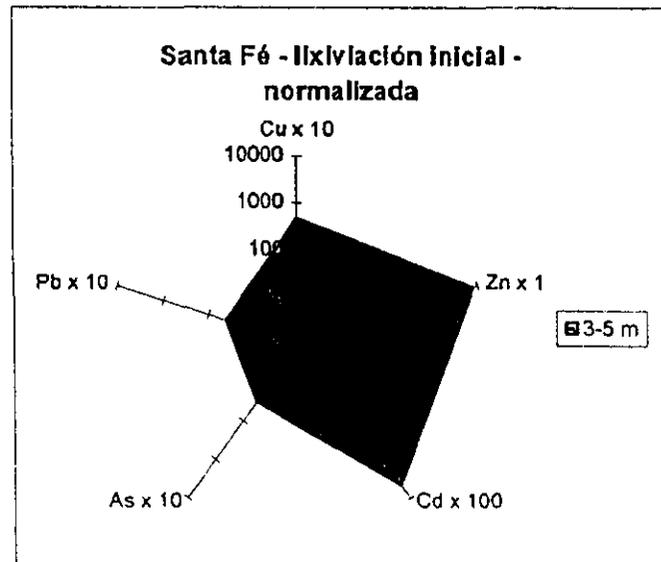
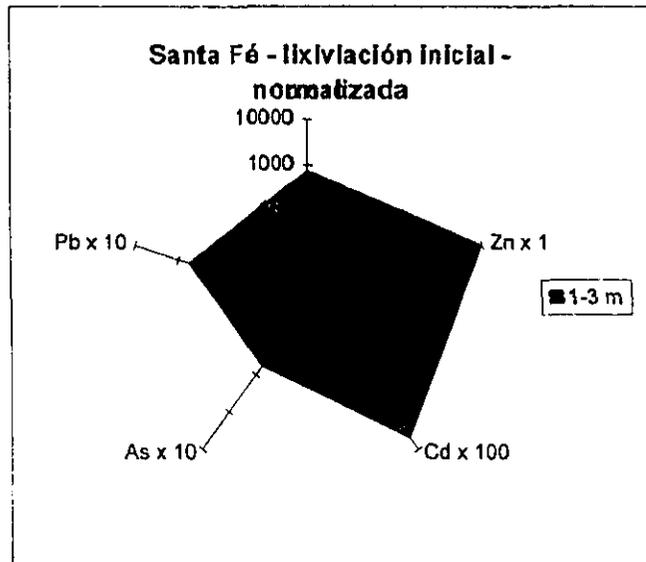
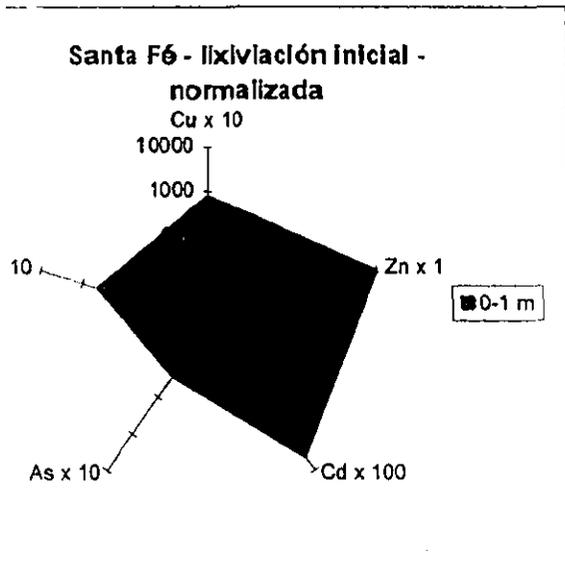
Morococala - lixiviación oxidada (g/ton)



Morococala, diag., inicial

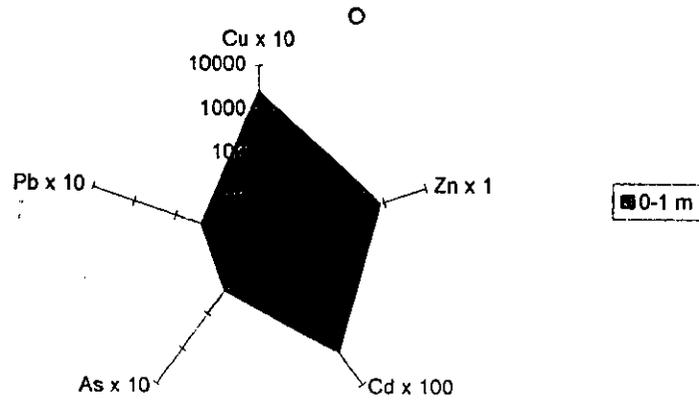


Muestra	Cu inic. mg/250 g	Cu inic. g/ton	Cu oxid. g/ton	Zn inic. g/ton	Zn oxid. g/ton	Pb inic. mg/250	Pb inic. g/ton	Pb oxid. mg/250	Pb oxid. g/ton	Cd inic. mg/250 g	Cd inic. g/ton	Cd oxid. mg/250	Cd oxid. g/ton	As inic. mg/250 g	As inic. g/ton	As oxid. mg/250 g	As oxid. g/ton
	Cu	Cu	Cu	Zn	Zn		Pb	Pb	Pb		Cd	Cd	Cd		As	As	As
SF-1 (0-1	20.04	80.16	3.84	9612	968	11.47	45.88	21.52	86.08	11.2	44.8	0.8	3.2	0.68	2.72	1.32	5.28
SF-1 (1-3	18.05	72.2	2.36	9152	460	13.6	54.4	18.68	74.72	11.99	47.96	0.54	2.16	1.4	5.6	0.6	2.4
SF-1 (3-5	11.97	47.88	3.68	8008	572	1.03	4.12	2.38	9.52	11.97	47.88	0.73	2.92	0.81	3.24	1.19	4.76
Santa Fe inicial	0-1 m	1-3 m	3-5 m			Santa Fe oxidada	0-1 m	1-3 m	3-5 m								
	Cu x 10	801.6	722	478.8			Cu x 10	38.4	23.6	36.8							
	Zn x 1	9612	9152	8008			Zn x 1	968	460	572							
	Cd x 100	4480	4796	4788			Cd x 10	320	216	292							
	As x 10	27.2	56	32.4			As x 10	13.2	6	11.9							
	Pb x 10	458.8	544	41.2			Pb x 10	860.8	747.2	95.2							

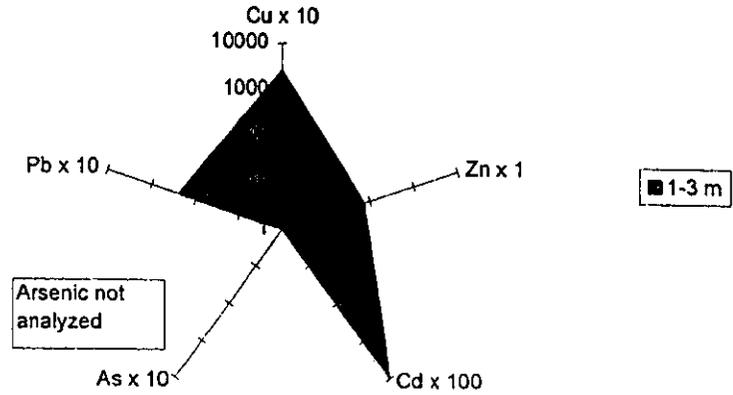


Machacamarca II, inic., oxid.

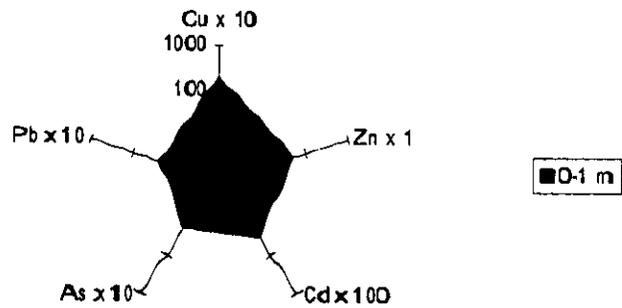
Machacamarca II - lixiviación inicial - normalizada



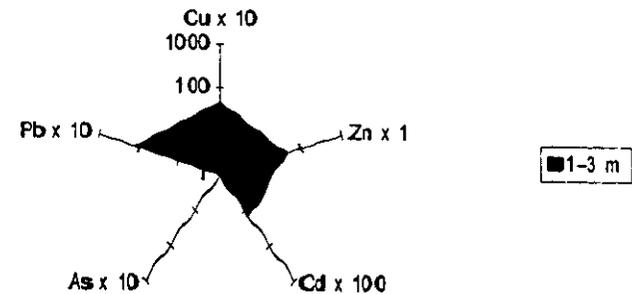
Machacamarca II - lixiviación inicial - normalizada



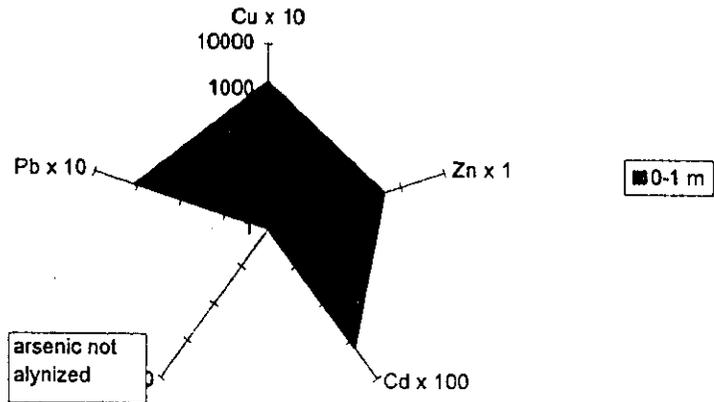
Machacamarca II - lixiviación oxidada - normalizada



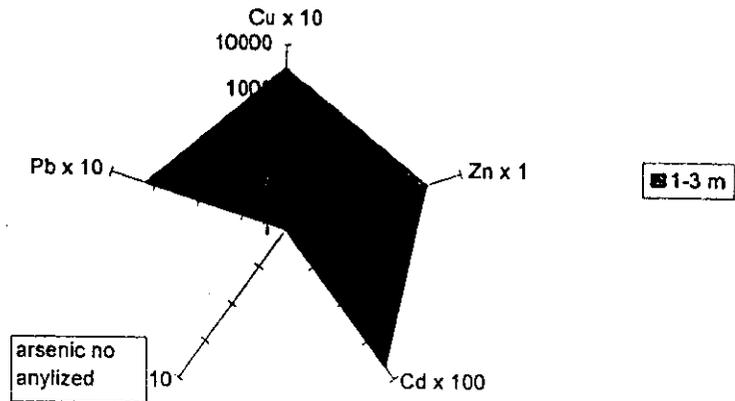
Machacamarca II - lixiviación oxidada - normalizada



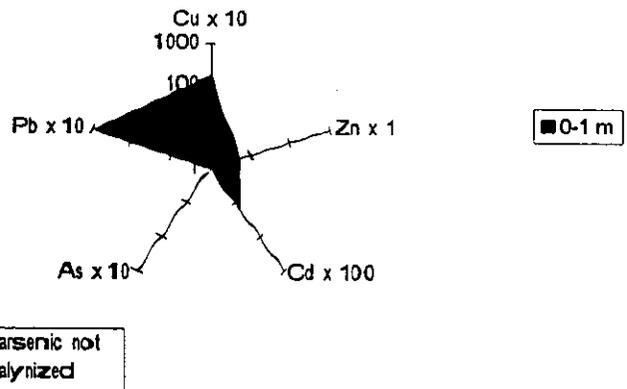
Machacamarca III - lixiviación inicial - normalizada



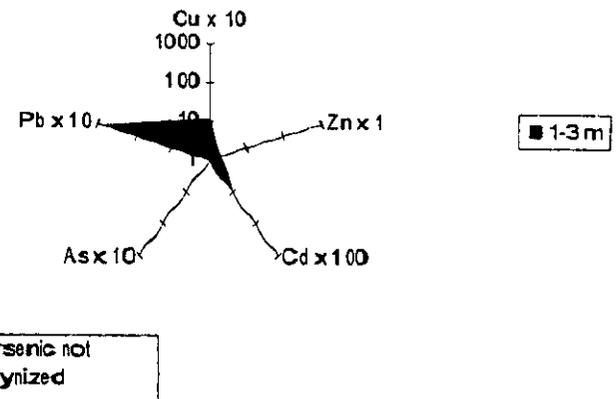
Machacamarca III - lixiviación inicial - normalizada



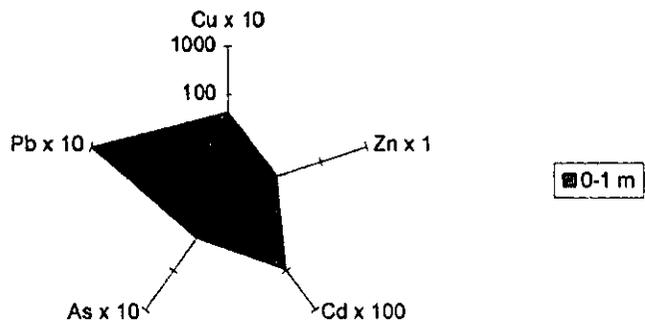
Machacamarca III - lixiviación oxidada - normalizada



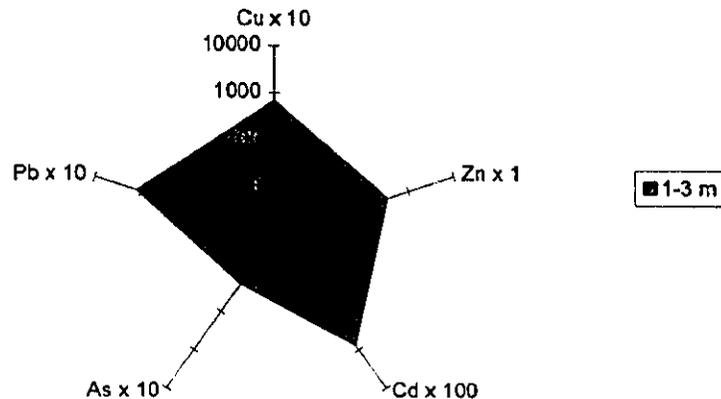
Machacamarca III - lixiviación oxidada - normalizada



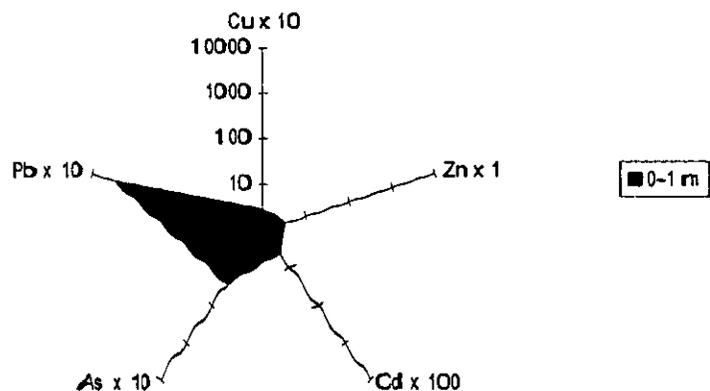
Machacamarca IV - lixiviación inicial - normalizada



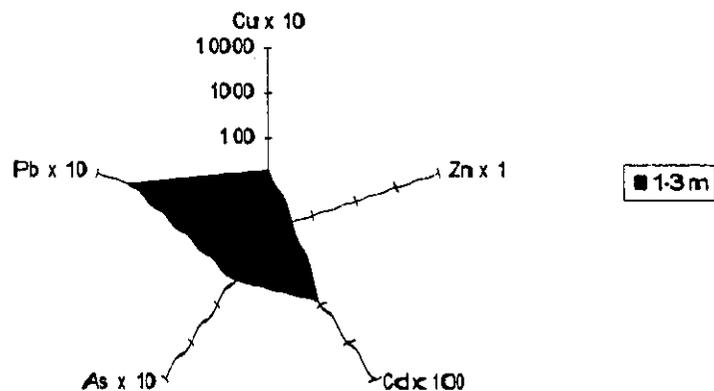
Machacamarca IV - lixiviación inicial - normalizada



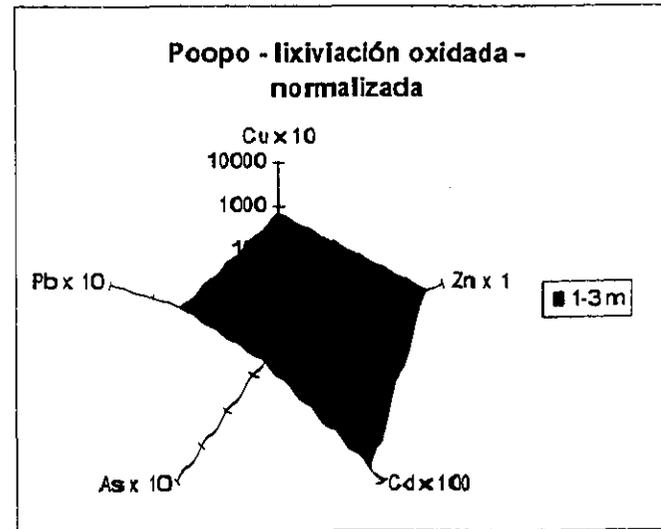
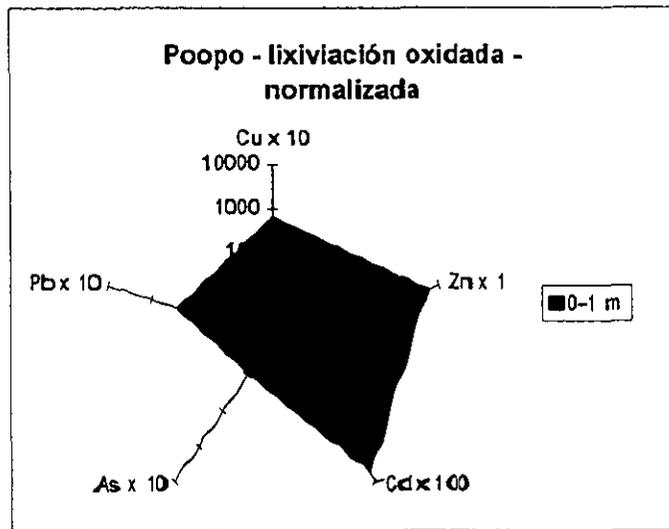
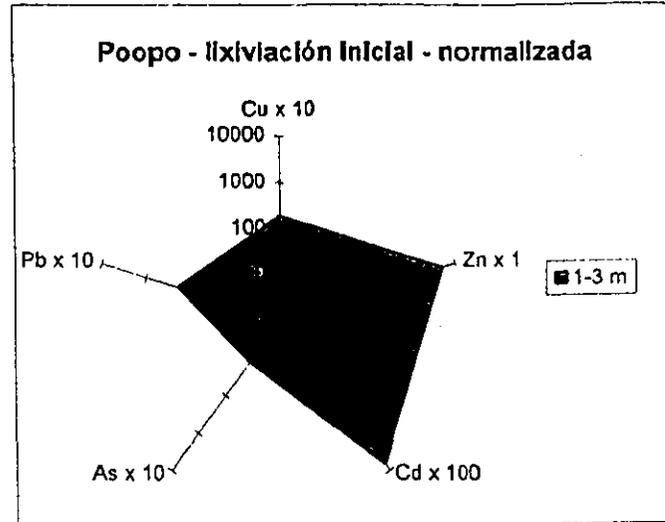
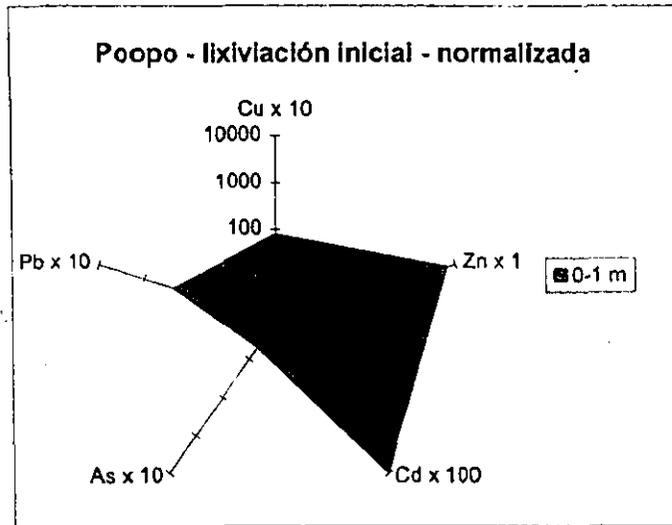
Machacamarca IV - lixiviación oxidada - normalizada



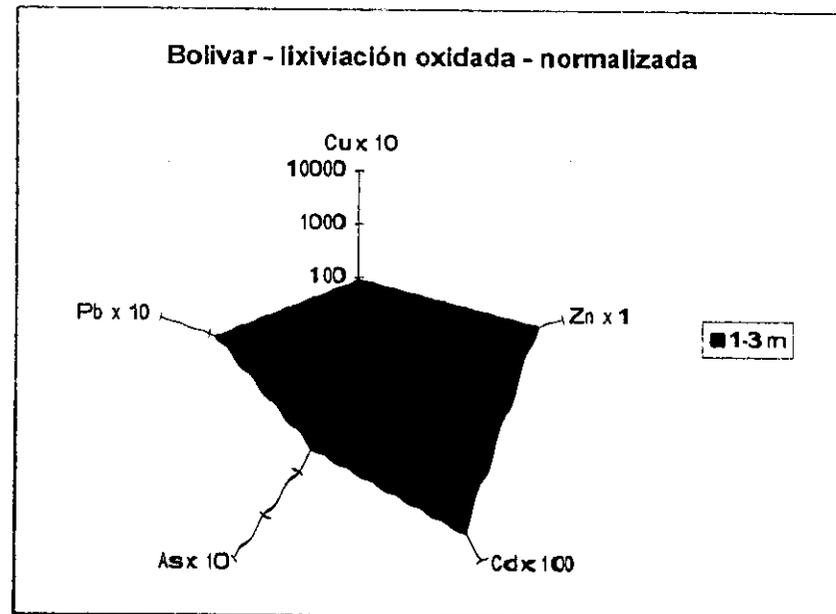
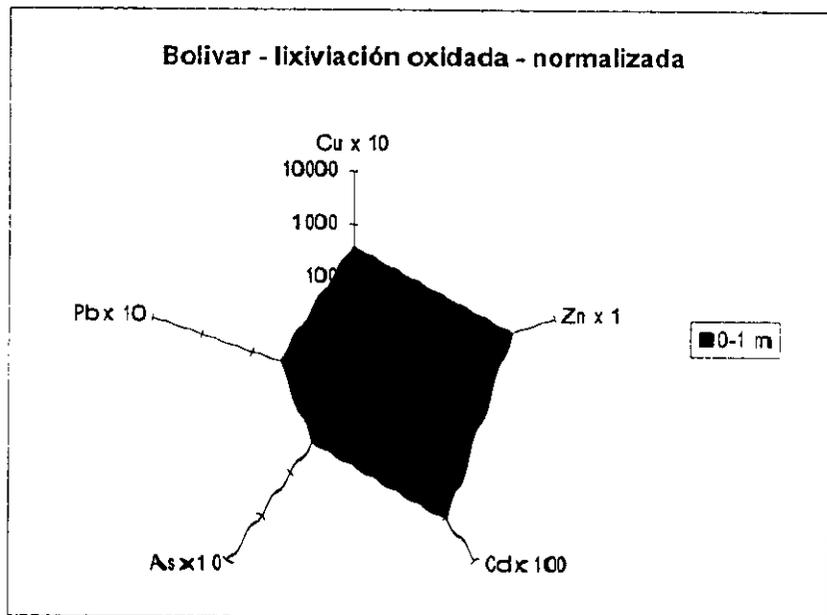
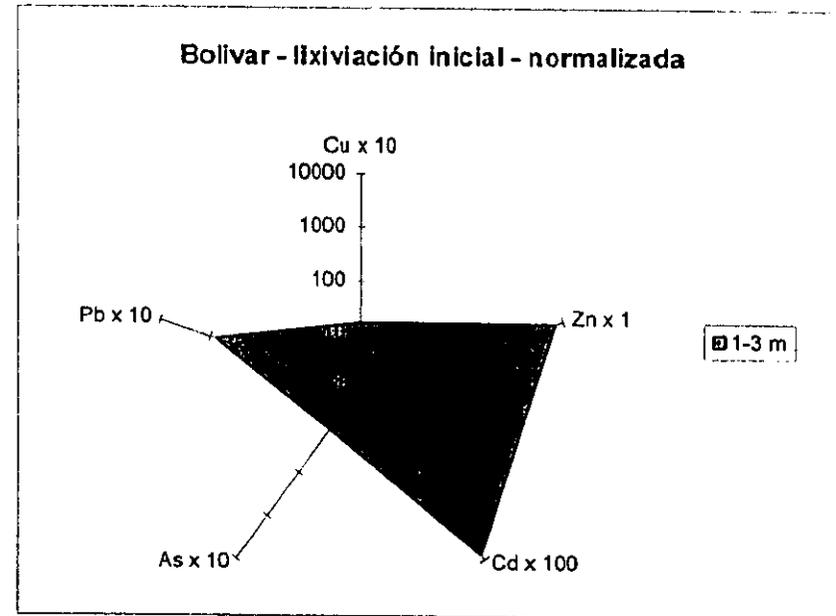
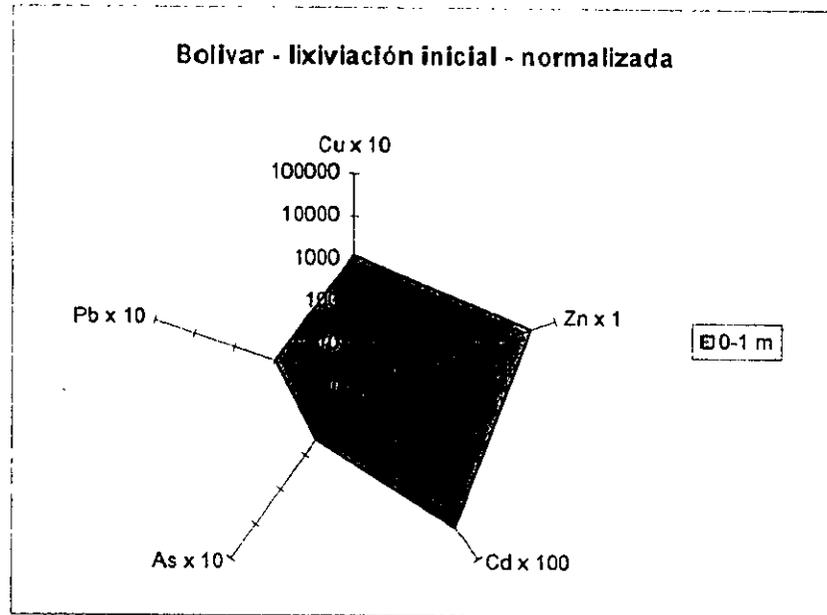
Machacamarca IV - lixiviación oxidada - normalizada



Lugar	Muestra	Cu inic. mg/250	Cu inic. g/ton	Cu oxid. g/ton	Zn inic. g/ton	Zn oxid. g/ton	Pb inic. mg/250 g	Pb inic. g/ton	Pb oxid. mg/250	Pb oxid. g/ton	Cd inic. mg/250	Cd inic. g/ton	Cd oxid. mg/250	Cd oxid. g/ton	As inic. mg/250	As inic. g/ton	As oxid. mg/250	As oxid. g/ton
			Cu	Cu	Zn	Zn		Pb		Pb		Cd		Cd		As		As
Machaca	Ma-IV (0-1)	1.07	4.28	0.28	10.96	3.4	23.5	94	68.06	272.24	0.23	0.92	0.01	0.04	0.36	1.44	0.64	2.56
Machaca	Ma-IV (1-3)	16.52	66.08	1.92	335.68	3.52	29.3	117.2	39.7	158.8	1.81	7.24	0.19	0.76	0.47	1.88	0.53	2.12
	inicial	0-1 m	1-3 m				oxidada	0-1 m	1-3 m									
	Cu x 10	42.8	660.8				Cu x 10	2.8	19.2									
	Zn x 1	10.96	335.68				Zn x 1	3.4	3.52									
	Cd x 100	92	724				Cd x 100	4	76									
	As x 10	14.4	18.8				As x 10	25.6	21.2									
	Pb x 10	940	1172				Pb x 10	2722.4	1588									

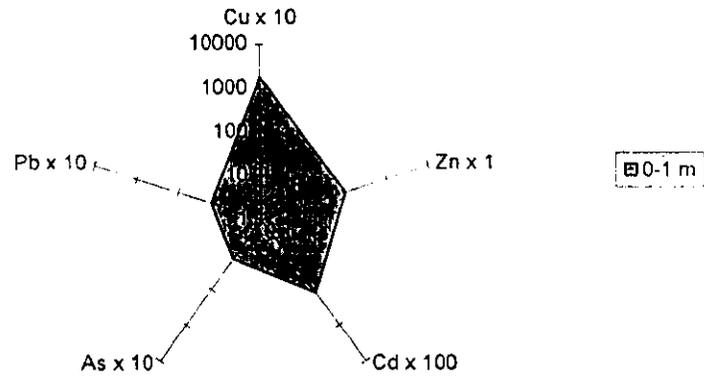


Muestra	Cu inic. mg/250 g	Cu inic. g/ton	Cu oxid. g/ton	Zn inic. g/ton	Zn oxid. g/ton	Pb inic. mg/250 g	Pb inic. g/ton	Pb oxid. mg/250 g	Pb oxid. g/ton	Cd inic. mg/250 g	Cd inic. g/ton	Cd oxid. mg/250 g	Cd oxid. g/ton	As inic. mg/250 g	As inic. g/ton	As oxid. mg/250 g	As oxid. g/ton
		Cu	Cu	Zn	Zn		Pb		Pb		Cd		Cd		As		As
Po-1 (0-1)	1.93	7.72	61.44	6440	4920	11.2	44.8	5.21	20.84	23.36	93.44	13.18	52.72	0.12	0.48	0.88	3.52
Po-1 (1-3)	4.76	19.04	65.6	5400	3568	24.21	96.84	5.11	20.44	17.64	70.56	9.89	39.56	0.34	1.36	0.41	1.64
Poopo	l.inicial	0-1 m	1-3 m			Poopo	l. oxidada	0-1 m	1-3 m								
	Cu x 10	77.2	190.4				Cu x 10	614.4	656								
	Zn x 1	6440	5400				Zn x 1	4920	3568								
	Cd x 100	9344	7056				Cd x 100	5272	3956								
	As x 10	4.8	13.6				As x 10	8.8	4.1								
	Pb x 10	208.4	204.4				Pb x 10	208.4	204.4								

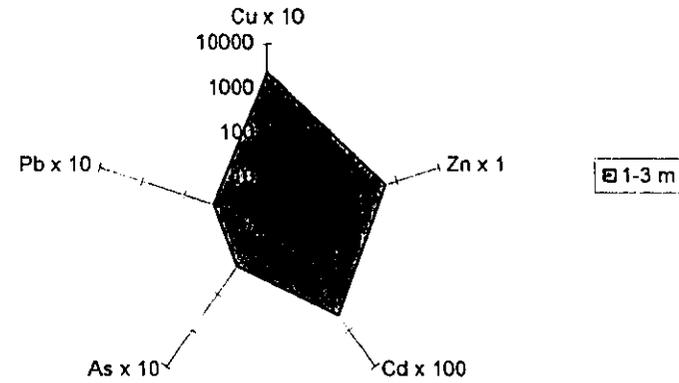


estra	Cu inic. mg/250 g	Cu inic. g/ton	Cu oxid. g/ton	Zn inic. g/ton	Zn oxid. g/ton	Pb inic. mg/250 g	Pb inic. g/ton	Pb oxid. mg/250	Pb oxid. g/ton	Cd inic. mg/250 g	Cd inic. g/ton	Cd oxid. mg/250 g	Cd oxid. g/ton	As inic. mg/250 g	As inic. g/ton	As oxid. mg/250 g	As oxid. g/ton
		Cu	Cu	Zn	Zn		Pb		Pb		Cd		Cd		As		As
<-1 (0-1	31.61	126.44	37.2	25532	1412	2.41	9.64	0.72	2.88	29.69	118.76	2.82	11.28	0.89	3.56	0.49	1.96
<-1 (1-3	0.402	1.608	8.8	7208	3280	19.91	79.64	17.11	68.44	19.58	78.32	5.96	23.84	0.25	1	0.75	3
		0-1 m	1-3 m					0-1 m	1-3 m								
	Cu x 10	1264.4	16.08					Cu x 10	372	88							
	Zn x 1	25532	7208					Zn x 1	1412	3280							
	Cd x 100	11876	7832					Cd x 10	1128	2384							
	As x 10	35.6	10					As x 10	19.6	30							
	Pb x 10	96.4	796.4					Pb x 10	28.8	684.4							

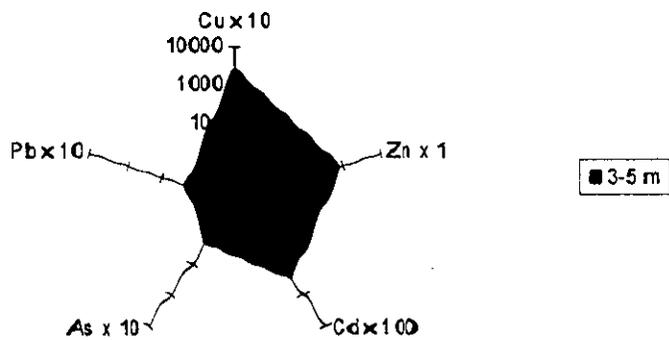
Totoral -lixiviación inicial - normalizada



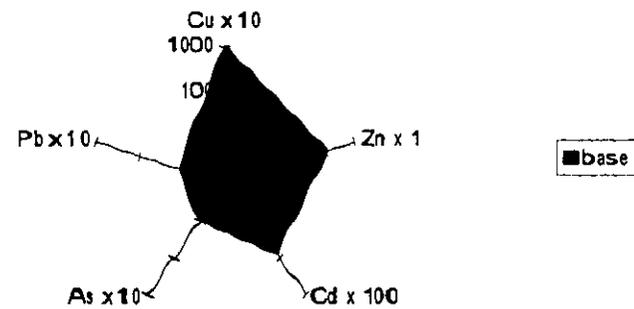
Totoral - lixiviación inicial - normalizada



Totoral - lixiviación inicial - normalizada



Totoral - lixiviación inicial - normalizada

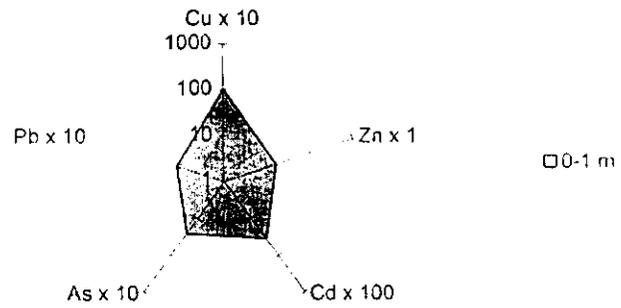


uestra	Cu inic. mg/250 g	Cu inic. g/ton	Cu oxid. g/ton	Zn inic. g/ton	Zn oxid. g/ton	Pb inic. mg/250 g	Pb inic. g/ton	Pb oxid. mg/250 g	Pb oxid. g/ton	Cd inic. mg/250 g	Cd inic. g/ton	Cd oxid. mg/250 g	Cd oxid. g/ton	As inic. mg/250 g	As inic. g/ton	As oxid. mg/250 g	As oxid. g/ton
		Cu	Cu	Zn	Zn		Pb		Pb		Cd		Cd		As		As
o-1 (0-1)	46	184	10.24	108	16.28	0.41	1.64	0.3	1.2	1.27	5.08	0.09	0.36	0.34	1.36	0.66	2.64
o-1 (1-3)	60.61	242.44	14.88	568	32	0.51	2.04	0.49	1.96	4.02	16.08	0.18	0.72	0.43	1.72	0.57	2.28
o-1 (3-5)	64.64	258.56	278.64	788	848	0.59	2.36	1.21	4.84	2.96	11.84	3.27	13.08	0.55	2.2	1.45	5.8
o-1 (bas	24.6	98.4	4	224.12	4.88	0.32	1.28	0.82	3.28	0.75	3	0.02	0.08	0.23	0.92	0.08	0.32
	inicial	0-1 m	1-3 m	3-5 m	base		oxidada	0-1 m	1-3 m	3-5 m	base						
	Cu x 10	1840	2424.4	2585.6	984		Cu x 10	102.4	148.8	2786.4	40						
	Zn x 1	108	568	788	224.12		Zn x 1	16.28	32	848	4.88						
	Cd x 100	127	402	296	75		Cd x 100	36	72	1308	8						
	As x 10	13.6	17.2	22	9.2		As x 10	26.4	22.8	58	3.2						
	Pb x 10	16.4	20.4	23.6	12.8		Pb x 10	12	19.6	48.4	32.8						

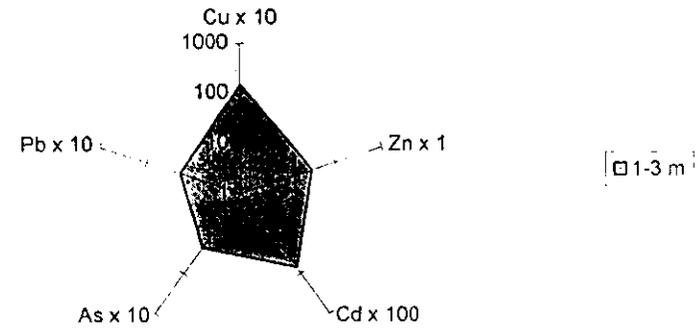
Avicaya

Muestra	Cu inic.	Cu inic.	Cu oxid.	Zn inic.	Zn oxid.	Pb inic.	Pb inic.	Pb oxid.	Pb oxid.	Cd inic.	Cd inic.	Cd oxid.	Cd oxid.
	mg/250 g	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	mg/250 g	g/ton	mg/250 g	g/ton	mg/250 g	g/ton	mg/250 g	g/ton
		Cu	Cu	Zn	Zn		Pb		Pb		Cd		Cd
Av-I (0-1)	110	440	22.6	1548	16	0.63	2.52	0.37	1.48	5.16	20.64	0.07	0.28
Av-I (1-3)	217.5	870	10	1976	52	0.71	2.84	0.34	1.36	5.37	21.48	0.16	0.64
Av-I (3-5)	233.9	935.6	8.4	2042	26	0.941	3.764	0.16	0.64	6.14	24.56	0.11	0.44
Av-I (base	212	848	12	2172	16	1.02	4.08	0.25	1	10.75	43	0.08	0.32
	inicial	0-1 m	1-3 m	3-5 m	base		oxidada	0-1 m	1-3 m	3-5 m	base		
	Cu x 10	4400	8700	9356	8480		Cu x 10	226	100	84	120		
	Zn x 1	1548	1976	2042	2172		Zn x 1	16	52	26	16		
	Cd x 100	2064	2148	2456	4300		Cd x 100	28	64	44	32		
	As x 10						As x 10						
	Pb x 10	25.2	28.4	37.64	40.8		Pb x 10	3.7	3.4	1.6	2.5		

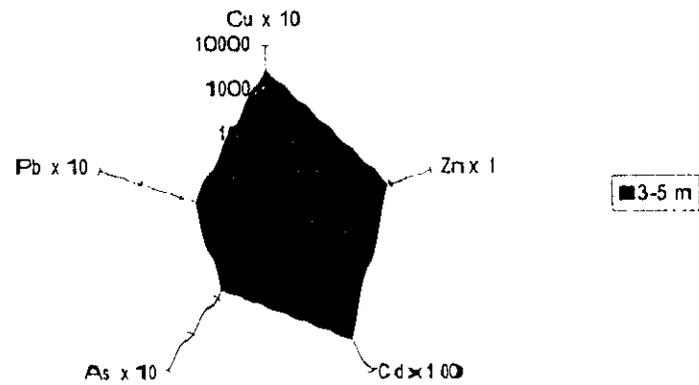
Totoral - lixiviación oxidada - normalizada



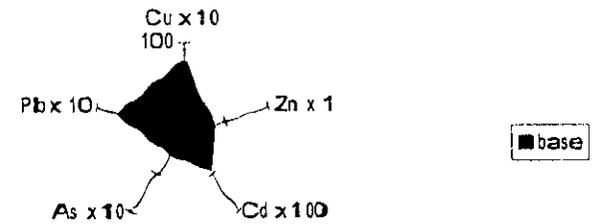
Totoral - lixiviación oxidada - normalizada



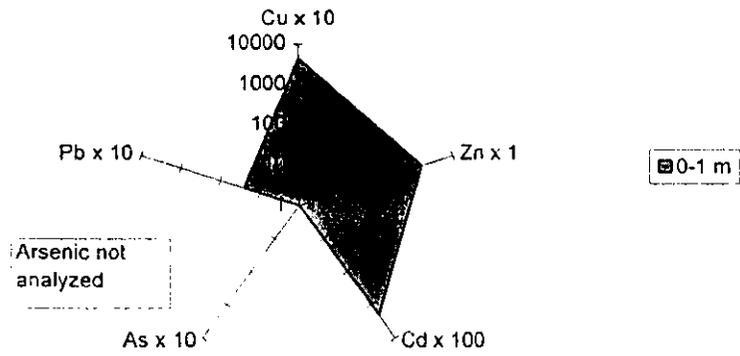
Totoral - lixiviación oxidada - normalizada



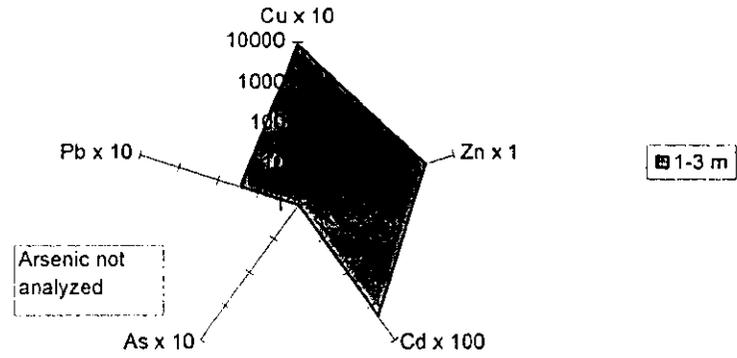
Totoral - lixiviación oxidada - normalizada



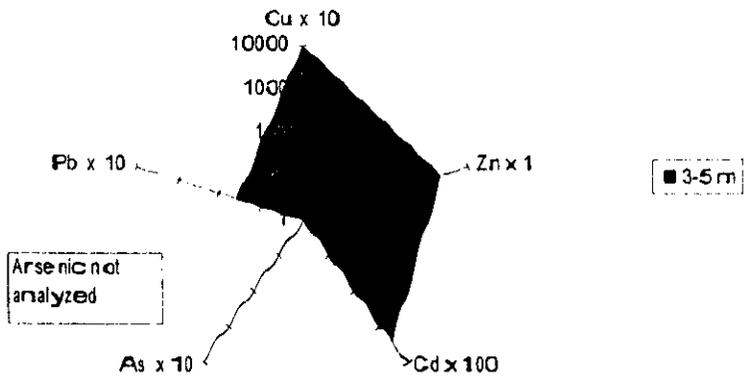
Avicaya - lixiviación inicial - normalizada



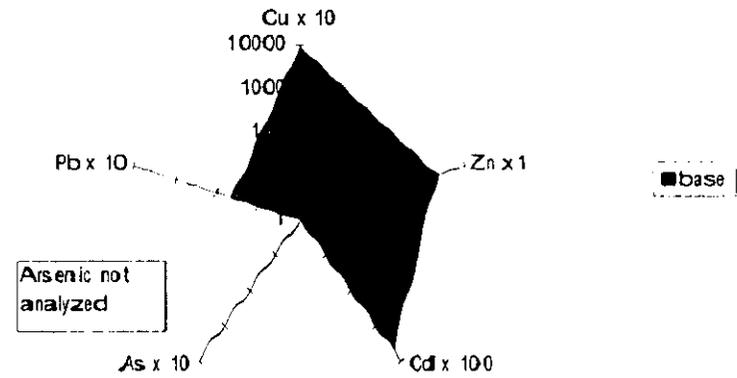
Avicaya - lixiviación inicial - normalizada



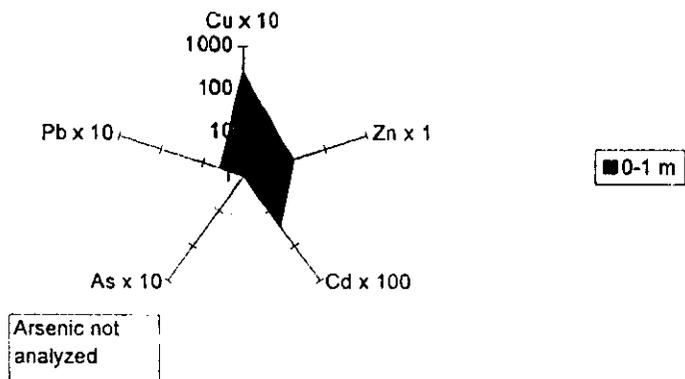
Avicaya - lixiviación inicial - normalizada



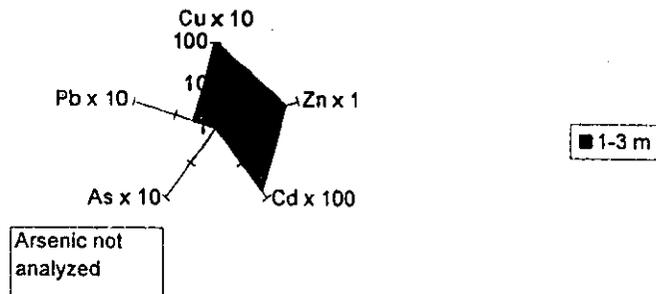
Avicaya - lixiviación inicial - normalizada



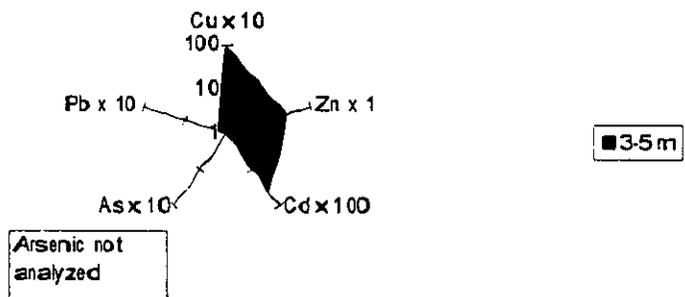
Avicaya - lixiviación oxidada - normalizada



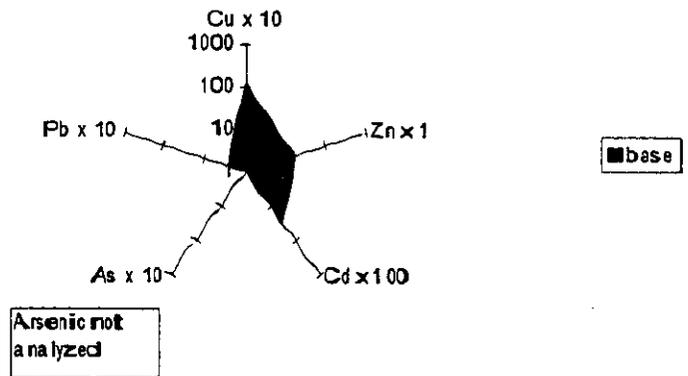
Avicaya - lixiviación oxidada - normalizada



Avicaya - lixiviación oxidada - normalizada



Avicaya - lixiviación oxidada - normalizada



Apéndice 2. Fotografías de depósitos de colas, área del P.P.O.



Figura A. Campamento minero Santa F  con depósitos de colas.

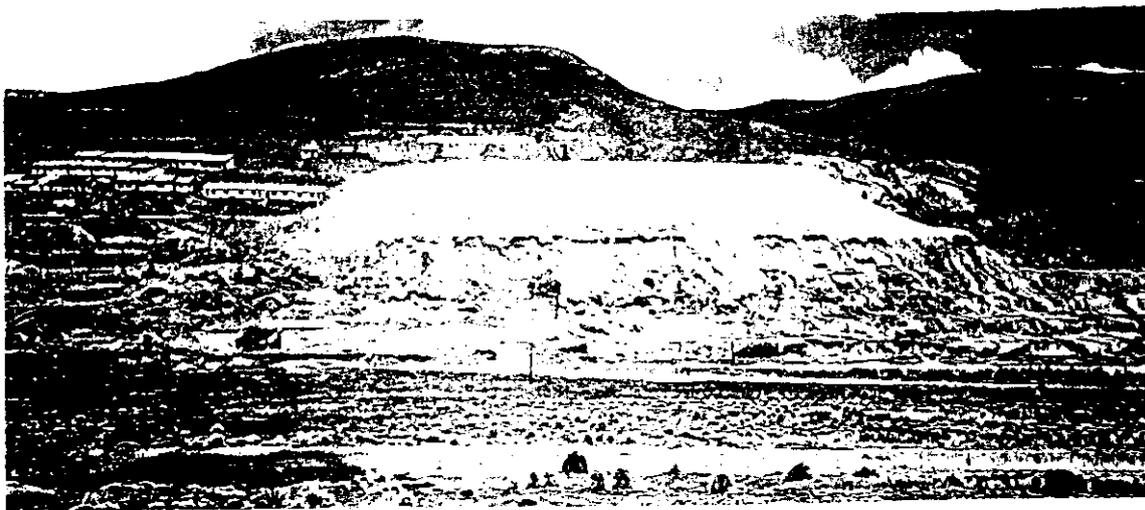


Figura B. Colas oxidas y lixiviadas en Japo.

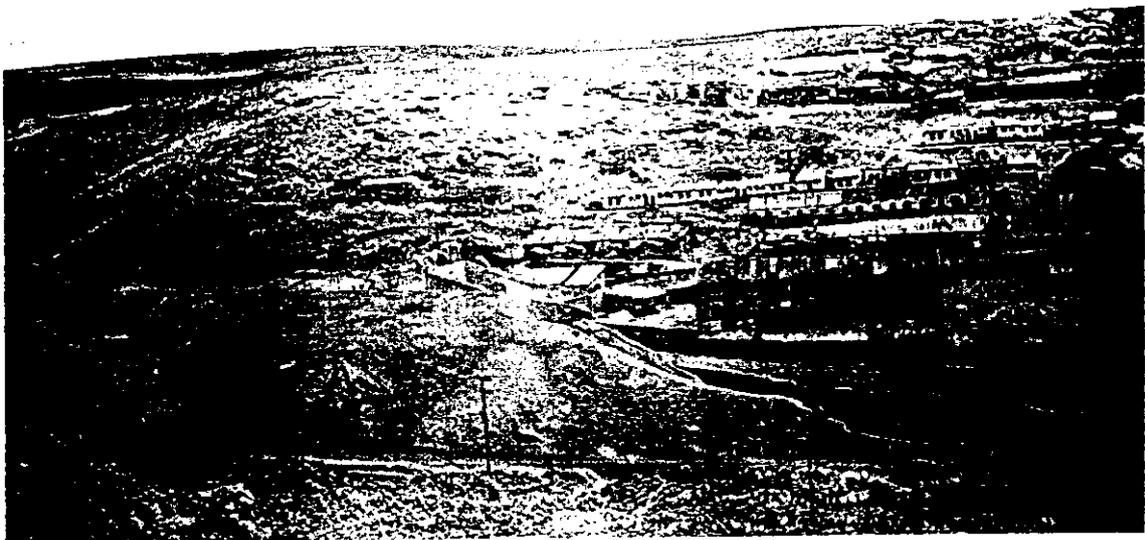


Figura C. Depósitos de colas en Morococala.



Figura D. La playa de Iroco con una capa de colas descargadas por el ingenio Ilos (aproximadamente 500 000 m² y 132 000 t de colas, ver Figura 5). El canal Ilos, que lleva agua del río Desaguadero, es visible en el primer plano. Nótese las minas de oro de cooperativas en el centro de la fotografía. Estas minas son la principal fuente de contaminación del mercurio en el área.

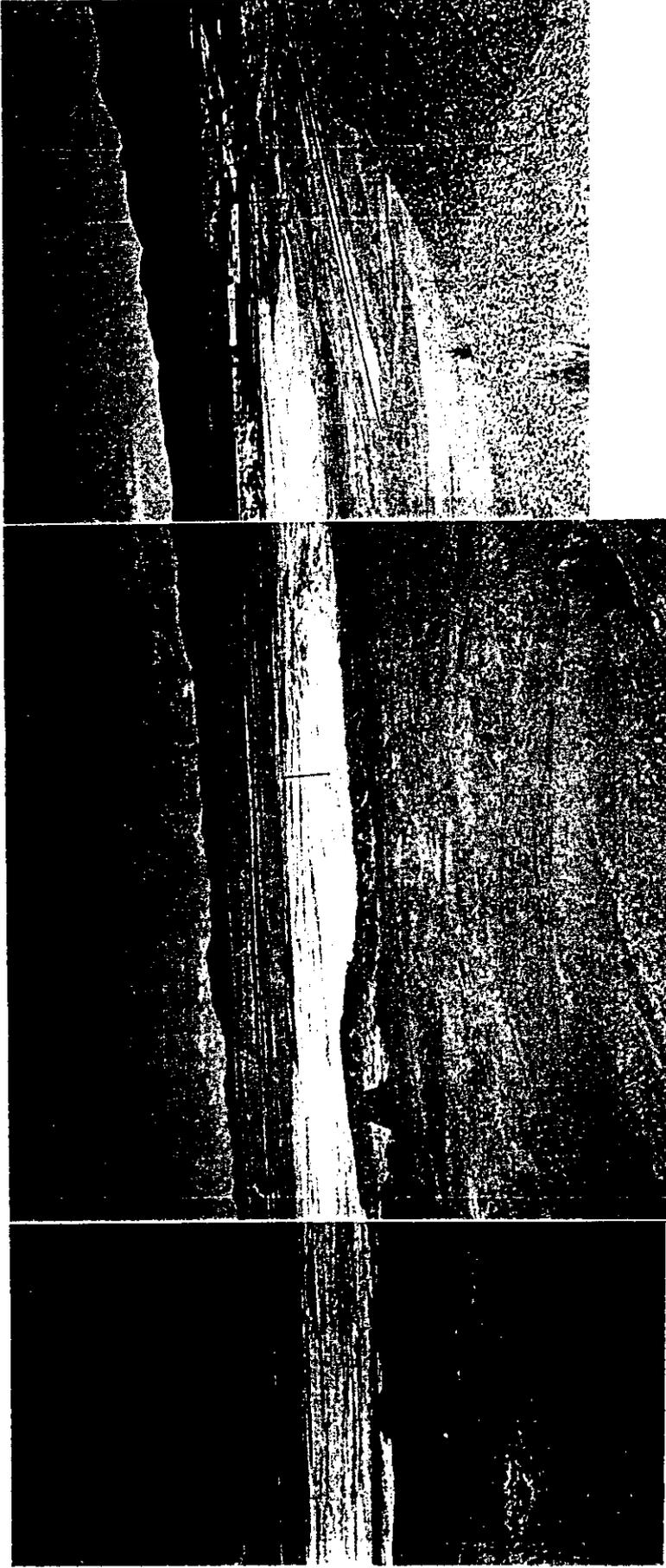


Figura E. Cotas descargadas por el ingenio de Machacaamarca en el lecho del Rio San Juan de Sora Sora.