

**PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN:
PLANTA DE TRATAMIENTO ACTIVO
KUMURANA – LA LAVA**

Elaborado por:
Fundación MEDMIN
(Medio Ambiente, Minería e Industria)

La Paz, abril de 2004

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

INDICE

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava	3
1. Planta de tratamiento activo y programa de investigación.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Introducción	3
1.3. Los objetivos.....	3
1.3.1. Dentro del proyecto:.....	3
1.3.2. Específicos de la investigación:	3
2. La planta de tratamiento activo	3
2.1. Procesos químicos.....	3
2.2. Procesos físicos.....	3
2.3. Funcionamiento técnico	3
3. Campaña de investigación	3
3.1. Metodología	3
3.1.1. Muestreo.....	3
3.1.2. Métodos de muestreo	3
3.2. Cronograma del seguimiento	3
3.3. Reporte del seguimiento	3
4. Interpretación de Resultados Obtenidos	3
4.1. Parámetros de referencia.....	3
4.1.1. Acidez / alcalinidad	3
4.1.2. Temperatura	3
4.1.3. Sales minerales disueltos	3
4.1.4. Sólidos suspendidos	3
4.2. Metales pesados y otros tóxicos	3
4.2.1. Estaño.....	3
4.2.2. Plomo	3
4.2.3. Cadmio	3
4.2.4. Zinc.....	3
4.2.5. Cobre.....	3
4.2.6. Hierro.....	3
4.2.7. Arsénico.....	3
4.2.8. Cianuro	3
5. Conclusiones	3

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

6.	Apéndice	3
6.1.	Expresiones científicas	3
6.2.	Información adicional	3
6.2.1.	Velocidad y tiempo de sedimentación de forma laminar	3
6.2.2.	Límites permisibles y concentraciones naturales	3
6.3.	Documentación fotográfica.....	3
6.4.	Datos crudos.....	3
6.4.1.	Análisis de la Fundación MEDMIN	3
6.4.2.	Análisis de la SGS	3
6.5.	Bibliografía	3
6.5.1.	Literatura científica.....	3
6.5.2.	Páginas de Web.....	3

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN: PLANTA DE TRATAMIENTO KUMURANA – LA LAVA

Institución: Fundación MEDMIN

Encargados: Danilo Bocángel; coordinador del proyecto
Florian Erzinger; asistente científico

1. Planta de tratamiento activo y programa de investigación

1.1. Antecedentes

El proyecto de la construcción de una planta de tratamiento activo en Kumurana – La Lava hace parte del Proyecto Medio Ambiente Industria y Minería (PMAIM), lo que se ejecuta en Bolivia con el Soporte financiero del Banco Mundial (Credito AIF-2805/96) y el Fondo Nórdico para el Desarrollo (Crédito FND-160/95). El Viceministerio de Minería y Metalurgia, a través de la Unidad Sectorial de Medio Ambiente USMA, es responsable de la ejecución de los componentes D y E del PMAIM, que comprende programas de difusión de normas técnicas y jurídicas, programas de capacitación, generación de información para obtención de diagnósticos ambientales, elaboración de programas específicos de prevención y control; y asistencia técnica a municipios mineros en la construcción de obras de mitigación de impactos y remediación de pasivos ambientales.

El marco regulatorio ambiental tiene vigencia en Bolivia desde la promulgación de los Reglamentos de la Ley del Medio Ambiente (1996), y para el sector minero se fortalece y consolida desde la promulgación de la Ley del Código de Minería (1997) y el Reglamento Ambiental para Actividades Mineras (RAAM, 1977). Las estadísticas de procesamiento de licencias ambientales para actividades y proyectos del sector minero, en las instancias legales correspondientes (Viceministerio de Minería y Metalurgia, Viceministerio de Medio Ambiente Recursos Naturales y Prefecturas), reflejan un bajo grado de cumplimiento de la normativa ambiental, debido a las limitaciones económicas que confrontan las empresas y cooperativas mineras, por la caída de precios de los minerales en el mercado internacional.

La minería y sus actividades asociadas pueden ser la causa de daños considerables al medio ambiente físico y biótico si no se adoptan medidas de prevención y control ambiental, mediante la aplicación de tecnologías compatibles con la situación socio-económica de los concesionarios y operadores mineros. Los impactos típicos de las actividades mineras son la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, la degradación de los suelos, la destrucción de hábitats, riesgos sobre la salud y seguridad de los trabajadores y población del entorno. El deterioro de los recursos naturales y la salud humana pueden tener un efecto negativo, en el potencial de crecimiento de una región en el largo plazo, aún si se obtienen beneficios económicos inmediatos para las empresas. Por lo tanto, es importante que las actividades mineras sean llevadas a cabo de modo que sus impactos sean reducidos al mínimo posible.

Por esas razones, se requiere desarrollar y difundir sistemas tecnológicos que sean económicamente viables para las operaciones de la minería chica y cooperativizada de nuestro país, y que permitan controlar los impactos ambientales y socio-económicos de la actividad minera, aplicando una estrategia de control progresivo y paulatino, con una amplia participación de los sectores

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

involucrados y la aplicación de incentivos técnicos y financieros para la construcción de obras de prevención y control en las zonas de mayor impacto ambiental.

Debido a los conflictos ambientales que se han generado entre los operadores de las Minas Andacaba y Kumurana y campesinos de las comunidades rurales asentadas en la zona baja de la meseta de Cucho Ingenio - La Lava, se han desarrollado estudios de evaluación de impactos ambientales relacionados con la contaminación de aguas. En 1993, mediante la ejecución del Proyecto de Cooperación Geológica Boliviano-Alemán, se realizaron estudios ambientales en las regiones de Toropalca, Andacaba – Kumurana - La Lava, en el Departamento de Potosí, con el propósito de establecer el grado de contaminación de aguas superficiales, como producto de actividades mineras de la zona. En marzo de 1994, se concluyó un estudio experimental conducido por el Instituto de Investigaciones Minero Metalúrgicas – Sergeomin, a pedido de la administración de Empresa Minera Kumurana (Empresa Minera Gutierrez), para establecer métodos y costos de tratamiento de aguas ácidas de mina, a través de pruebas a escala de laboratorio y escala piloto, obteniéndose información importante sobre las características geoquímicas de los efluentes de DAM y DAR de Mina Kumurana, y condiciones de tratamiento mediante uso de caliza y cal.

La Fundación MEDMIN, como responsable de la planificación y ejecución del Subproyecto 3-E del Proyecto Medio Ambiente Industria y Minería (PMAIM) “Manejo Ambiental en Microcuencas de Zonas Mineras”, realizó una evaluación ambiental y socioeconómica de 13 centros mineros pre-seleccionados. En la Fase II del Subproyecto 3-E se seleccionaron 5 zonas mineras beneficiarias del proyecto, entre las que fue tomada en cuenta la Microcuenca Kumurana – La Lava, para la elaboración de diseños constructivos y operativos, destinados a la implementación de obras de mitigación ambiental, relacionados con los diagnósticos ambientales y socio-económicos obtenidos en la Fase I y complementados en la Fase II del Subproyecto 3-E. El diagnóstico socio-económico realizado en la Fase I y Fase II del Subproyecto 3-E, “Manejo Ambiental en Microcuencas de Zonas Mineras”, mostró una necesidad primordial del recurso agua para desarrollar alternativas productivas y potenciar los medios de subsistencia de la población local. Por lo tanto, se reconoció una probada necesidad de instalar un sistema de tratamiento de aguas ácidas procedentes del socavón Santa Catalina en Mina Kumurana con fines ambientales y socioeconómicos.

En la Microcuenca del Río Kumurana existen factores favorables que facilitan el diseño operativo y constructivo de las obras, tales como la topografía de la zona, un caudal del efluente en un rango manejable y concentraciones relativamente moderadas de metales pesados. Estos aspectos permiten desarrollar el proceso de neutralización y oxidación en condiciones cinéticas óptimas, a muy bajo costo de inversión y operación. Por otra parte, los residuos de cal que serán descartados de la planta de cal, servirán para control de la acidez en la Laguna Santa Catalina y/o en las filtraciones de los desmontes de caja mina. Los diseños para cada una de las obras que forman parte del sistema de control ambiental se basan en el establecimiento de un proceso físico-químico de tratamiento activo, para reducir el grado de acidez y reducir el contenido de metales pesados en el efluente de drenaje ácido de Mina Kumurana. De esa manera se estima que en un plazo no mayor a los 6 meses se podrá alcanzar una calidad de agua Clase C, para fines de riego¹.

¹ Actualmente está en curso un programa de clasificación de cuerpos de agua que definirá los límites definitivos a ser aplicados en el futuro, para control de calidad de aguas en descargas y cuerpos de agua; entre tanto, se aplica los límites permisibles para descargas, Anexo A-2 del Reglamento Ambiental en Materia de Contaminación Hídrica.

1.2. Introducción

El proyecto en si puede ser dividido en tres etapas: Preinversión, que incluye las gestiones realizadas y la elaboración de los expedientes técnicos y otros informes de acuerdo a contrato; inversión, que constituye la construcción misma de las obras, dirección y supervisión; y finalmente el monitoreo ejecutado a través de un programa de investigación. Todos los criterios técnicos estuvieron orientados al tratamiento de desagües de minería sin impacto adicional de origen de poblaciones humanas.

Una vez concluidas las obras, se realizaron pruebas hidráulicas en la presa de colas para dar lugar al programa de investigación, que evalúe su eficiencia de purificación. Los resultados de este monitoreo de unos quince días de duración se presentan y evalúan en presente informe científico “Programa de investigación: Planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava”.

El programa de investigación contempla la medición de parámetros in situ: caudal, pH, temperatura y el potencial mV en la fuente de alimentación de la planta de caleo, en su salida de este sistema de neutralización, en la entrada de la descarga a los tanques de sedimentación y en la salida de ese sistema. Adicionalmente se toma muestras de aguas en los mismos puntos para hacer analizar las concentraciones de plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe), cianuro (CN⁻), estaño (Sn) y de arsénico (As) y además de sólidos suspendidos (SST) en las distintas muestras de agua. De esta manera, por un lado se puede cuantificar la eficiencia del tratamiento físico-químico de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava y por otro es posible inferir conclusiones sobre si las descargas líquidas que salen de la planta de tratamiento cumplen la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

A continuación, en el capítulo 1.3., como parte del proyecto, se explican los distintos objetivos bajo los cuales fue construida la presa de colas Laguna Pampa y los objetivos de la campaña de investigación misma. Para facilitar el entendimiento del funcionamiento de la planta de tratamiento activo al lector del presente informe científico, en el capítulo 2. se da una breve introducción en el funcionamiento de una planta de purificación de aguas contaminadas mediante un tratamiento físico-químico como es el caso en Kumurana – La Lava, con explicaciones sobre la respectiva teoría científica acerca los procesos químicos en el capítulo 2.1. y acerca los procesos físicos en el capítulo 2.2. y sobre el funcionamiento práctico de una presa de colas en el capítulo 2.3.. En el capítulo 3., se describe la campaña de investigación como los expertos científicos de la fundación MEDMIN la planificaron, iniciando con la explicación de la metodología utilizada en el capítulo 3.1., seguido por un cronograma de seguimiento de la campaña en el capítulo 3.2. y concluyendo con el reporte del seguimiento de la campaña de medición en el capítulo 3.3.. Luego, en la parte principal de presente informe, el capítulo 3.3, se presenta parámetro por parámetro los resultados de las mediciones de manera gráfica y se realiza una interpretación de los datos, es decir unos datos generales químico-físico del sistema descontaminadora de Kumurana – La Lava (cap. 4.1.) y luego las concentraciones específicas de los diferentes metales pesados problemáticos para el entorno ambiental (cap. 0.). Al final, en el capítulo 4.2.5. de este documento, dichos resultados son discutidos y evaluados para deducir algunas conclusiones fundamentales sobre el funcionamiento y la eficiencia de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava. Una breve explicación de las expresiones científicas utilizadas en este informe (cap. 6.1.), informaciones adicionales que el lector necesita para su mejor entendimiento (cap. 6.2.), seguido por la documentación de la campaña por fotos (cap. 6.3.) y los datos crudos de laboratorio (cap. 0.) y finalmente las fuentes de literatura, en la cual se base el contenido de este documento (cap. 6.4.) tiene lugar en el apéndice, capítulo 3.3.

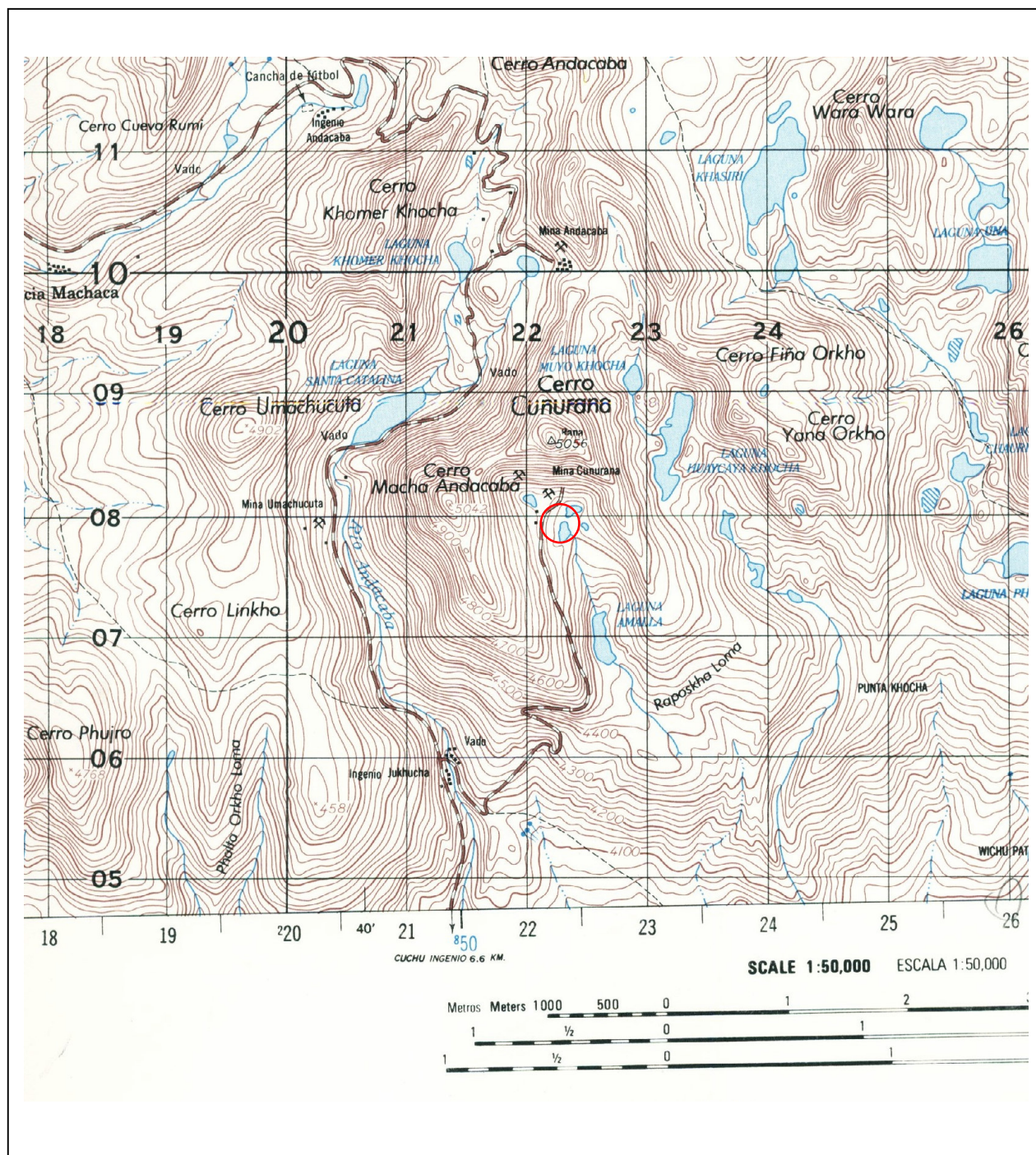


Figura 1: Exposición geográfica de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava (también se encuentra la grafía "Cunurana"), ubicándose en el municipio de La Lava en el sureste de la ciudad de Potosí (aproximadamente S 19° 49', O 55° 39').

1.3. Los objetivos

Como objetivos prácticos del proyecto de la construcción de una planta de tratamiento activo y del programa de monitoreo, se tienen:

1.3.1. *Dentro del proyecto:*

Los objetivos del Proyecto Medio Ambiente Industria y Minería (PMAIM) son los siguientes:

- Contribuir en el mejoramiento del marco regulatorio ambiental del Sector Minero-Industrial de Bolivia y apoyar en su implementación.
- Asistir a los operadores y concesionarios de la Minería Pequeña y Cooperativizada, en la prevención de riesgos y en la remediación de pasivos ambientales originados en actividades mineras.
- Prestar asistencia técnica a los municipios mineros en la obtención de recursos financieros, del PMAIM y otros, para mejorar las condiciones medioambientales de su entorno, y aliviar la pobreza de las comunidades rurales dentro de sus jurisdicciones.

El Subproyecto 3-E del Proyecto Medio Ambiente Industria y Minería (PMAIM) “Manejo Ambiental en Microcuencas de Zonas Mineras” tiene como objetivos centrales los siguientes:

- Apoyar a los Municipios Mineros ubicados en microcuencas de actividad minera pequeña, en la prevención, mitigación y remediación de impactos ambientales negativos que se originan en actividades del sector minero, usando tecnologías de mitigación a través de módulos demostrativos, en el contexto de la realidad socio-económica local, es decir, utilizando la mejor tecnología disponible, que sea económicamente sostenible y socialmente viable, contribuyendo de esa manera en los procesos de desarrollo local.
- Promover el cumplimiento de las regulaciones ambientales vigentes, mediante la aplicación de incentivos técnicos y financieros, especialmente al Sub-sector de la Minería Chica y Cooperativizada.
- Planificar la ejecución de un plan de monitoreo y seguimiento para la fase de operación de la planta de tratamiento, orientado a una optimización y consolidación del proceso como método válido para su aplicación en otras microcuencas.

Unos de los objetivos específicos para el estudio de caso de Kumurana – La Lava dentro del Subproyecto 3-E son:

- Puesta en marcha y optimización operativa del sistema de tratamiento, mediante ajustes en los parámetros técnicos y económicos, que contribuyan en la sostenibilidad económica y social de del proyecto, a cargo de los beneficiarios.
- Introducción y aplicación de un plan de gestión ambiental local, orientado a promover la sostenibilidad del funcionamiento de las instalaciones, a través de la participación y concertación con los diferentes actores sociales involucrados.
- Definir una estrategia para apalancar la ejecución de futuros proyectos de prevención, mitigación, control y remediación de impactos ambientales orientados a completar el control ambiental integral dentro de la microcuenca Río Andacaba – Río La Lava, y que a su vez permita promover la planificación y ejecución de programas ambientales en otros centros mineros del sector de la Minería Chica y Cooperativizada de la zona.
- Validación de la tecnología propuesta y la difusión de los resultados y transferencia de la tecnología para futuros proyectos, pues en Bolivia no existen experiencias sobre diseño, construcción y operación de plantas de tratamiento de aguas en los Subsectores de la Minería

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

Chica y Cooperativizada. La validación de un sistema de tratamiento activo con cal es urgente y necesaria para planificar la ejecución de medidas de mitigación similares, tanto para la propia microcuenca como para la quebrada de Mina Andacaba y otros sitios contaminados del país, que confrontan limitaciones financieras para adquirir tecnología cara y donde la generación de alternativas para desarrollo local es una necesidad primordial.

1.3.2. Específicos de la investigación:

- Cuantificar la eficiencia de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava respecto de la eliminación de los minerales de metales pesados más importantes en estas aguas residuales como son el estaño (Sn), el plomo (Pb), el cadmio (Cd), el zinc (Zn), el cobre (Cu) y el hierro (Fe).
- Cuantificar la reducción de otros tóxicos que son originados en el contexto de la explotación del estalo en la Mina Santa Catalina como son el cianuro (CN⁻) y el arsénico (As).
- Cuantificar la reducción de otros contaminantes no específicamente originados por las actividades mineras como son los sales minerales disueltos (representados por el potencial mV) y los sólidos suspendidos (SST).
- Conocer la influencia del sistema descontaminadora al pH y a la temperatura del agua tratada.
- Averiguar si el elaborado sistema de un tratamiento activo de los efluentes de DAM y DAR de la Mina Santa Catalina alcanzan la calidad de agua necesaria para cumplir la Clase C de la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

2. La planta de tratamiento activo

El funcionamiento de una planta de tratamiento activo como en el caso de Kumurana – La Lava base en toda una secuencia de procesos tanto químicos, tanto físicos:

El método de tratamiento que se ajusta a las características del efluente de la mina Kumurana, es decir, elevada acidez ($\text{pH} < 3$) y contenidos de metales pesados (Fe, Zn, Cu, Pb y Cd) muy por encima de los límites permisibles, es el sistema convencional de tratamiento activo con cal, en la fuente; que comprende una primera etapa de neutralización de la acidez mediante adición de llechada de cal; continúa el proceso con la oxidación de los iones ferrosos a férricos mediante oxigenación por aireación natural en cascadas (procesos químicos); pasa a la fase de precipitación de los metales pesados en forma de compuestos estables en tanques de almacenamiento temporal (proceso físico), de donde son descargados en forma periódica a tanques de deshidratación y preparación de lodos semisecos para traslado hasta los sitios de disposición final. Las aguas residuales de la fase de precipitación pasan a un proceso de clarificación en una laguna de gran volumen y tiempo de retención, para garantizar la calidad de los efluentes de aguas tratadas, y proceder a su descarga en cursos de agua conectados a áreas de uso y consumo en las comunidades rurales del entorno con fines de riego. De esa manera se espera obtener una calidad de agua de Clase C, apta para riego.

Por lo tanto, se ha elegido un procedimiento convencional de tratamiento de aguas ácidas de mina, pero minimizando el uso de energía eléctrica y equipos que requieren un mantenimiento costoso. La mano de obra se ha reducido a lo estrictamente esencial, para preparación y control de alimentación de cal y descarga de lodos.

2.1. Procesos químicos

En los efluentes del socavón Santa Catalina existen varios compuestos de metales pesados, entre ellos los de mayor incidencia son el hierro, zinc, cobre, cadmio y plomo. Los minerales secundarios más comunes son:

- Melanterita ($(\text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zn}) \text{SO}_4(\text{H}_2\text{O})_7$)
- Herrumbre coloidal ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), que evoluciona en Goetita después de desecación
- Goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), que puede transformarse en hematitas y limonitas por efecto de la temperatura
- Ferrihidrita ($\text{Fe}_5\text{HO}_8(\text{H}_2\text{O})_4$ o $\text{FeO}(\text{OH})$)
- Brochantita ($\text{Cu}(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$)
- Antlerita ($\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$)
- Anglesita ($\text{Pb}(\text{SO}_4)$)
- Zincosita ($\text{Zn}(\text{SO}_4)$)

Los compuestos de metales pesados solubles más comunes en las cargas de los efluentes del socavón Santa Catalina son la pirita (FeS_2), la pirrotina (FeS), la esfalerita (ZnS), la galena (PbS) y arsenopirita (AsFeS). La presencia de metales pesados disueltos en el agua como iones en forma reducida significa una amenaza vital tanto para los ecosistemas afectados y sus biodiversidades, tanto para los seres humanos consumiendo dicho agua. La mayoría de estos iones metálicos afectan al metabolismo intra- y intercelular tanto de forma aguda, tanto de forma crónica.

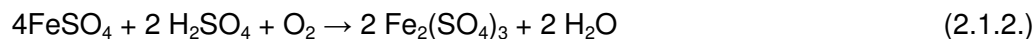
La eliminación de estos iones minerálicos se efectúa por la oxidación de estas especies reducidas y la neutralización del pH del agua ($\text{pH} > 3$), explicado a continuación en algunos ejemplos:

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

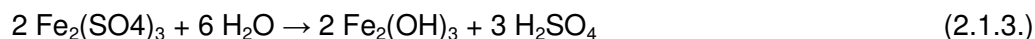
Descomposición oxidativa de la piritita (FeS_2):



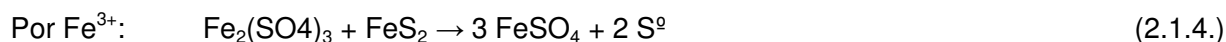
Formación de sulfato férrico:



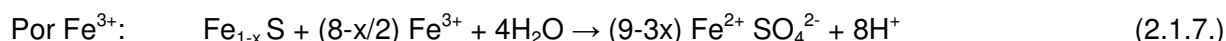
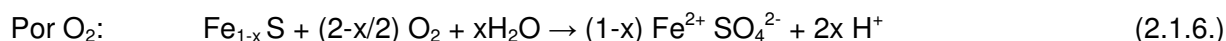
Formación de hidróxido férrico:



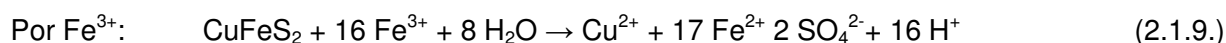
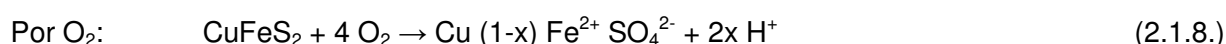
Interacción oxidante (reacción redox):



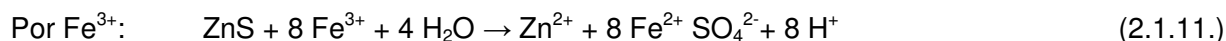
Descomposición oxidativa de la pirrotina (FeS):



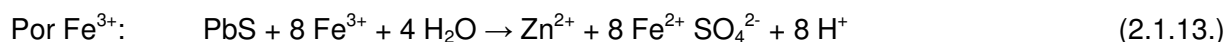
Descomposición oxidativa de calcopirita (CuFeS_2),



Descomposición oxidativa de la esfalerita (ZnS):



Descomposición oxidativa de la galena (PbS),



Descomposición de los compuestos iónicos por neutralización de los aguas ácidas por carbonato de calcio:



Los compuestos metálicos resultantes de estas reacciones son no solubles y en consecuencia precipitan en el curso del proceso.

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

La suma total de estos minerales metálicas alcanza a 87mg/L, que son equivalentes a una carga diaria de 127,8kg. Para llegar a los límites permisibles se debe precipitar y eliminar casi el 99% de estos contenidos, o sea 126,5kg/d.

Para efectos de cálculo se asume que la cantidad de precipitado es aproximadamente el doble en peso en relación con los contenidos de metales disueltos en el agua ácida, a menos que se maneje una precipitación controlada y parcial. Bajo estas consideraciones la cantidad de precipitado que se forma por día, utilizando un factor 2,3 es aproximadamente $126,5\text{kg/d} \cdot 2,3 = 290,95\text{kg/d}$ de precipitados de metales pesados.

Se debe considerar que al menos el 70% del sulfato de calcio (yeso), que se produce en las reacciones de neutralización, formarán parte del precipitado, los restantes 30% quedan en la solución como iones disueltos de Ca^{2+} y Mg^{2+} . En consecuencia, de los 230kg de cal empleada, aproximadamente 161kg pasaran a formar parte del precipitado. De este modo el peso total de precipitado alcanza a 452kg/d.

2.2. Procesos físicos

Los procesos físicos en una planta de tratamiento activo como en el caso de Kumurana – La Lava son por un lado la sedimentación por gravedad de los minerales contaminantes durante el periodo de almacenamiento en los tanques de sedimentación y en la laguna de clarificación y por otro la decantación y la evacuación del agua de esta manera purificada.

Lo que interesa más para determinar el dimensionamiento de los tanques de sedimentación y la laguna de clarificación es el tiempo de sedimentación $t_{\text{sed.}}$ en cada uno de estos sistemas, para conocer el limite de cargamento con aguas negras, es decir el caudal máximamente permisible para que el tiempo de sedimentación $t_{\text{sed.}}$ no sobrepase el tiempo de retención $t_{\text{ret.}}$ de estos dos cuerpos de agua. El tiempo de sedimentación $t_{\text{sed.}}$ obviamente depende de la velocidad de sedimentación $v_{\text{sed.}}$ y de la profundidad de la capa de agua recorrido por las partículas suspendidas en proceso de sedimentación h , la que en el caso de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava asciende a 3,25m en promedio en los tanques de sedimentación y a 1,8m en la laguna de clarificación:

$$t_{\text{sed.}} = \frac{h}{v_{\text{sed.}}} \quad [\text{seg.}] \quad (2.2.1.)$$

La sedimentación de partículas suspendidas en aguas estancadas como es el caso en un tanque de sedimentación o en una laguna de clarificación tiene lugar de forma laminar, es decir no turbulente. Bajo estas condiciones, para calcular la velocidad de sedimentación por gravedad $v_{\text{sed.}}$, la cual está relacionada al tamaño de las partículas suspendidas, es decir sus radios r , se sirve de la ley de Stokes:

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

Ley de Stokes:
$$v_{sed.} = \alpha \cdot B \cdot r^2$$

$$= \alpha \cdot \frac{2g(\rho_s - \rho_w)}{9\mu} \cdot r^2 \quad [\text{mseg.}^{-1}] \quad (2.2.2.)$$

Con:

α := Factor de forma (para esferas $\alpha = 1$) []
 g := Constante gravitacional = 9.814 [mseg.⁻²]
 ρ_s := Densidad de la partícula (para cuarzo $\rho_s = 2650$) [kgm⁻³]
 ρ_w := Densidad del agua = 998 [kgm⁻³]
 μ := Viscosidad dinámica del fluido (para agua $\mu = 10^{-3}$) [kgm⁻¹seg.⁻¹]

Esta formula aplicada a distintos radios de partículas nos da los tiempos de sedimentación anotados en la Tabla 1.

Tabla 1: Velocidades y tiempos de sedimentación laminar

r [mm]	Descripción	v_{sed} [cmseg ⁻¹]	$t_{sed,180cm}$ [h]	$t_{sed,325cm}$ [h]
1	Arena	360	0.00014	0.00025
0.5		90	0.0006	0.001
0.4		58	0.0009	0.002
0.3		32	0.0015	0.003
0.2		14	0.003	0.006
0.1	Arena fina	4	0.014	0.025
0.05		0.9	0.06	0.1
0.01	Arcilla	0.036	1.4	2.5
0.005		0.009	6	10
0.001	Bacteria	0.00036	139	251
0.0005		0.00009	555	1002
0.0001	Partícula coloidal	0.0000036	13878	25057

Fuente: <http://www.eng.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/SEDIMENT/sedsettle.html>

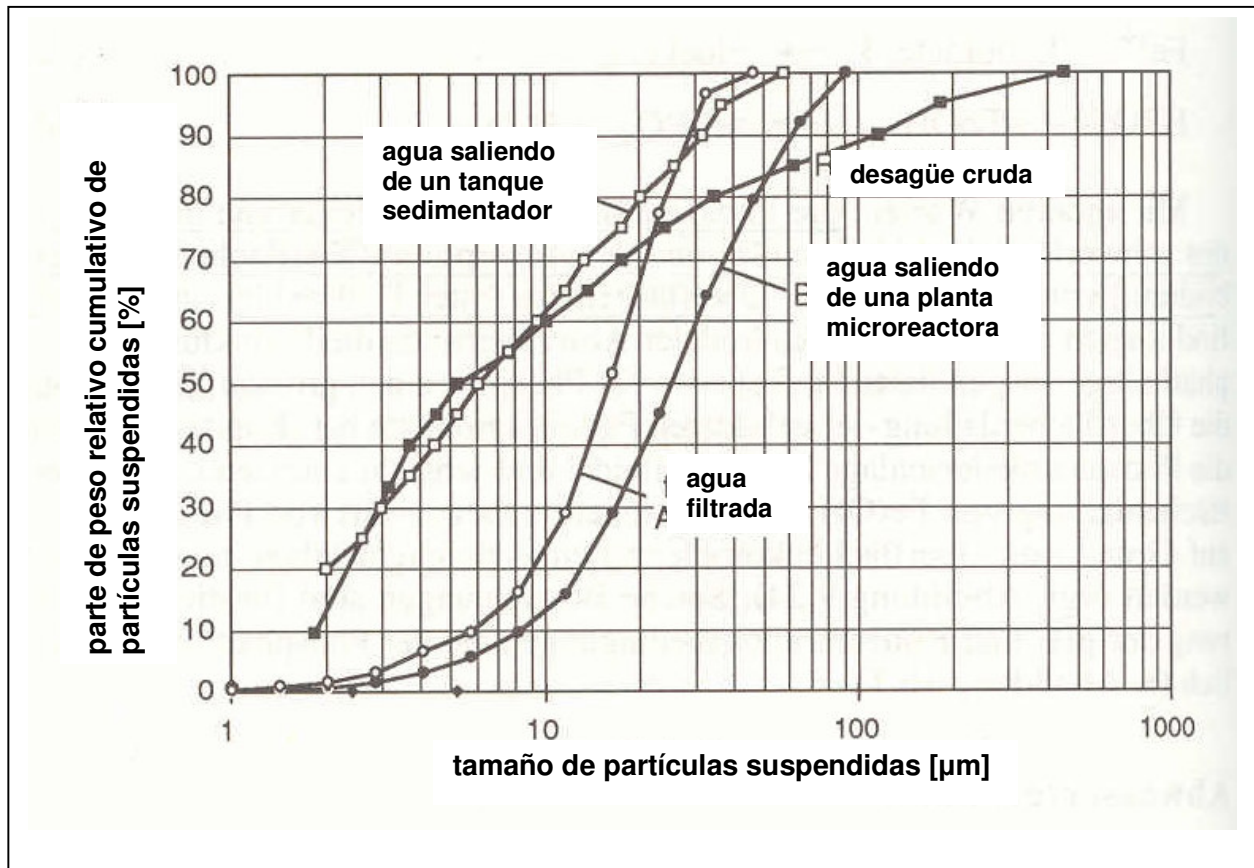


Figura 2: Distribución de frecuencia de tamaños de partículas suspendidas en aguas contaminadas (fuente: L. Sigg y W. Stumm).

En la Figura 2 reconocemos que las partículas de interés son las de un radio entre $10\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$, pues abarcan entre 60% y 90% del total de la carga suspendida en desagües crudos. Para este rango de volumen podemos notar que las partículas suspendidas en el agua almacenada en los tanques de sedimentación y en la laguna de clarificación de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava tienen tiempos de sedimentación entre algunas horas y al rededor de una semana (ver Tabla 1).

La decantación de agua no es realmente un proceso físico, sino más bien una metodología que se sirve del fenómeno físico, que partículas suspendidas en un cuerpo de agua estancado siguen sedimentando por la atracción gravitacional de la tierra. Este hecho conduzca a la situación que la densidad de las partículas suspendidas disminuye con la altura de la capa de agua en el cuerpo de agua en su totalidad. De esta manera, el grado de pureza del agua estancada aumenta en las capas superficiales. Este efecto se utiliza por la decantación de modo de que este agua purificada en la capa superficial de un ancho de algunos centímetros se separa por un sistema de evacuación superficial, en este caso por las cachimbass, de las capas de agua más profundas que muestran una densidad de sustancias contaminantes más elevada.

2.3. Funcionamiento técnico

El funcionamiento técnico de una planta de tratamiento activo como en el caso de Kumurana – La Lava base en varios pasos parciales fundamentales (ver Figura 3 y para ilustraciones fotográficas cap. 6.3.) que se van a explicar en detalle a continuación:

- Separación de los sólidos suspendidos (tratamiento físico)
- Dosificación y preparación de llechada de cal, a partir de cal viva
- Neutralización de la acidez mediante llechada de cal (tratamiento químico, ajuste de pH)
- Oxidación de iones ferrosos a férricos, precipitación y sedimentación de metales pesados (tratamiento físico-químico)
- Descarga, almacenamiento temporal para deshidratación y disposición final de lodos de compuestos secundarios de metales pesados
- Conducción de las aguas tratadas hasta el sistema de almacenamiento, distribución y uso por parte de grupos de beneficiarios

Las obras civiles constan fundamentalmente de una planta de cal, un canal de conducción de agua, dos tanques de precipitación de lodos, una laguna de clarificación de aguas con sistema de cachimbas para evacuación del agua tratada, un sistema de tanques de almacenamiento temporal de lodos para deshidratación, una laguna auxiliar de acumulación de lodos, un tanque de concreto para almacenamiento de agua tratada, sistema de tuberías y cajones de distribución.

La separación de sólidos suspendidos comprende la retención y almacenamiento de partículas finas suspendidas y material de arrastre de arenas y limos que llegan a la planta junto con el agua de mina. En el presente proyecto, la retención de sólidos sedimentables, que son mínimos, se lleva a cabo en un tanque ubicado al inicio del proceso, simultáneamente con la alimentación de llechada de cal. De esta manera los sólidos suspendidos son removidos junto con los residuos de cal.

En seguida, el agua, ensuciado principalmente por minerales suspendidos y metales pesados solubles por razón de un pH muy bajo, está sometido a la neutralización de su acidez por el añadido de carbonato de calcio (CaCO_3), en uso del idioma común denominado también como cal. Una vez dosificada la alimentación de llechada de cal, el agua es conducida por un canal abierto, hasta los tanques de precipitación y sedimentación de lodos de metales pesados. En la parte más inclinada de dicho canal se forman cascadas que facilitan una buena aireación, la que promueve la oxidación del hierro ferroso (Fe^{2+}) a hierro férrico (Fe^{+III}). Como el hierro férrico en diferencia al hierro ferroso forma compuestos estables, es decir complejos no solubles sobre todo con carbonato (CO_3^{2-}) (ver cap. 2.1.), de esta manera se logra iniciar la fase de precipitación.

El agua neutralizada entonces ingresa a dos tanques de sedimentación instalados en serie, en la parte interior de la laguna de Chaqui Kocha, con la finalidad de facilitar la precipitación y el almacenamiento temporal de los lodos. El rebose de los tanques de precipitación pasa a una laguna de clarificación de gran volumen, donde se sedimentan los lodos remanentes, permitiendo la obtención de una calidad de agua de Clase C, apta para riego.

El agua superficial del cuerpo de agua almacenado en la laguna de clarificación está evacuada por medio de decantación por un sistema de cachimbas y alcantarilla que atraviesa toda la laguna en una longitud de 150 metros de largo. Este agua tratada, antes de ser evacuada al curso del Río Kumurana, es conducida mediante cañería y canaleta hasta un tanque de almacenamiento y distribución instalada cerca de tomas de agua para sistemas de riego existentes.

En los cuerpos de agua de funcionalidad de facilitar la sedimentación de los sólidos suspendidos y los metales pesados precipitados, el agua se tiene que almacenar mientras un periodo adecuado respecto al tiempo de sedimentación necesitado en un cierto cuerpo de agua. Eso significa que el tiempo de retención del agua en un cierto cuerpo de agua considerado tiene que ser mayor al tiempo de sedimentación promedio:

$$t_{ret.} \geq t_{sed.} \quad (2.3.1.)$$

El tiempo de retención de agua en un cierto cuerpo de agua se deduce del volumen de almacenamiento $V_{eff.}$ de dicho agua y del caudal promedio anual $Q_{prom.}$, por lo cual este cuerpo de agua está transfluído. Con los valores indicados en la Figura 3 se puede calcular:

$$t_{ret.} = \frac{V_{eff.}}{Q_{prom.}} \quad (2.3.2.)$$

Calculando con un volumen de almacenamiento $V_{eff.}$ de $320m^3$ para los tanques de sedimentación y de $18'000m^3$ para la laguna de clarificación, se determina un tiempo de retención $t_{ret.}$ promedio del agua en los tanques de sedimentación de 5,2 horas y en la laguna de clarificación de más de 12 días antes de ser decantado.

El tiempo de sedimentación $t_{sed.}$ por el otro lado se deduce del tamaño de los partículas suspendidas y de la profundidad del cuerpo de agua recorrido por las partículas como ya explicado anteriormente en el capítulo 2.2. Para el rango de partículas de interés (0,01mm - 0,001mm), en consecuencia resulten tiempos de sedimentación de 2.5 horas a 10 días para los tanques de sedimentación y de 1,4 horas a 6 días en la laguna de clarificación.

Ya que el valor del tiempo de retención sobre todo en caso de la laguna de clarificación $t_{ret., lag}$ es mucho mayor que el tiempo de sedimentación correspondiente $t_{sed., lag}$ de las partículas suspendidas de interés en las desagües crudas, se puede partir de que la gran mayoría de los metales pesados y minerales contaminantes serán eliminados por sedimentación por gravedad después de ser precipitado. En el caso de la laguna de clarificación, donde el agua está evacuado por decantación por un sistema de cachimbos sólo de la capa superficial de algunos centímetros de ancho, el efecto de purificación será además mayor.

Los lodos de los tanques de precipitación son descargados periódicamente a otra laguna natural, para deshidratación y transporte hasta sitios de disposición final. Paralelamente se dispone de estanques, construidos para alternar las descargas de lodos. De estos tanques se realiza el carguío y transporte de los lodos semisecos hasta los lugares de disposición final establecidos, los que pueden ser depósitos de colas del ingenio, es decir dique de colas o lagunas de sedimentación, fosas naturales o construidas con capas intermedias de tierra o huecos de interior de la mina, que tengan las condiciones de aislamiento y un régimen hidráulico controlado. La opción más barata en el caso de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava es descargar los lodos en un dique de colas o acumular en fosas naturales, en puntos de la quebrada donde no hay actividades que pueden afectar su estabilidad física y química.

En respecto del almacenamiento de los lodos acumulados se debe tomar en cuenta que estos compuestos secundarios en contacto con aguas ácidas vuelven a disolverse y pueden propagarse con flujos de drenaje ácido. Por lo tanto, el factor más determinante para su disposición es evitando contacto con aguas de mina o drenajes de roca. Por eso es vital cubrir los lodos por capas de tierra estéril del lugar, hasta llegar a colmatar la fosa, para luego impermeabilizar con una cobertura de arcilla y geomembrana.

El control operativo es fundamental para que funcione correctamente el sistema de tratamiento activo. Asimismo se dotara de los materiales necesarios para realizar trabajos de muestreo para control operativo y monitoreo ambiental. El control del proceso se realiza en forma combinada,

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

manual y mecanizada; para regular el pH y la adición de llechada de cal se dispone de una cuba de dosificación, donde se disuelve una cantidad de cal viva equivalente a un día de consumo. La fracción de cal que reacciona pasa en forma de llechada a un tanque agitador, y de este a un alimentador giratorio de disco que permite una alimentación regular, con una concentración estable y homogénea. Se dispone de un registrador continuo de pH con un electrodo sumergible, que coayudará en los trabajos de control operativo y en trabajos de evaluación. El alimentador electro-mecánico de llechada de cal y el medidor de pH son los instrumentos más esenciales de la planta de caleo, por lo que estarán en un ambiente cerrado y seguro, por razones de seguridad contra los cambios climáticos y seguridad física de las instalaciones. Por otro lado, las descargas de lodos, su almacenamiento y transporte se realizan en forma manual. Sin embargo, se tiene una capacidad de acopio que puede durar hasta un mes.

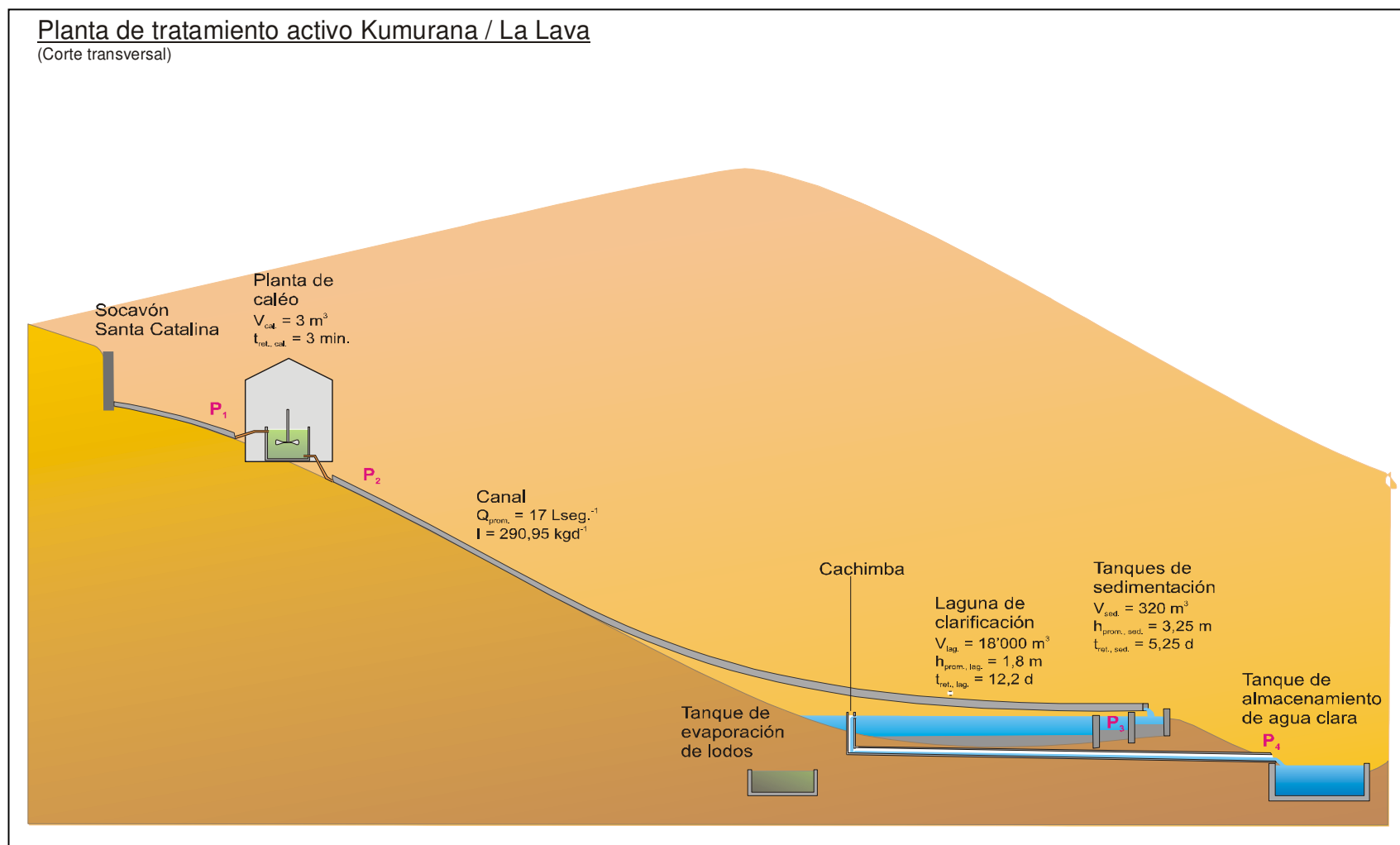


Figura 3: Esquema de funcionamiento de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava: Separación de los sólidos suspendidos, dosificación y preparación de lechada de carbonato de calcio, neutralización de la acidez mediante lechada de cal (tratamiento químico, ajuste de pH), oxidación de iones ferrosos a férricos en un canal de aireación, precipitación y sedimentación de metales pesados (tratamiento físico-químico) en los tanques de sedimentación y en la laguna de clarificación, descarga, almacenamiento temporal para deshidratación y disposición final de lodos de compuestos secundarios de metales pesados y conducción de las aguas tratadas hasta el sistema de almacenamiento, distribución y uso por parte de grupos de beneficiarios (ilustraciones fotográficas ver cap. 6.3.). Las muestras de agua se tomaron en los dos puntos P_1 , P_2 , P_3 y P_4 .

3. Campaña de investigación

3.1. Metodología

3.1.1. Muestreo

En el plan de muestreo existen cuatro puntos de muestreo, uno a la fuente de alimentación de la planta de caléo, el segundo a su salida, el tercero a la entrada del agua químicamente tratada al sistema de sedimentación y el último a la salida de ese sistema (ver Figura 3):

- Punto de medición 1 (P_1): Entrada a la planta de caléo.
- Punto de medición 2 (P_2): Salida de la planta de caléo.
- Punto de medición 3 (P_3): Entrada al sistema de sedimentación.
- Punto de medición 4 (P_4): Salida del sistema de sedimentación.

Se recogió una muestra de agua en cada punto para análisis de todos los parámetros (**caudal, plomo, cadmio, zinc, cobre, hierro, estaño, cianuro, arsénico, sólidos suspendidos, pH, potencial mV y la temperatura**) en un intervalo de tiempo de 10 días durante 30 días (ver Tabla 2 – Tabla 5). La frecuencia de muestreo se determinó en respecto del tiempo de retención del agua en la presa de colas, que se estimó en un promedio de más de 10 días (ver cap. 2.3.).

3.1.2. Métodos de muestreo

La lista de métodos y procedimientos a ser usados en el campo y en el laboratorio y los límites de detección de los diferentes métodos individuales son:

Determinación del pH, del potencial mV y de la temperatura

La acidez / alcalinidad se determina generalmente por método potenciométrico midiendo la concentración de H^+ iones hidrógenos de forma instrumental empleando un pH-metro. Igualmente de forma potenciométrica se define el potencial mV la totalidad de los iones negativos suspendidos en el agua.

Equipo de medición:

- Equipo pH/mV Handylab SCHOTT, rango del pH-metro: -2 a 16, precisión: ± 1 dígito, resolución: 0.01.
- Accesorios: Electrodo combinado de medición de pH, solución KCl 3mol/L (300L) para conservar el electrodo.

Procedimiento:

Se limpia el electrodo de medición combinada de pH / potencial mV con agua destilado. Se mide el pH, el potencial mV y la temperatura del agua esperando que la se estabilice la lectura. Después de utilizarlo se enjuaga otra vez con agua destilada.

Determinación de los otros parámetros químicos y microbiológicos

Todo los otros parámetros químicos, es decir las concentraciones del plomo (Pb), del cadmio (Cd), del zinc (Zn), del cobre (Cu), del hierro (Fe), del cianuro (CN⁻), del estaño (Sn) y del arsénico (As) y

además de los sólidos suspendidos (SST) en las muestras de agua fueron analizados por el laboratorio SGS ENVILAB (Société Générale de Surveillance), zona 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro, El Alto, Bolivia. Las muestras de agua fueron guardados a temperaturas entre 1 y 4 °C hasta se les entregó al laboratorio unos días después de la toma de muestras.

3.2. Cronograma del seguimiento

Para tener valores representativos del funcionamiento de la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava por el programa de monitoreo, se escogió un intervalo de tiempo de diez días para medir los parámetros químicos de las aguas negras, tomando en los puntos de medición P_1 , P_2 y P_3 cada vez una muestra de agua en la mañana y otra en la tarde y en el punto de medición P_4 cada vez sólo una muestra en la tarde. Las mediciones serán replicadas totalmente en tres días, abarcando de esta manera un periodo de un mes (ver Tabla 2 a Tabla 5).

Eso se justifica, por un lado por el tiempo de retención promedio del sistema que se estima en poco más de 10 días, por otro lado por el periodo de monitoreo que tiene que extenderse a un tiempo bastante largo para nivelar las fluctuaciones estadísticas diarias y/o semanales por razón de las actividades mineras variables en el tiempo.

3.3. Reporte del seguimiento

Las muestras fueron tomadas por el Sr. Ernesto Flores, especialista contratado por la Fundación MEDMIN, exactamente según el cronograma del seguimiento explicado en el capítulo anterior y enviadas en seguida al laboratorio del SGS ENVILAB (Société Générale de Surveillance), donde se hicieron analizar no más que dos días después de la toma de muestra. Este retraso entre el momento de la toma de muestra hasta el análisis de las diferentes sustancias evaluadas fue dado por la problemática del transporte desde Kumurana a La Paz, que en general, por razón del estado parcialmente malo de la carretera Potosí – Oruro, necesitaba este tiempo. Pero de toda manera, científicamente no impone un problema, pues las sustancias analizadas bajo las condiciones dadas no se reducen ni biológicamente ni físicamente o químicamente.

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

Tabla 2: Cronograma de seguimiento de la campaña de medición en la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava; punto de medición 1

Entrada a la planta de caleo (P₁):

Día	Fecha	Pb ₁ [μg L ⁻¹]	Cd ₁ [μg L ⁻¹]	Zn ₁ [mg L ⁻¹]	Cu ₁ [mg L ⁻¹]	Fe ₁ [mg L ⁻¹]	Sn ₁ [μg L ⁻¹]	Cn ₁ [μg L ⁻¹]	As ₁ [μg L ⁻¹]	SST ₁ [mg L ⁻¹]	pH ₁	Pot. ₁ [mV]	T ₁ [°C]
0	25.01.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
0	25.01.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	04.02.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	04.02.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20	14.02.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20	14.02.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tabla 3: Cronograma de seguimiento de la campaña de medición en la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava; punto de medición 2

Salida de la planta de caleo (P₂):

Día	Fecha	Pb ₂ [μg L ⁻¹]	Cd ₂ [μg L ⁻¹]	Zn ₂ [mg L ⁻¹]	Cu ₂ [mg L ⁻¹]	Fe ₂ [mg L ⁻¹]	Sn ₂ [μg L ⁻¹]	Cn ₂ [μg L ⁻¹]	As ₂ [μg L ⁻¹]	SST ₂ [mg L ⁻¹]	pH ₂	Pot. ₂ [mV]
0	25.01.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
0	25.01.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	04.02.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	04.02.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20	14.02.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20	14.02.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tabla 4: Cronograma de seguimiento de la campaña de medición en la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava; punto de medición 3

Entrada al sistema de sedimentación (P₃):

Día	Fecha	Pb ₃ [μg L ⁻¹]	Cd ₃ [μg L ⁻¹]	Zn ₃ [mg L ⁻¹]	Cu ₃ [mg L ⁻¹]	Fe ₃ [mg L ⁻¹]	Sn ₃ [μg L ⁻¹]	Cn ₃ [μg L ⁻¹]	As ₃ [μg L ⁻¹]	SST ₃ [mg L ⁻¹]	pH ₃	Pot. ₃ [mV]	T ₃ [°C]
0	25.01.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
0	25.01.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	04.02.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	04.02.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20	14.02.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20	14.02.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tabla 5: Cronograma de seguimiento de la campaña de medición en la planta de tratamiento activo Kumurana – La Lava; punto de medición 4

Salida del al sistema de sedimentación (P₄):

Día	Fecha	Pb ₄ [μg L ⁻¹]	Cd ₄ [μg L ⁻¹]	Zn ₄ [mg L ⁻¹]	Cu ₄ [mg L ⁻¹]	Fe ₄ [mg L ⁻¹]	Sn ₄ [μg L ⁻¹]	Cn ₄ [μg L ⁻¹]	As ₄ [μg L ⁻¹]	SST ₄ [mg L ⁻¹]	pH ₄	Pot. ₄ [mV]	T ₄ [°C]
0	25.01.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
0	25.01.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	04.02.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	04.02.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20	14.02.04 9 a.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
20	14.02.04 5 p.m.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

4. Interpretación de Resultados Obtenidos

4.1. Parámetros de referencia

Para ganar una primera vista del agua contaminada que sea purificada química (por la lechada de cal) y física (en los tanques de sedimentación y en la laguna de clarificación) en la planta de tratamiento Kumurana – La Lava se presenta primeramente algunos parámetros de referencia como el pH, la temperatura, el contenido de aniones minerales y de sólidos suspendidos. Estas informaciones ya nos facilitan una imagen vaga de la calidad del agua y de los procesos químico-físicos más básicos que tienen lugar en el curso del tratamiento.

4.1.1. Acidez / alcalinidad

El pH, es decir la concentración de los iones hidrógenos (H^+), indica la acidez (pH 1 a 7) o la alcalinidad (pH 7 a 14) de un cuerpo de agua. Dependiendo del tipo de roca predominante en una cierta región, el agua natural puede mostrar un pH de 6 (en áreas de piedra silicato) hasta pH 8 (en áreas de piedra caliza). La alteración del pH tanto por debajo, por influencia de desagües industriales ácidos, como por encima de este rango natural, por razones de contaminación provenientes de residuos humanos y detergentes, impacta la integridad de los sistemas ecológicos y también a la salud del ser humano. La acidez o la alcalinidad del agua que llega a la planta de tratamiento nos da entonces una idea de su procedencia y del tipo de contaminación que se va a encontrar en los otros parámetros químicos presentados en los siguientes capítulos. La estabilización del pH alrededor de 7 por el otro lado nos muestra la eficiencia de la capacidad de buffer de un cierto ecosistema (para más información: ver cap. 6.1.).

Evaluando el curso del pH en el agua tratada en la Figura 4, se reconoce un aumento de pH significativo desde la salida del agua ácida del socavón de la Mina Santa Catalina, donde tiene un pH promedio de 3,3, hasta la salida del agua tratada químicamente en la planta de caléo, donde muestra en promedio un pH de 10,2, es decir el contenido de ácidos más bajo en toda la secuencia del tratamiento. Desde este punto, la acidez del agua tratada aumenta otra vez a un pH promedio de 8,2 en el último tanque de sedimentación y a pH 6,2 en la salida del agua tratada de la laguna de clarificación. En el mismo curso las fluctuaciones de los valores de pH primero aumentan de $\pm 0,10$ en el punto 1 hasta $\pm 1,06$ en el punto 2 y $\pm 1,19$ en el punto 3 de medición, desde donde las desviaciones de las mediciones se reducen hasta $\pm 0,55$ en el punto 4 de medición. Estos hechos conjuntos se pueden interpretar por un lado como una clara elevación del pH por el tratamiento con cal neutralizante y por el otro lado como una suave estabilización del pH por la sedimentación de los diferentes contaminantes de estas aguas negras en los tanques de sedimentación y en la laguna de clarificación.

La normativa ambiental boliviana pide para aguas potables (clase "A" para consumo humano) un pH entre 6,0 y 8,5. Como el agua que sale de la planta de tratamiento no es destinada al consumo humano, sino más bien servirá para el riego de las chacras alrededor de la comunidad de Kumurana, para fines de este informe se utiliza la clase "C" (agua de riego) del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), la cuál permite una fluctuación del pH entre 6,0 y 9,0, como se observa en la Figura 4. El agua que sale de la planta de tratamiento, con un promedio de 6,2, cumple los límites permisibles tanto de la clase "C", como los de la clase "A". Además hay que mencionar que el agua que sale directamente de la Laguna Santa Catalina al pie de la Mina Santa Catalina, afectada por numerosos proyectos de minería alrededor de esta laguna, baja el valle con un pH muy por debajo de este límite inferior y hasta ahora, por ignorancia de su contaminación, está usada por la gente de la comunidad Kumurana como mayor recurso hídrico para el riego de sus chacras.

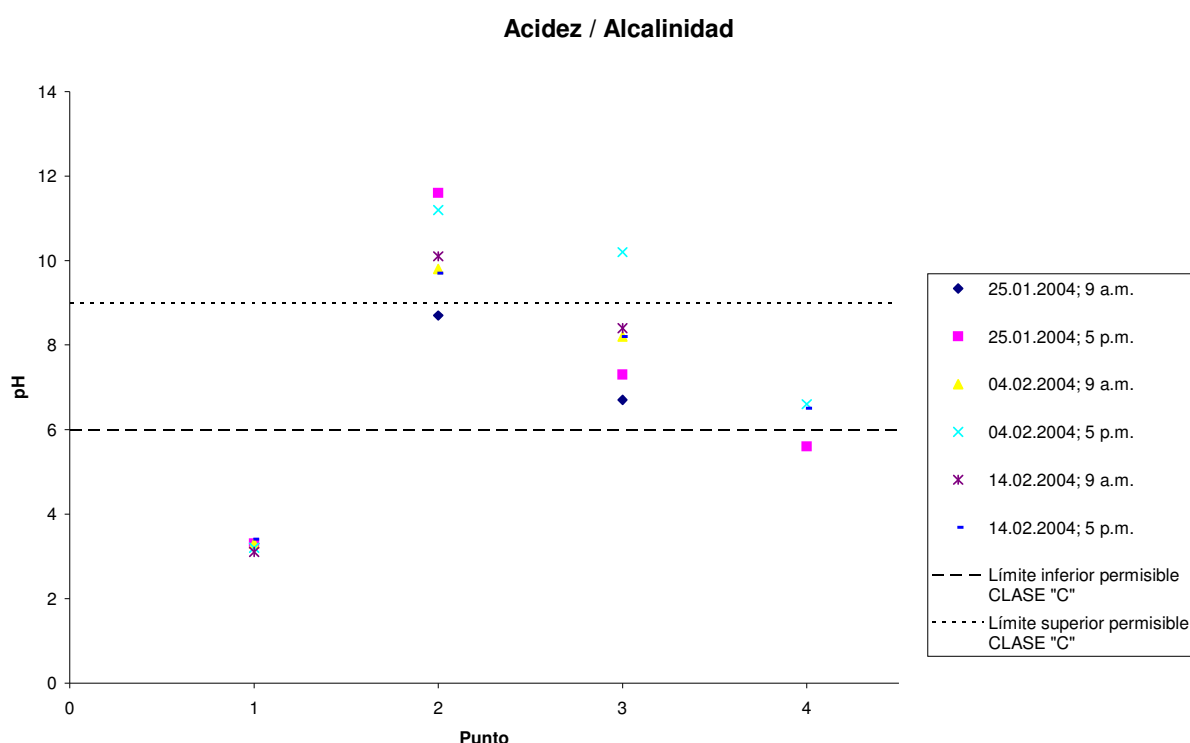


Figura 4: Los valores de pH, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

4.1.2. Temperatura

La temperatura de un cuerpo de agua natural es el parámetro físico más importante de un ecosistema acuático, porque la temperatura influye directamente todos los procesos microbiológicos y químicos: por ejemplo, en aguas estancadas (mar, lagos y humedales) regula el crecimiento de la masa biológica que vive en el agua, y en aguas corrientes, influye la saturación de oxígeno. Con temperaturas elevadas, el crecimiento biológico aumenta proporcionalmente y el punto de saturación de gas baja.

Evaluando el curso de la temperatura en el agua tratada en la Figura 5, se observa que el agua que sale de la Mina Santa Catalina está significativamente alterada en su temperatura, mostrando un promedio de 3,9°C con una fluctuación de $\pm 0,3^\circ\text{C}$. En el curso de la purificación del agua contaminada, la temperatura aumenta después del tratamiento químico sólo ligeramente a 4,1 °C en promedio con una fluctuación igualmente baja de $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Sin embargo, por el tratamiento en los tanques de sedimentación y en la laguna de clarificación, la temperatura está fuertemente elevada hasta que tiene 10,0°C en promedio y una fluctuación de $\pm 0,6^\circ\text{C}$, saliendo de la cachimba de la laguna de clarificación. Aparentemente, la influencia en la temperatura más grande tienen los tanques de sedimentación, mostrando una fluctuación de $\pm 3,6^\circ\text{C}$. Eso significa que los tanques de sedimentación provocan un calentamiento del agua tratada por la radiación solar y la laguna de

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

clarificación al mismo tiempo asegura la estabilización de la temperatura del agua superficial alrededor de los 10 °C.

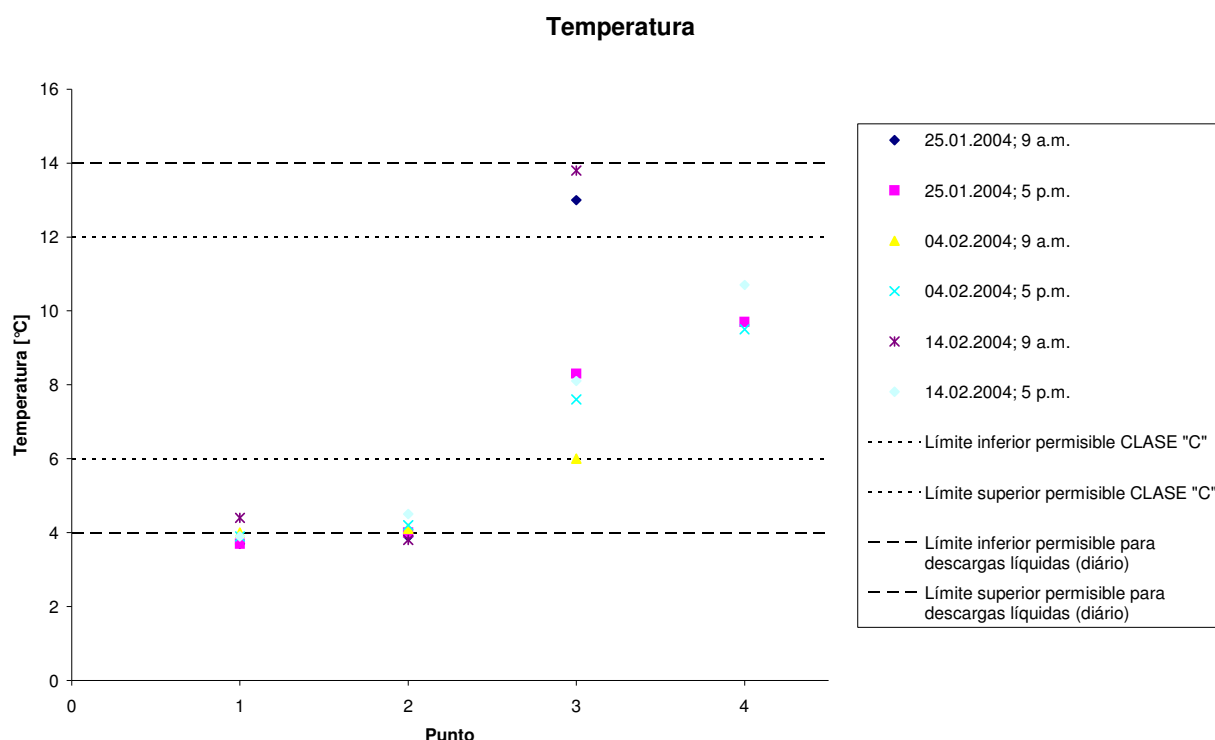


Figura 5: Los valores de temperatura, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

La Ley de Medio Ambiente Boliviana exige para desagües de la clase "C" que la alteración de temperatura máxima es de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ con respecto a la temperatura del cuerpo de agua receptor y para descargas líquidas una variación de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Partiendo de que el agua superficial de la Laguna Santa Catalina, de donde baja el Río Kumurana, cuerpo de agua receptor del agua tratada de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava, muestra un promedio anual de aproximadamente 9°C ², se puede anticipar que el agua tratada cumple absolutamente y en todos los momentos los límites permisibles tanto de la clase "C", como los para descargas líquidas.

4.1.3. Sales minerales disueltos

La concentración de iones de sales disueltos en el agua (principalmente con carga negativa) se representa por el potencial (mV) del agua. Este parámetro nos presta información muy general sobre la carga total del agua con diferentes minerales inorgánicos que pueden tener origen natural,

² Hay que tener en cuenta, que también el agua superficial de la Laguna Santa Catalina muestra fluctuaciones de temperatura dependiente de la radiación solar de cada época.

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

sin embargo también puede ser resultado de las actividades mineras que contaminan el agua con todo tipo de minerales. Pues los iones de los sales disueltos no necesariamente tienen que ser tóxicos (como p. ej. el Cl^- del sal de mesa o el HCO_3^- del carbono natural), este parámetro sin embargo no nos brinde ninguna información sobre el grado de toxicidad aguda o crónica del agua analizado.

Evaluando el potencial en la Figura 7, se observa que por el tratamiento químico, la carga del agua con aniones en promedio asciende de 1,25mV en el agua que sale de la Mina Santa Catalina hasta 1,33mV en el agua que sale de la planta de caléo, lo que sobre todo puede ser relacionado al aumento de iones hidróxidos (OH^-) por la elevación abrupta del pH (ver cap. 4.1.1.). Después de este punto, la concentración de aniones minerales en el agua tratada disminuye linealmente hasta 0,77mV en el agua que sale de la laguna de clarificación. La fluctuación en los valores medidos aumenta de $\pm 0,179\text{mV}$ en el agua que entra a la planta de tratamiento a $\pm 0,184\text{mV}$ en el agua que sale del sistema de caléo. Desde este punto, la fluctuación del potencial mV va disminuyéndose a $\pm 0,140\text{mV}$ en promedio en el último tanque de sedimentación y a $\pm 0,029\text{mV}$ en el agua que sale de la laguna de clarificación. La reducción del total de sales minerales suspendidas en el agua alcanzada por la planta de tratamiento Kumurana – La Lava acaba -39%.

La Ley de Medio Ambiente Boliviana, por razones anteriormente explicadas, no conoce ningún límite permisible para la carga total de aniones minerales en el agua, de manera que este criterio, en el caso del potencial mV, no sea evaluado.

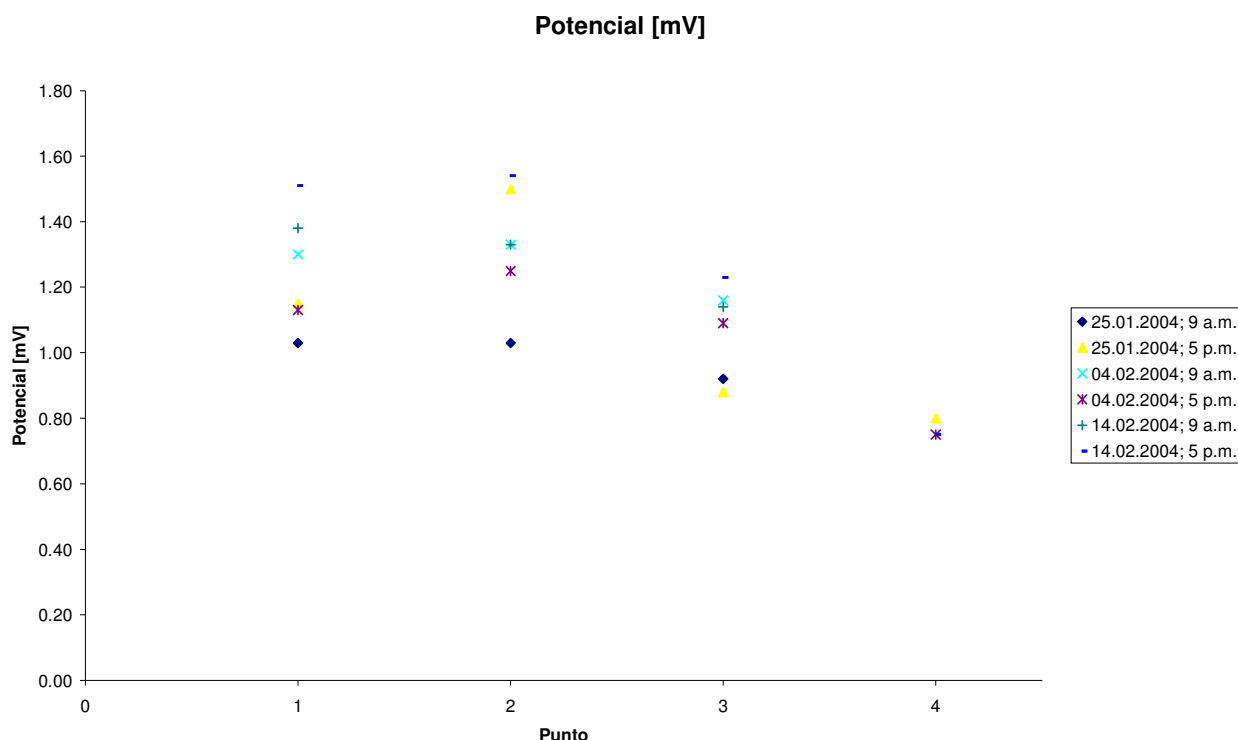


Figura 6: Las concentraciones de sólidos suspendidos, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava.

4.1.4. Sólidos suspendidos

La cantidad de sólidos suspendidos (SST) de materia tanto orgánica como inorgánica representa el grado de turbidez del agua. En aguas estancadas, este parámetro influye el funcionamiento de un ecosistema acuático de dos maneras principales: por un lado, en épocas de productividad biológica, la turbidez del agua superficial disminuye la actividad fotosintética (para más información: ver cap. 6.1.), lo que significa una reducción de la producción de oxígeno en esta capa de agua. Por otro lado, la presencia de materia orgánica aumenta el consumo bacterial de oxígeno disuelto en los niveles más profundos del cuerpo de agua, lo que puede llevar a estas capas de agua hasta un estado anóxico. En respecto al consumo humano, una concentración de sólidos suspendidos aumentada significa una reducción en la calidad del agua potable.

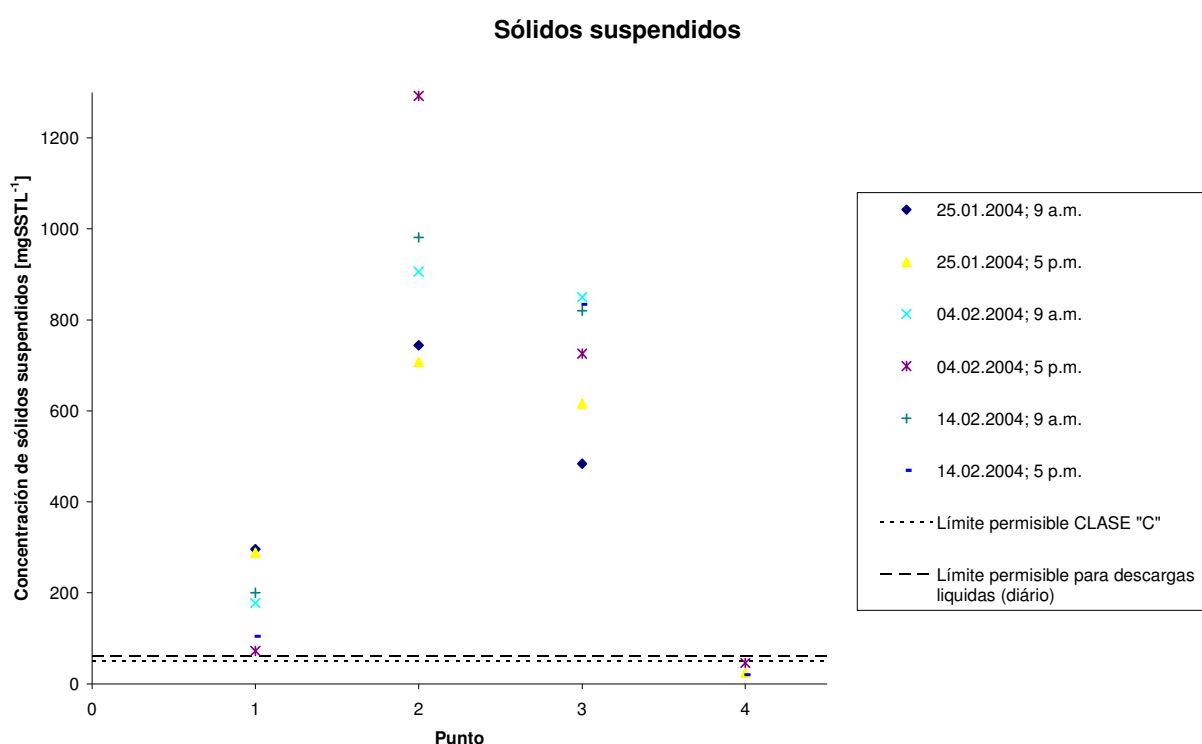


Figura 7: Las concentraciones de sólidos suspendidos, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

Evaluando el curso de la carga de sólidos suspendidos en el agua tratada en la Figura 7, se observa que por el tratamiento químico, la turbidez del agua en promedio aumenta de 190mgSST/L en el agua que sale de la Mina Santa Catalina hasta casi 1200mgSST/L en el agua que sale del tratamiento con cal. Obviamente, mostrando la fluctuación más alta en los valores de turbidez con ± 460 mgSST/L, el contenido de sólidos suspendidos en el agua que sale de la planta de caléo depende fuertemente del pH y también de la concentración de los diferentes metales pesados en el agua que sale de la mina. Después de este punto, la turbidez del agua tratada se disminuye rápidamente a 720mgSST/L en promedio en el último tanque de sedimentación y a 30mgSST/L en el agua que sale de la laguna de clarificación. De igual manera se disminuye la fluctuación en los

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

valores medidos hasta que muestran $\pm 14\text{mgSST/L}$ en el agua que sale de la laguna de clarificación. La eficiencia de reducción de la carga de sólidos suspendidos alcanzada por la planta de tratamiento Kumurana – La Lava se puede evaluar en -84%.

El límite permisible para desagües de la clase "C" del RMCH pide una concentración de sólidos suspendidos máxima de 50mgSST/L y el límite permisible para descargas líquidas una de 60mgSST/L . Mostrando concentraciones entre 20mgSST/L y 46mgSST/L , todas las muestras tomadas en la salida del agua de la laguna de clarificación de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava se encuentran entonces por debajo de ambos límites.

4.2. Metales pesados y otros tóxicos

En los siguientes subcapítulos se presentan y evalúan los contenidos de los metales pesados más frecuentes en aguas servidas con origen minera, el estaño (Sn), el plomo (Pb), el cadmio (Cd), el zinc (Zn), el cobre (Cu) y el hierro (Fe) y las concentraciones de otras sustancias tóxicas que están relacionadas a este tipo de industria como el arsénico (As) y el cianuro (CN^-). Se debe recordar que se cuentan sólo con datos tomados en el agua tratada, antes, durante y después de su tratamiento.

Metales pesados existen en la naturaleza en diferentes especies químicas: iones libres, complejos inorgánicos u orgánicos disueltos, complejos insolubles o adsorbidos a partículas sedimentando. La porción respectiva de las diferentes especies depende de las características químicas de cada un metal pesado por un lado, y por otro lado de la composición química del medio acuático en el cual se encuentra dicho metal pesado, es decir en primer lugar del pH, de la alcalinidad y de la concentración total de enlazantes orgánicos y partículas orgánicas o inorgánicas en el agua. Lógicamente, los metales pesados en forma disuelta (iones libres o complejos hidróxidos) hay mayormente con pH bajo, alcalinidad baja y concentraciones de enlazantes y partículas reducidas.

La característica especialmente peligrosa de compuestos metálicos es que generalmente tienen una permanencia química en sistemas ecológicos muy alta y una tendencia alta de absorber en texturas de alto contenido de lípidos. Por eso, una vez absorbidos en la grasa de un organismo biológico, la posibilidad de degradación y eliminación del cuerpo es casi nula, es decir que tienen un alto factor de bioacumulación en la cadena ecológica de nutrición.

Las especies químicas de los diferentes metales pesados que en los sistemas acuáticos influyen directamente el grado de la toxicidad son los iones libres y los complejos hidróxidos (complejos entre el catión metálico y OH^-). Son estas especies metálicas que por su solubilidad se destacan por una biodisponibilidad aumentada, es decir son ellos los compuestos que principalmente son consumidas y acumuladas por los diferentes organismos acuáticos.

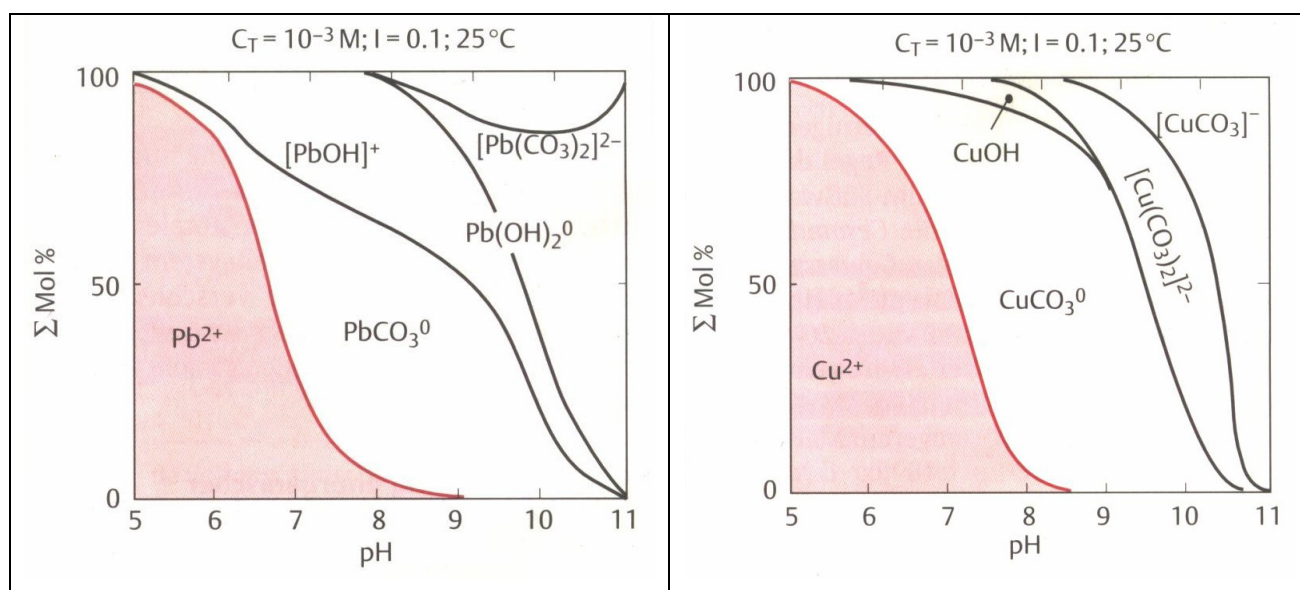


Figura 8: Las concentraciones relativas de las diferentes especies solubles de plomo y de cobre en dependencia del pH del entorno acuático como primer factor regulador de la solubilidad de cada un metal pesado, es decir de su biodisponibilidad y toxicidad respectiva.

En consecuencia, el interés en los metales pesados en ecosistemas acuáticos se explica por las dos razones: por un lado, los metales pesados se caracterizan por explicada tendencia de bioacumulación y por otro lado, los compuestos metálicos muestran un alto nivel de toxicidad para mamíferos como el ser humano y otros seres vivos como p. e. los insectos, peces y anfibios especialmente en el caso de una intoxicación crónica por el consumo continuo incluso de concentraciones muy por debajo de la dosis letal aguda.

La sedimentación es el proceso central para el destino de un metal pesado en aguas estancadas. Los metales pesados adsorben a partículas orgánicas (p. e. humus) o inorgánicas (p. e. óxidos de hierro) en proceso de sedimentación o también pueden ser absorbidos, es decir consumidos por organismos biológicos (p. e. algas, plancton zoológico) que igualmente están sujeto a la sedimentación. El tiempo promedio de permanencia de los metales pesados en la columna de agua es proporcional a la afinidad de cada una especie de metal pesado predominante en un cierto sistema acuático a las diferentes partículas sedimentando. En consecuencia, los metales pesados se hacen eliminar constantemente por la sorción a partículas y algas y la siguiente sedimentación de estas (para más información: ver cap. 6.1.).

4.2.1. Estaño

Estaño (Sn) es el metal pesado que actualmente se explota en la mina Santa Catalina por la Empresa Minera Agrícola "Kumurana". El estaño se obtiene principalmente a partir del mineral casiterita en donde se presenta como óxido de estaño SnO_2 . Estaño tanto en su forma elemental, como en compuestos inorgánicos (excepción: SnH_4) son clasificados como tóxicos. Estaño elemental supuestamente es un oligoelemento, es decir es vital para ciertos seres vivos, incluso el ser humano. Sin embargo no existen informaciones aseguradas sobre eso. Compuestos orgánicos de estaño sin embargo pueden mostrar toxicidades muy elevadas, pero generalmente – a parte de compuestos metalizados (para más información: ver cap. 6.1.) – tienen origen antropogénico.

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

Evaluando las concentraciones de estaño en la Figura 9, se observa que todas las muestras de agua contienen menos de 0,01mgSn/L, es decir que están claramente por debajo del límite de detección de la metodología aplicada en el presente programa de monitoreo para analizar los contenidos de estaño en el agua tratada. Por eso, no se puede prestar declaración sobre el nivel de fluctuación en el contenido de estaño en el agua monitoreado. Y lógicamente tampoco se puede afirmar exactamente si se da lugar a una reducción en las concentraciones de estaño por el tratamiento químico-físico de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava o no.

En el caso del estaño, para cuerpos de agua de la clase "C", la normativa ambiental boliviana exige una concentración máxima de 2,0mgSn/L y para descargas líquidas un máximo de 1,0mgSn/L. Como hemos visto en el párrafo anterior, en la planta de tratamiento Kumurana – La Lava las muestras tomadas tienen concentraciones de estaño que homogéneamente y absolutamente constantes durante todo el período de monitoreo y en todos los puntos de medición están muy por debajo de ambos límites.

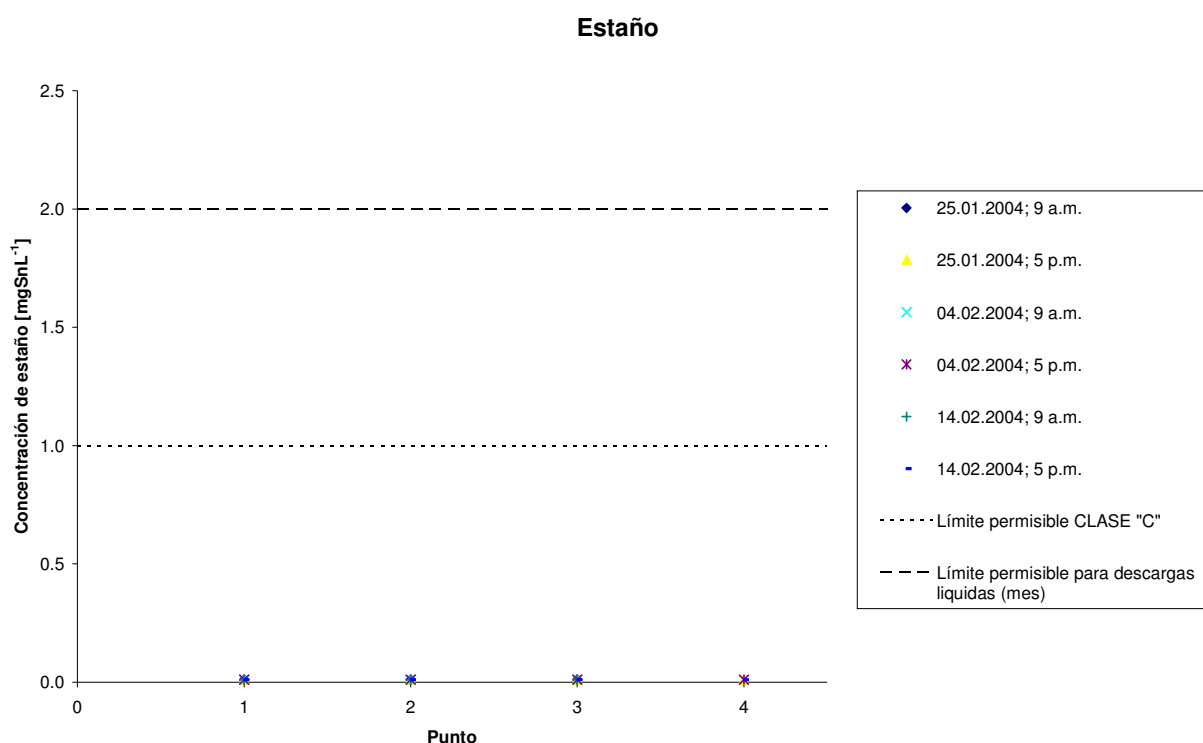


Figura 9: Las concentraciones de estaño disuelto en el agua, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el RMCH.

4.2.2. Plomo

Plomo (Pb) existe en la naturaleza mayormente en forma de cationes metálicas del tipo B que forman preferiblemente complejos estables con compuestos de carbono o con enlazantes clóricos,

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

azufrosos u orgánicos. Por esta característica, plomo muestra una alta tendencia de bioacumulación y de permanencia química en ecosistemas muy elevada. En mamíferos, el plomo por su consumo causa daños en el sistema de sangre (vasos sanguíneos y formación de sangre), en el tracto digestivo, en el sistema central nervioso (irregularidades motoras y sensoriales) y también puede tener como consecuencia de su consumo el disturbio en el desarrollo fetal.

Evaluando los contenidos de plomo disuelto en la Figura 10, se reconoce concentraciones con fluctuaciones bastante altas entre $\pm 0,10\text{mgPb/L}$ en los puntos de medición 1 y 3 y $\pm 0,11\text{mgPb/L}$ después del tratamiento con cal, mostrando promedios que están más o menos estables en $0,2\text{mgPb/L}$ en estos primeros tres puntos de medición. Sólo el agua que sale de la laguna de clarificación, con un promedio de $0,10\text{mgPb/L}$ y ninguna fluctuación, muestra valores mucho más bajos y estables. Eso significa que la planta de tratamiento Kumurana – La Lava, sobre todo por el efecto de la laguna de clarificación, tiene una eficiencia de eliminación del plomo disuelto al rededor de -95%.

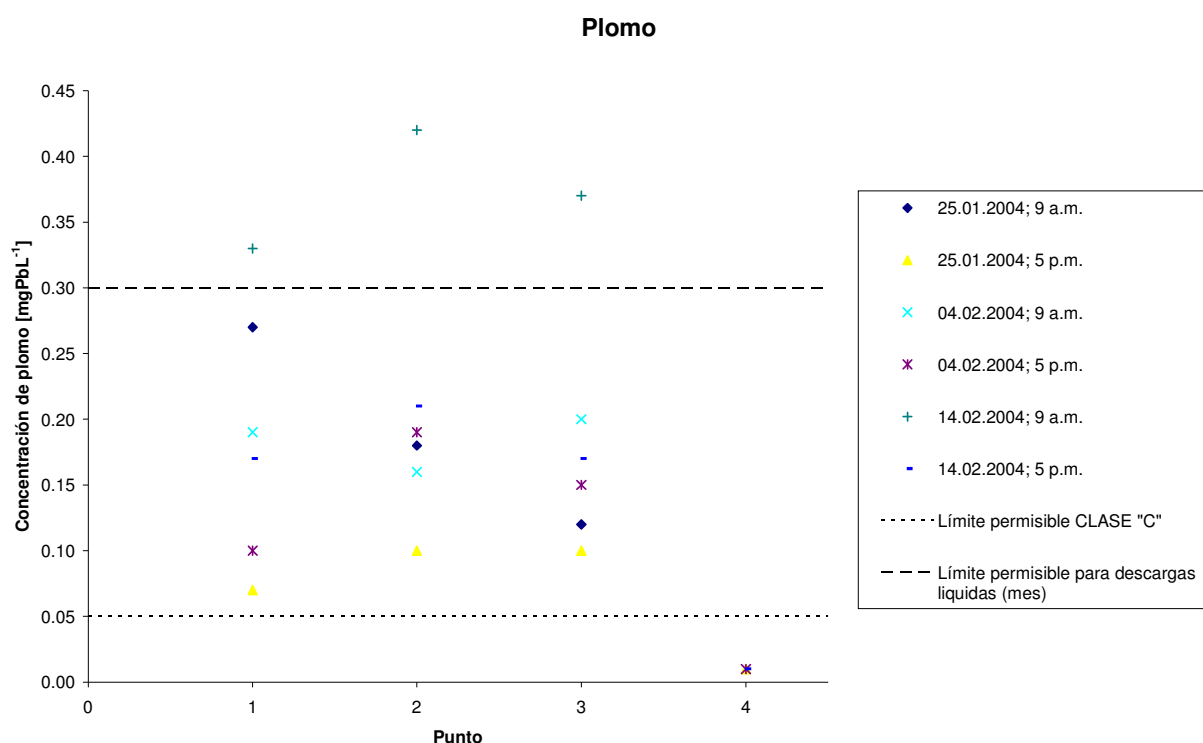


Figura 10: Las concentraciones de plomo disuelto en el agua, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según el RMCH.

En el caso del plomo, la normativa ambiental boliviana para cuerpos de agua de la clase "C" exige una concentración máxima de $0,05\text{mgPb/L}$ y para descargas líquidas exige un máximo $0,3\text{mgPb/L}$. Como hemos visto en el párrafo anterior, en la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava, todas las muestras tomadas en la salida del agua de la laguna de clarificación se encuentran claramente por debajo de ambos límites.

4.2.3. Cadmio

Cadmio (Cd), igual como el plomo existe en la naturaleza mayormente en forma de cationes metálicas del tipo B y muestra una tendencia de bioacumulación aumentada y una permanencia química en ecosistemas muy elevada. El modo de acción del cadmio (Cd) todavía no es totalmente conocido. En el caso del ser humano y otros mamíferos, su consumo crónico puede causar anemia, daños en los huesos y los riñones. De todas maneras queda muy claro que especialmente el consumo de ciertas cantidades de cadmio de modo crónico, por ejemplo por el consumo de agua contaminada, daña irreversiblemente a la salud humana (para más información: ver cap. 6.1.).

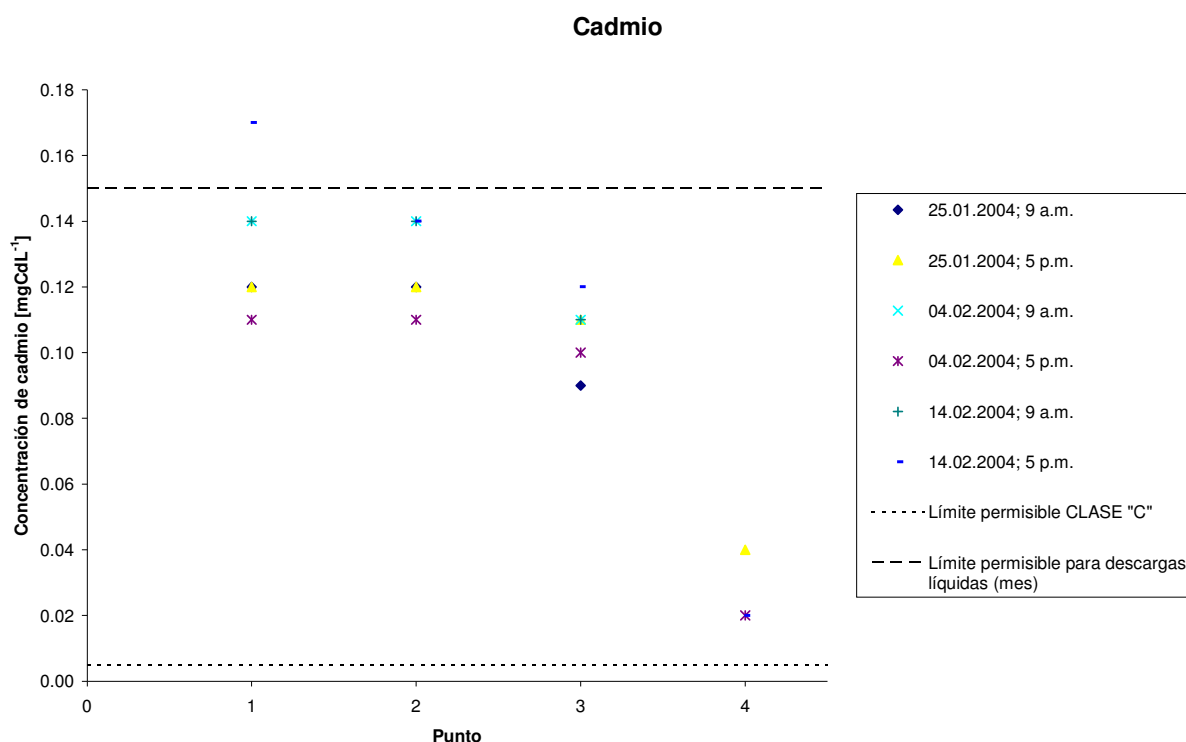


Figura 11: Las concentraciones de cadmio disuelto en el agua, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el RMCH.

Evaluando las concentraciones de cadmio en la Figura 11, se reconoce que se van disminuyendo en los primeros tres puntos de medición de manera lineal de 0,13mgCd/L en promedio en el agua que entra a la planta de caléo a 0,11mgCd/L en el agua que sale del último tanque de sedimentación, es decir una cierta cantidad de cadmio sedimenta por floculación durante todo el curso del tratamiento químico-físico, lo que puede ser atribuido a su carácter químico anteriormente explicado. Mostrando una concentración promedia de cadmio de 0,03mgCd/L, la laguna de clarificación sin embargo parece facilitar una eliminación de este metal pesado mucho más eficiente, aparentemente por razones del mayor tiempo de permanencia del agua en esta parte de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava. En respecto a la fluctuación en los valores medidos se puede manifestar una reducción progresiva de $\pm 0,022\text{mgCd/L}$ al inicio del tratamiento químico-físico a

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

$\pm 0,012\text{mgCd/L}$ en su final. Para el cadmio disuelto se puede calcular una eficiencia de eliminación de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava de aproximadamente -80%.

En el caso del cadmio disuelto, para cuerpos de agua de la clase "C", la normativa ambiental boliviana exige una concentración máxima de $0,005\text{mgCd/L}$ y para descargas líquidas un máximo de $0,15\text{mgCd/L}$. Como hemos visto en el párrafo anterior, los valores de concentración en el agua tratada en la planta de Kumurana – La Lava, saliendo de la laguna de clarificación, sólo están por debajo del límite para descargas líquidas, sin embargo, no alcanzan de estar por debajo el límite para cuerpos de aguas de la clase "C", es decir aguas que servirán para el riego de las chacras.

4.2.4. Zinc

Zinc (Zn) como otro metal pesado del grupo de los cationes metálicos del tipo B igualmente forma complejos con compuestos de carbono o con enlazantes clóricos, azufrosos u orgánicos. Sin embargo, estos tipos de complejos son mucho menos estables que en el caso de los dos metales pesados anteriormente discutidos y en consecuencia, en el agua, zinc existe principalmente en forma de iones metálicos libres. En consecuencia, la biodisponibilidad (para más información: ver cap. 6.1.) de este metal pesado en aguas estancadas naturales es mucho más alta que en el caso de plomo o cadmio y también su tendencia de bioacumulación es más alta. Para mamíferos, la presencia de zinc impacta la absorción de calcio y cobre y en consecuencia afecta el crecimiento de los huesos. A parte de eso, zinc puede tener efectos hemolíticos.

Evaluando las concentraciones de zinc en la Figura 12, se reconoce, igual como en el caso del cadmio, que este metal pesado se hace eliminar en los primeros tres puntos de medición de manera lineal de $31,5\text{mgZn/L}$ en promedio en el agua que sale del socavón de la Mina Santa Catalina a $24,9\text{mgZn/L}$ en el último tanque de sedimentación. Con una concentración promedio de $1,9\text{mgZn/L}$ en el agua superficial de la laguna de clarificación, también el zinc parece ser sujeto a procesos de eliminación mucho más eficientes en este último componente del tratamiento químico-físico de la planta Kumurana – La Lava. La reducción de la fluctuación de los valores medidos en los diferentes puntos de monitoreo poco eficiente de $\pm 9,6\text{mgZn/L}$ en la salida del agua de la Mina de Santa Catalina a $\pm 2,9\text{mgZn/L}$ en la salida del agua de la laguna de clarificación se debe explicar sobre todo por un valor fugitivo en este último punto de medición, medido el 25 de enero de 2004. La eficiencia de eliminación de zinc disuelto por la planta de tratamiento Kumurana – La Lava se puede declarar en -94%.

En el caso del zinc disuelto, para cuerpos de agua de la clase "C", la normativa ambiental boliviana exige una concentración máxima de $5,0\text{mgZn/L}$ y para descargas líquidas un máximo de $1,5\text{mgZn/L}$. Dejando de lado mencionado valor fugitivo que supera el promedio de los otros valores medidos en este punto casi por un factor 20, se puede declarar que el agua que sale de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava muestra concentraciones de zinc disuelto que están claramente por debajo de ambos límites.

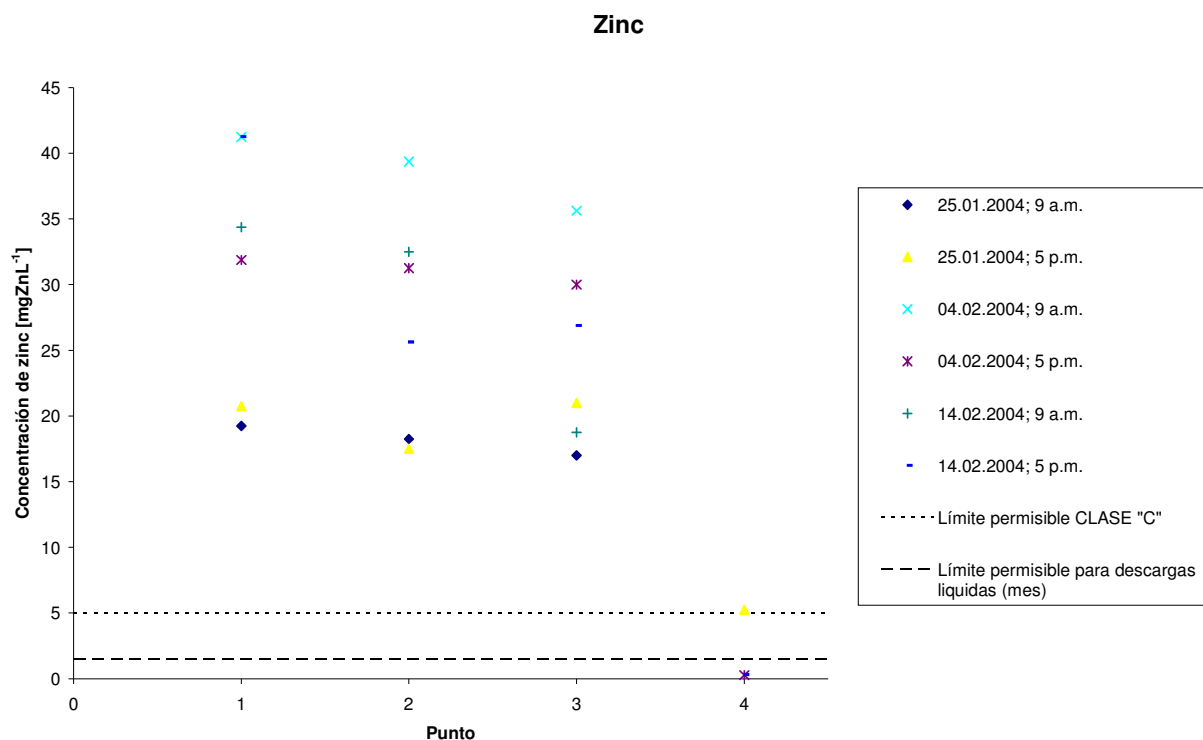


Figura 12: Las concentraciones de zinc disuelto en el agua, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el RMCH.

4.2.5. Cobre

Cobre (Cu) también es un metal pesado del grupo de los cationes metálicas del tipo B, quiere decir que igualmente como en los casos anteriormente presentados forma preferiblemente complejos con compuestos de carbono o con enlazantes clóricos, azufrosos u orgánicos. Ya que los complejos de cobre sobre todo con enlazantes orgánicos son muy estables, este metal pesado existe en aguas estancadas naturales sobre todo en complejos orgánicos insolubles (por 99%) y sólo la reducción del pH puede aumentar la biodisponibilidad de las diferentes especies solubles de cobre. El ion libre Cu^{2+} tiene sobre todo efectos citotóxicos y provoca en el caso del ser humano daños de hígado. En el caso de algas, este tipo de iones biodisponibles también muestra una toxicidad muy elevada.

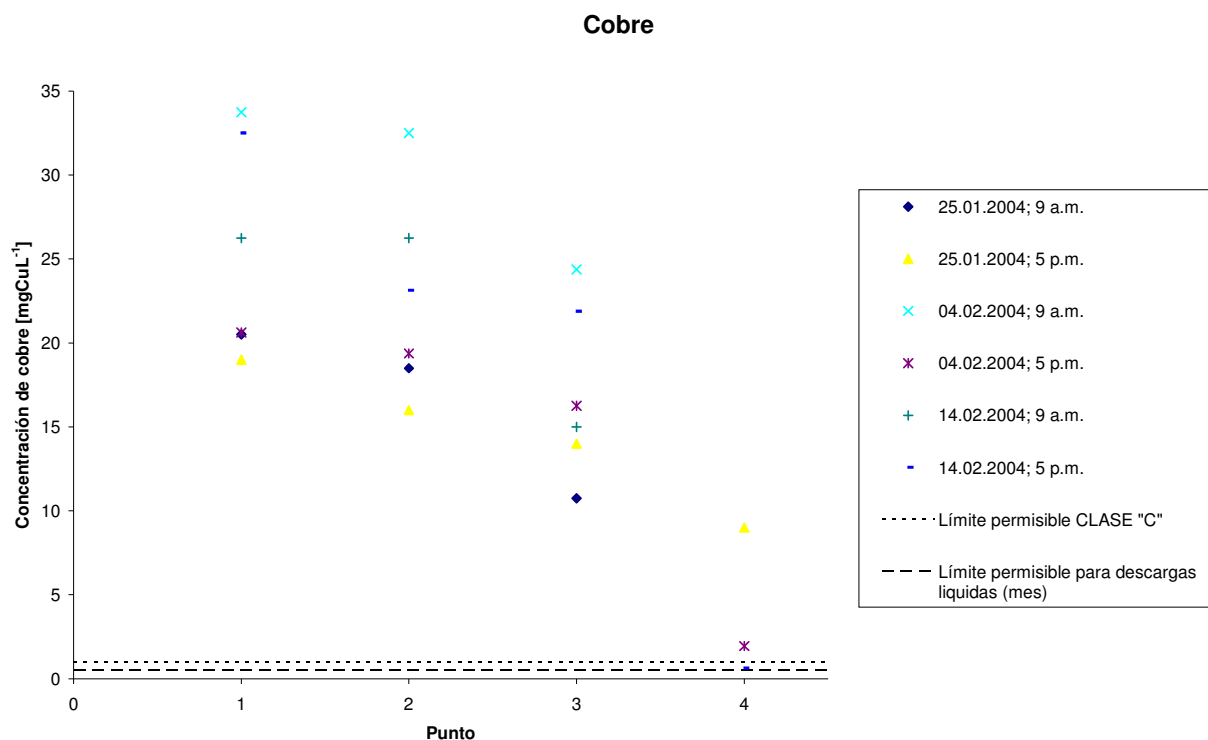


Figura 13: Las concentraciones de cobre disuelto en el agua, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el RMCH.

Evaluando las concentraciones de cobre en la Figura 13, se observa igual como en los dos casos anteriormente discutidos una reducción de las concentraciones promedias lineal en los primeros tres puntos de medición, empezando el proceso de eliminación en 25,4mgCu/L en el agua antes de su tratamiento con cal y mostrando una concentración promedio de cobre de 17,0mgCu/L en el último tanque de sedimentación. Sin embargo, también en este caso, la sedimentación que tiene lugar en la laguna de clarificación durante un tiempo prolongado provoca una eliminación del cobre disuelto mucho más eficiente, reduciendo su contenido de cobre a 3,9mgCu/L. Poco explicable es el hecho que la fluctuación de los valores medidos se reduce de manera mucho menos clara en el caso del cobre que en los ejemplos anteriormente discutidos, disminuyéndose de $\pm 6,5\text{mgCu/L}$ en el primer punto de medición a $\pm 4,5\text{mgCu/L}$ en el último. La eficiencia de eliminación del cobre disuelto en la planta de tratamiento abarca unos -85%.

En el caso del cobre disuelto, para cuerpos de agua de la clase "C", la normativa ambiental boliviana exige una concentración máxima de 1,0mgCu/L y para descargas líquidas un máximo de 0,5mgCu/L. Como hemos visto en el párrafo anterior, en la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava, los valores promedios de cobre disuelto en el último punto de medición se encuentran claramente por encima de ambos límites y entonces en este aspecto no cumplen la ley.

4.2.6. Hierro

El hierro (Fe) muestra un comportamiento químico-coordinatorio diferente a los anteriormente mencionados metales pesados, es decir como catión forma preferiblemente complejos hidróxidos (p. ej. FeOOH , FeOH , Fe(OH)_2 , Fe(OH)_3) y fosfáticos que pueden ser tanto solubles, tanto insolubles. El hierro tiene su significado ecotoxicológico en la influencia que tienen los óxidos de hierro (p. ej. FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_3 , Fe_3O_4) por ser enlazantes inorgánicos muy potentes y insolubles en la biodisponibilidad de otros metales pesados tóxicos. En sistemas acuáticos aeróbicos, el hierro en forma de óxido de hierro entonces absorbe los diferentes otros metales pesados y por lo tanto reduce la biodisponibilidad ellos. El hierro mismo es un oligoelemento importante (para más información: ver cap. 6.1.) para el organismo humano en contexto de la formación de hemoglobina. En concentraciones bastante altas, sin embargo, por sus efectos oxidantes puede resultar tóxico en nivel del hígado y de las arterias (arteria esclerosis).

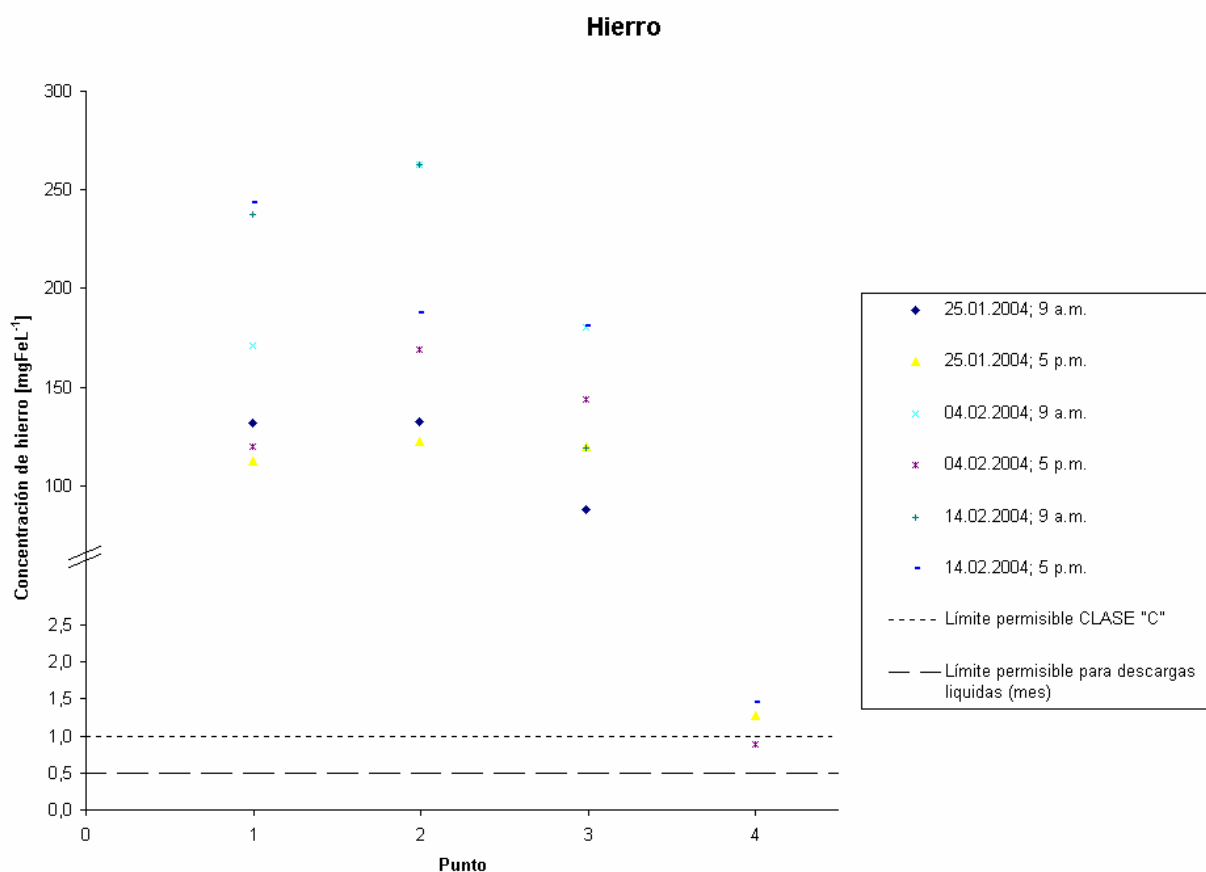


Figura 14: Las concentraciones de hierro disuelto en el agua, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el RMCH.

Evaluando las concentraciones de hierro disuelto en la Figura 14, se observa un aumento en casi todas las series de mediciones por la adición de cal entre los primeros dos puntos del monitoreo de 170mgFe/L en promedio en el agua que sale del socavón de la Mina de Santa Catalina a

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

190mgFe/L en el agua que sale de la planta de caléo. Este fenómeno puede ser explicado por la sobreoferta de iones hidróxidos por el cambio del pH de altamente ácido a ligeramente alcalina (ver cap. 4.1.1.), lo que favorece a los complejos hidróxidos mayormente mejor solubles en comparación con otros compuestos de hierro. Después este punto, con la progresiva reducción del pH durante el siguiente curso del tratamiento, los compuestos de hierro presentes en el agua se transforman otra vez en especies insolubles sobre todo con los iones de carbono del cal y sedimentan, por lo cual la concentración promedia de hierro disuelto baja a 139mgFe/L antes de entrar a la laguna de clarificación, donde el hierro disuelto se elimina finalmente hasta que el agua tratada tenga 1,2mgFe/L en promedio. Igualmente las fluctuaciones en los contenidos de hierro disuelto muestran un primer aumento de $\pm 59\text{mgFe/L}$ a $\pm 61\text{mgCu/L}$ en los primeros dos puntos de medición y se reduce hasta $\pm 0,3\text{mgFe/L}$ en el agua superficial de la laguna de clarificación. La eficiencia de eliminación del hierro disuelto en el agua tratada según estas cifras puede ser entonces calculada como -99%.

En el caso del hierro, para cuerpos de agua de la clase "C", la normativa ambiental boliviana exige una concentración máxima de 1,0mgFe/L y para descargas líquidas un máximo de 0,5mgFe/L. Como hemos mencionado en el párrafo anterior, el agua que sale de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava muestra una concentración promedia de hierro disuelto que está ligeramente por encima de ambos límites y entonces en este aspecto no cumple la ley.

4.2.7. Arsénico

Arsénico (As) es un semi-metal que generalmente forma un compuesto con sulfito. En la naturaleza, arsénico es ubicuario, es decir se encuentra en concentraciones bajas en todos los lugares del mundo. La tasa de ingestión "normal" de este tóxico se estima en 0,05 – 0,1mg por día. El mecanismo de reacción de los compuestos tanto orgánicos como inorgánicos base en su reactividad frente a los grupos -SH en las proteínas y los enzimas. Eso lleva entre otro a una inhibición de la glucólisis y a la destrucción del presupuesto de electrolitos y de agua en los organismos afectados (para más información: ver cap. 6.1.). La toxicidad de los diferentes compuestos de arsénico diverge fuertemente, a lo cual se conoce la regla que en el cuerpo humano, los compuestos arsénicos menos tóxicos se segregan rápidamente, las especies altamente tóxicos sin embargo se acumulan en el tejido del organismo afectado. Arsénico además es cancerogénico.

Evaluando las concentraciones de arsénico disuelto en la Figura 15, se reconoce que también en este caso que la elevación del pH (ver cap. 4.1.1.) por la lechada de cal provoca un aumento de las especies arsénicos solubles entre los primeros dos puntos de medición, de manera que el contenido de arsénico asciende de 1,0mgAs/L en promedio en el agua que sale del socavón de la Mina Santa Catalina a 2,0mgAs/L en el agua que sale de la planta de caléo. De este punto, con la reducción continua del pH durante el siguiente curso del tratamiento, el contenido de arsénico disuelto en el agua va disminuyéndose hasta que sale de la laguna de clarificación con una concentración de menos de 0,01mgAs/L, es decir por debajo del límite de detección de la metodología de medición aplicada en presente programa de monitoreo. La fluctuación en los valores medidos aumenta de $\pm 0,4\text{mgAs/L}$ en el inicio del tratamiento a $\pm 0,7\text{mgAs/L}$ después de la lechada del cal y se reduce en el curso del tratamiento hasta que en el agua que sale de la laguna de clarificación ya no es detectable. La eficiencia de eliminación del arsénico disuelto por la planta de tratamiento Kumurana – La Lava se puede evaluar según los presentes resultados como -99%.

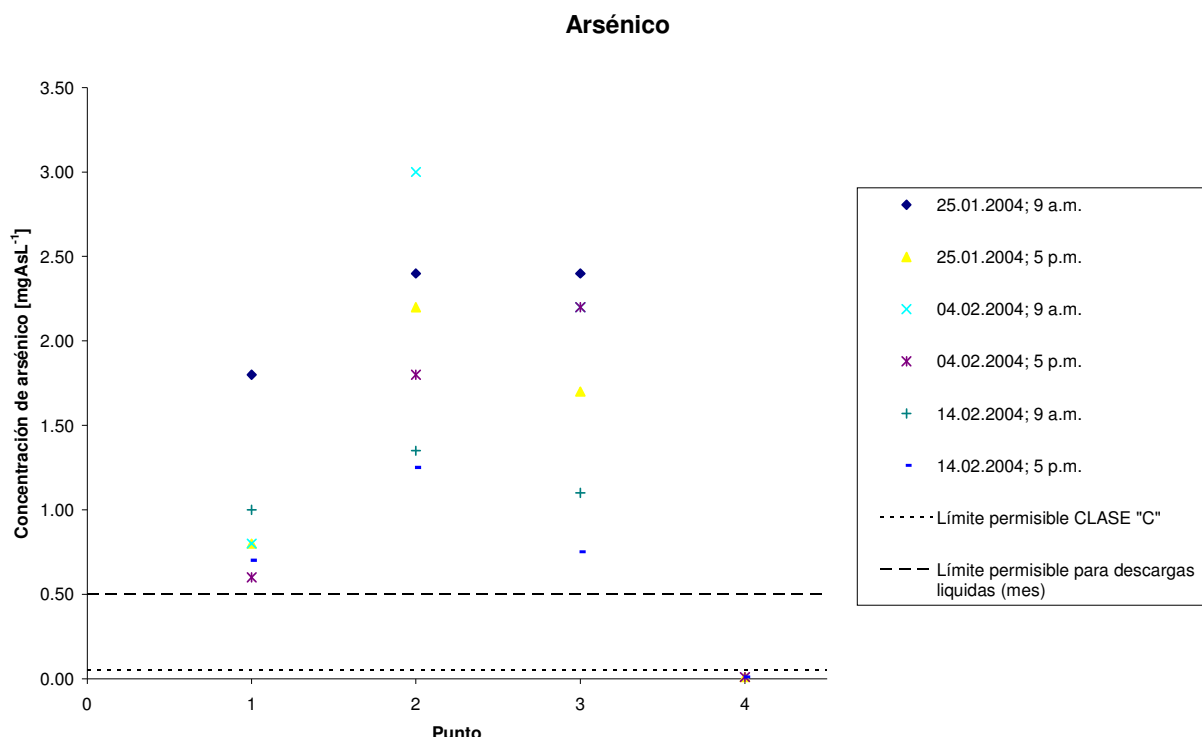


Figura 15: Las concentraciones de arsénico disuelto en el agua, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el RMCH.

En el caso del arsénico, para cuerpos de agua de la clase "C", la normativa ambiental boliviana exige una concentración máxima de 0,05mgAs/L y para descargas líquidas un máximo de 0,5mgAs/L. Como hemos visto en el párrafo anterior, en la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava, el contenido de arsénico disuelto en el agua que sale de la laguna de clarificación se encuentra homogéneamente y absolutamente constante durante todo el período de monitoreo muy por debajo de ambos límites.

4.2.8. Cianuro

Cianuros son sales del hidrógeno de cianuro, también llamado ácido prúsico (HCN), que contienen el cianuro (CN⁻) como anión. Por el pK_a de 9,2, en ambientes acuáticos naturales, el ácido prúsico existe mayormente en su forma indisociada, es decir como HCN (para más información: ver cap. 6.1.). Para mamíferos, la especie realmente tóxica de los diferentes cianuros es el ión de cianuro (CN⁻), que surge efecto como tóxico de respiración y de célula por la inhibición de la citocromo oxidasa en la membrana interior de los mitocondrias, lo que provoca un bloqueo de la cadena respiratoria o de la fosforilación oxidativa. En la célula animal, eso conduce a la muerte de la célula, pues la ganancia de energía queda paralizada. En el caso de intoxicación con arsénico, las células con un volumen de consumo de energía especialmente alto como las células nerviosas del cerebro mueren primero, de modo que acaban funcionar los más vitales mecanismos regulativos del sistema nervioso central. En ambientes acuáticos, todas las especies de cianuro disueltas son

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

altamente tóxicas. En el caso de los peces, el compuesto más tóxico es la especie indisociada por su mejor permeabilidad de las membranas. Por eso, para peces, la toxicidad de compuestos cianuricos aumenta con el pH. El peligro de intoxicación del medio ambiente por hidrógeno de cianuro y sus sales puede surgir del uso de cianuros metálicos en procesos de galvanización, del endurecimiento de metales o de la explotación de metales nobles en la minería. El importe directo en el medio ambiente pasa principalmente por accidentes o por la neutralización inadecuada de cianuros metálicos tóxicos.

Evaluando las concentraciones de cianuro en la Figura 16, se reconoce que todos los valores medidos están claramente por debajo del límite de detección de la metodología de medición aplicada en presente programa de monitoreo. En consecuencia, no es posible prestar ninguna declaración sobre la eficiencia de eliminación de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava en respecto a este tóxico.

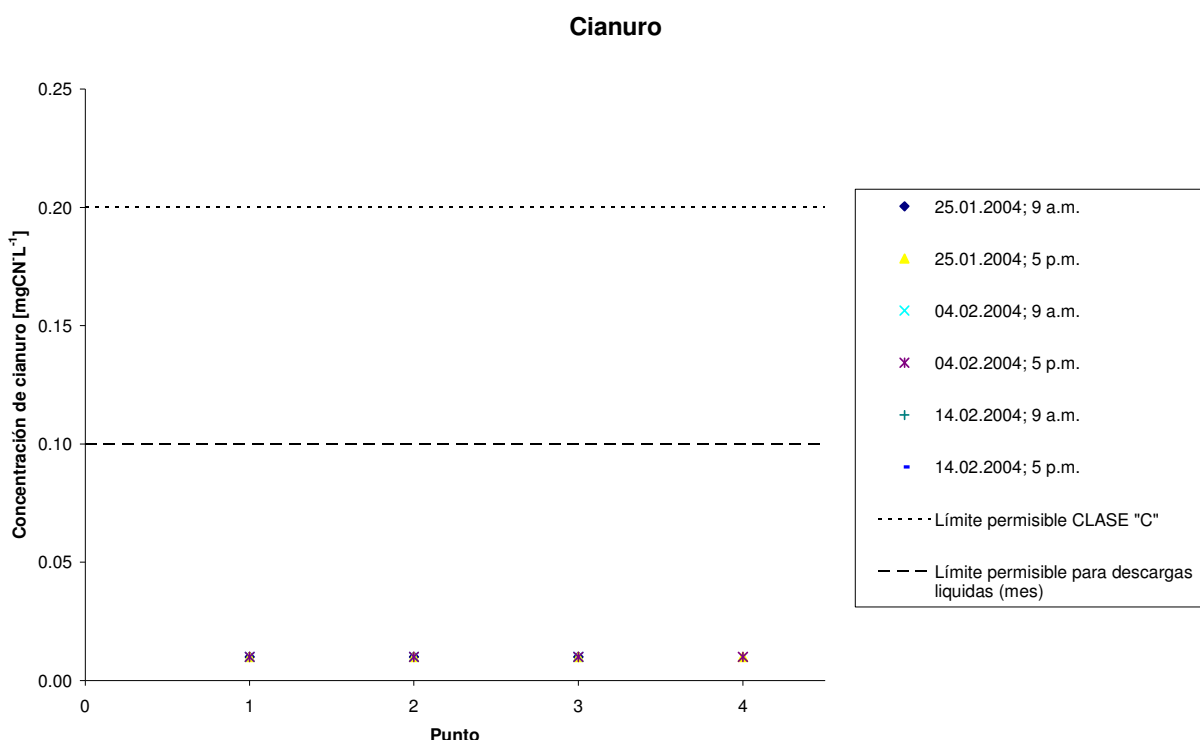


Figura 16: Las concentraciones de cianuro disuelto en el agua, siguiendo el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento de Kumurana – La Lava con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el RMCH.

En el caso del cianuro, para cuerpos de agua de la clase "C", la normativa ambiental boliviana exige una concentración máxima de 0,2mgCN/L y para descargas líquidas un máximo de 0,1mgCN/L. Como todas las muestras tomadas muestran concentraciones de arsénico disuelto por debajo del límite de detección, el agua que sale de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava tiene concentraciones de este tóxico que homogéneamente y absolutamente constantes durante todo el período de monitoreo y en todos los puntos de medición están muy por debajo de ambos límites.

5. Conclusiones

Después de esta evaluación amplia y profunda de los datos adquiridos en el campo, es necesario llegar a deducir algunas conclusiones fundamentales sobre el funcionamiento de la planta de tratamiento química-física de Kumurana – La Lava, teniendo en cuenta los objetivos planteados en el Programa de Investigación ejecutado por MEDMIN (ver cap. 1.3.).

Como parte de los objetivos específicos, se discute el impacto de la planta de tratamiento en los cuatro parámetros más generales, la acidez / alcalinidad, la temperatura, la conductividad y la carga con sólidos suspendidos del agua tratada. Se observa que el curso del pH es constante entre pH 6,0 y 9,0, es decir entre los dos límites permisibles para desagües de la clase "C". Se puede afirmar que la planta de tratamiento con respecto al pH de un río natural – pues el Río Kumurana que baja de la Laguna Santa Catalina altamente impactada en su pH por otros proyectos mineros alrededor de este sistema acuático muestra un pH claramente tóxico de aproximadamente pH 3 – cumple absolutamente con la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

Igualmente la temperatura y el contenido de sólidos suspendidos de que muestra el agua que sale de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava se encuentran constantemente y absolutamente dentro de los márgenes de los límites permisibles tanto para descargas líquidas, como para desagües de la clase "C". Para los sólidos suspendidos, la planta de tratamiento Kumurana – La Lava muestra una eficiencia de eliminación bastante alta de -84% y para la conductividad, es decir para los minerales suspendidos con carga negativa, una un poco menos impresionante de -39%.

Se analiza y valoriza en presente informe también la eficiencia de purificación para distintos otros parámetros químicos alcanzados actualmente por la planta de tratamiento Kumurana – La Lava. Respecto a la eliminación de los metales pesados de alta toxicidad se puede hablar de una eficiencia alta de -95% para el plomo, -80% para el cadmio y -94% para el zinc disuelto en el agua tratada. Las concentraciones alcanzadas por el tratamiento del agua, en el caso de mencionados metales pesados, en consecuencia cumplen – con la excepción del cadmio – tanto los límites permisibles para descargas líquidas, como los límites permisibles para desagües de la clase "C". El contenido de cadmio disuelto en el agua tratada sólo se alcanza de reducir claramente por debajo del límite para descargas líquidas. En el caso del estaño, no se puede prestar declaraciones sobre la eficiencia de la eliminación alcanzada por la planta de tratamiento Kumurana – La Lava, pues el agua, ya saliendo del socavón de la Mina de Santa Catalina, no muestra ninguna contaminación con este metal pesado.

Con respecto al cobre y al hierro, dos metales pesados que en concentraciones muy bajas sirven para el ser humano como oligoelementos vitales, sin embargo en concentraciones elevadas igualmente son tóxicos como los anteriormente mencionados, se puede observar también eficiencias de eliminación altas y hasta muy altas de -85% para el cobre disuelto y -99% en el caso del hierro. Sin embargo, a pesar de esto, en ambos casos no es posible reducir el contenido promedio de estos dos tóxicos a un nivel satisfactorio, es decir por debajo de los límites para descargas líquidas. Una explicación para esta falla se puede encontrar en las fluctuaciones muy altas en la carga con estos metales pesados tanto en el agua que sale de la Mina Santa Catalina, como en consecuencia también el agua químicamente tratado que entra al sistema de sedimentación de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava. Otra razón puede ser el caudal de agua, que pasa el sistema, que supuestamente está muy aumentado por la forzada explotación de estaño en la Mina Santa Catalina.

Finalmente, se evalúa también la eficiencia de purificación para otras sustancias tóxicas, cuya presencia está vinculada a las actividades mineras. En el caso del arsénico, se puede manifestar que la planta de tratamiento Kumurana – La Lava, con una eficiencia de purificación de más de -99%, alcanza reducir las cargas de este semi-metal muy tóxico por debajo tanto del límite permisible para desagües de la clase "C", como para descargas líquidas. En respecto al cianuro no

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

se puede prestar ninguna declaración sobre la eficiencia de purificación, pues el agua que entra la planta de tratamiento Kumurana – La Lava tiene cargas de este tóxico por debajo del límite de detección de la metodología aplicada en este programa de monitoreo. Sin embargo, también en este caso se puede manifestar que el agua tratada muestra concentraciones que están claramente por debajo de ambos límites permisibles.

En base al objetivo general del proyecto, es decir, la validación de los sistemas de purificación químicos-físicos como una nueva tecnología de purificación de aguas residuales originadas por proyectos de minería de pequeña escala, como consecuencia de todos los argumentos anteriormente presentados, concluye que el sistema de neutralización y consiguiente sedimentación de los distintos contaminantes representa un sistema de purificación muy eficiente, con una técnica muy interesante para la protección de ecosistemas acuáticos que demandan bajos costos de operación y mantenimiento. Sus principales características son: a) Eficiencia de purificación satisfactoria, b) costos de construcción y de mantenimiento relativamente bajos y c) un manejo bastante simple y poco susceptible a errores.

Sin embargo, de toda manera se debe tener en claro que la eficiencia de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava depende fuertemente de su mantenimiento óptimo y una alimentación con aguas servidas a la planta purificadora lo más constante posible, no sobrepasando un cierto caudal fijado en el diagnóstico de las obras planificadas, es decir unos 17L/seg. Sólo de esta manera se puede asegurar que la planta de tratamiento Kumurana La – Lava continúe purificando las aguas servidas, cumpliendo la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

6. Apéndice

6.1. Expresiones científicas

Antropogénico, impactos ~: Quiere decir con origen humano.

Bioacumulación: La acumulación de sustancias químicas en organismos biológicos independiente de si la sustancia sea consumida por la nutrición contaminada o absorbido directamente del medio ambiente. Este fenómeno causa un aumento de las sustancias acumuladas en la cadena trófica.

Biodisponibilidad: Por el hecho, que en el ambiente acuático, no todas las especies químicas de un cierto elemento son solubles, sino más bien, por enlaces con moléculas orgánicas u inorgánicas muy estables se ponen sólidos, sólo una parte de la carga total realmente puede ser ingerida por los diferentes organismos acuáticos.

Biodiversidad: Riqueza y diversidad de especies de flora y fauna encontrado en un cierto ecosistema.

Capacidad de buffer: La posibilidad de un sistema químico de estabilizar el pH alrededor un cierto valor de pH por el equilibrio carbonato (el más frecuente en la naturaleza) o otras sustancias buffer.

Citocromo oxidasa: Enzima que cataliza el último paso en la cadena de transporte electrónico. Está formada por un dímero que se extiende desde la matriz hasta el espacio intermembrana o el citosol, atravesando la membrana.

Colas: Desperdicios generados por la actividad minera en el proceso de molienda.

Complejos inorgánicos u orgánicos: Se refiere a enlaces iónicos entre aniones (átomos con carga eléctrica negativa) metálicos y macromoléculas orgánicas (aquí llamados enlazantes) o inorgánicas.

Disociación: La constante de equilibrio de una reacción química se denomina como constante de disociación K. En el caso particular de una reacción ácido-base $HA \leftrightarrow H^+ + A^-$, la constante de disociación del ácido (K_a) se define como:

$$K_a = K[H_2O] = \frac{[H^+][A^-]}{[HA]} \quad (6.6.1.)$$

Electrolito: Sales, ácidos inorgánicos o las bases correspondientes que, al disolverse en agua, producen soluciones que conducen electricidad (transporte de carga) en un mayor o menor grado.

Enlazante: Son las moléculas parejas del átomo central metálico en un complejo metálo-orgánico u metálo-inorgánico.

Exfiltración: El lavado de sustancias sólidos por procesos químicos como p. ej. lixiviación.

Fosforilación oxidativa: La fosforilación oxidativa es una serie de eventos químicos que llevan a la síntesis de ATP, es decir de la energía interna de la célula.

Fotosíntesis: La fotosíntesis es uno de los procesos metabólicos de los que se valen las células para obtener energía. Es un proceso complejo, mediante el cual los seres vivos poseedores de clorofila y otros pigmentos, captan energía luminosa procedente del sol y la transforman en energía química (ATP) y en compuestos reductores (NADPH), y con ellos transforman el agua y el CO₂ en compuestos orgánicos reducidos (glucosa y otros), liberando oxígeno:



Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

La energía captada en la fotosíntesis y el poder reductor adquirido en el proceso, hacen posible la reducción y la asimilación de los bioelementos necesarios, como nitrógeno y azufre, además de carbono, para formar materia viva.

Glucólisis: La glucólisis tiene lugar en el citoplasma celular. Consiste en una serie de diez reacciones, cada una catalizada por una enzima determinada, que permite transformar una molécula de glucosa en dos moléculas de un compuesto de tres carbonos, el ácido pirúvico. Es en estas moléculas donde se encuentra en estos momentos la mayor parte de la energía contenida en la glucosa. La ganancia neta de energía celular que se produce por esta cadena de reacciones es de dos moléculas de ATP.

Hemolítico: Es una sustancia que destruye los glóbulos rojos (la hemoglobina) en el sangre y por eso provoca una escasez en la capacidad de transportar el oxígeno de los pulmones a los órganos periféricos de un cierto organismo (como p. ej. el cerebro).

Intoxicación aguda o crónica: La intoxicación aguda de una sustancia se refiere al impacto negativo en órganos vitales en su funcionamiento de manera directa y inmediata. En general, el resultado de una intoxicación aguda es la paralización de los afectados órganos o la muerte del organismo entero. La intoxicación crónica se refiere al impacto negativo que tienen ciertas sustancias por su consumo constante y en cantidades muy bajas en un organismo o una población o también un ecosistema entero. De importancia pueden ser la reducción del crecimiento, del desarrollo, del comportamiento y de la reproducción de un organismo o un conjunto de organismos. La intoxicación crónica entonces no tiene efecto letal inmediato, sin embargo, con el curso del tiempo, puede llevar a la extinción de una población o un ecosistema.

Metyl, compuesto metylizado: Metyl se refiere al grupo químico funcional $-\text{CH}_3$, derivado de metano (CH_4).

Oligoelemento: Son elementos en la nutrición que un organismo no necesita en grandes cantidades, sin embargo, en el caso de su abstinencia total, el organismo afectado muestra efectos de desnutrición.

Sorción, adsorción, absorción: La adsorción se refiere a la adhesión de una molécula a la superficie de una partícula o un organismo vivo. La absorción sin embargo se refiere a la incorporación activa en un organismo vivo o una sustancia orgánica u inorgánica absorbente por ingestión o reacción química. La primera reacción, la adsorción, es reversible, la absorción, no es. El conjunto de estas dos tipos de reacciones (generalmente de eliminación) se llama porción.

Ubiquitario: Quiere decir que una sustancia o un organismo, también en concentraciones muy bajas, se puede encontrar en todos los lugares de este mundo. El plomo es un ejemplo para un elemento ubiquitario, el ser humano un ejemplo para un ser vivo ubiquitario.

6.2. Información adicional

6.2.1. Velocidad y tiempo de sedimentación de forma laminar

Ley de Stokes: $v_{sed.} = \alpha \cdot B \cdot r^2$ (6.2.1.1.)

$$= \alpha \cdot \frac{2g(\rho_s - \rho_w)}{9\mu} \cdot r^2 \quad [\text{mseg.}^{-1}]$$

Con:

α := Factor de forma (para esferas $\alpha = 1$) []

g := Constante gravitacional = 9.814 [mseg.⁻²]

ρ_s := Densidad de la partícula (para cuarzo $\rho_s = 2650$) [kgm⁻³]

ρ_w := Densidad del agua = 998 [kgm⁻³]

μ := Viscosidad dinámica del fluido (para agua $\mu = 10^{-3}$) [kgm⁻¹seg.⁻¹]

Tiempo de sedimentación: $t_{sed.} = \frac{h}{v_{sed.}}$ [seg.] (6.2.1.2.)

6.2.2. Límites permisibles y concentraciones naturales

Tabla 6: Límites permisibles para concentraciones de metales pesados en suelos

Pautas de salud	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Fe [mg/kg]
Holanda (niveles de acción)	55	530	720	190	12	
Estados Unidos ² (límites máximos)			4	2	0,08	1000 (?)
Canadá (límites máximos)		200	400	100	8	
Alemania (límites máximos)		500	300	500	2	
Suiza (límites máximos)		200		150	2	
Chile ³ (límites recomendados)	40	200			0,5	
Suiza (valor indicativo ⁴)		50	150	40	0,8	

² Valores permisibles en suelos definidos como objetivos medioambientales multimedia (Fitchko 1989). Tomada de Canter L. (1997).

³ Límites recomendados por INTA Chile (1996).

⁴ Valores indicativos jurídicamente no son vinculatorio.

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

Tabla 7: Límites permisibles para concentraciones de metales pesados en plantas de forraje

Pautas de salud	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Fe [mg/kg]
Suiza (límites máximos)	2	40			1	

Tabla 8: Concentraciones en la naturaleza de metales pesados en suelos

Concentración de trasfondo natural	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Fe [mg/kg]
Cuenca Pilcomayo ¹		6 - 34	17 - 132	3 - 24	<0,05 – 0,3	

¹ Datos obtenidos de Kabata-Pendias (1995).

6.3. Documentación fotográfica



Figura 17: Construcción de los tanques de sedimentación de la planta de tratamiento Kumurana – La Lava sector Chapampa en agosto de 2002.



Figura 18: Terminación de las obras de construcción en la parte del tratamiento físico de la futura planta de tratamiento.



Figura 19: El socavón de la Mina Santa Catalina con los drenajes ácidos en la parte derecha del carril.



Figura 20: El tanque de caleó, donde se mezcla el cal crudo con agua natural para después añadir a el DAR saliendo de la Mina Santa Catalina.



Figura 21: La planta de calef, donde se mezcla el DAR con la solución de cal altamente alcalina, iniciando de esta manera el tratamiento químico.



Figura 22: La panel de control de pH por el cual se maneja continuamente la dosificación de la lechada de cal.



Figura 23: La laguna Santa Catalina antes de embocar en el Río Kumurana, mostrando un pH muy impactado ($\text{pH} < 3$) por otros proyectos mineros.



Figura 24: Los tanques de sedimentación durante su limpieza de los lodos restantes que sirven para el primer tratamiento físico.



Figura 25: La laguna de clarificación con las tres cachimbas al fondo (la tercera no se percibe en esta imagen) para asegurar el segundo tratamiento físico y los tanques de sedimentación en el primer plano.



Figura 26: Los tanques de de evaporación para los lodos (uno de los puntos todavía críticos en el proceso de tratamiento) durante su evacuación.



Figura 27: Los diques de cola en frente del ingenio y la casa de administración de la Empresa Minera Agrícola “Kumurana” que imponen el segundo grave problema pendiente, pues en poco tiempo es previsible que estos diques embalsarán el agua ácida del Río Kumurana, provocando una exfiltración de los diferentes minerales tóxicos contenidos en estas colas.



Figura 28: El ingenio y el complejo de administración de la Empresa Minera Agrícola “Kumurana” en el fondo, y en el primer plano los diques de cola y el cauce del Río Kumurana.

Datos crudos

6.3.1. *Análisis de la Fundación MEDMIN*

pH

Fecha	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
25.01.2004; 9 a.m.	3.3	8.7	6.7	
25.01.2004; 5 p.m.	3.3	11.6	7.3	5.6
04.02.2004; 9 a.m.	3.3	9.8	8.2	
04.02.2004; 5 p.m.	3.2	11.2	10.2	6.6
14.02.2004; 9 a.m.	3.1	10.1	8.4	
14.02.2004; 5 p.m.	3.4	9.7	8.2	6.5

Potencial

Fecha	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
25.01.2004; 9 a.m.	1.0	1.0	0.9	
25.01.2004; 5 p.m.	1.2	1.5	0.9	0.8
04.02.2004; 9 a.m.	1.3	1.3	1.2	
04.02.2004; 5 p.m.	1.1	1.3	1.1	0.8
14.02.2004; 9 a.m.	1.4	1.3	1.1	
14.02.2004; 5 p.m.	1.5	1.5	1.2	0.8

Las indicaciones están en mV.

Temperatura

Fecha	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
25.01.2004; 9 a.m.	3.7	3.9	13.0	
25.01.2004; 5 p.m.	3.7	4.0	8.3	9.7
04.02.2004; 9 a.m.	4.0	4.1	6.0	
04.02.2004; 5 p.m.	3.9	4.2	7.6	9.5
14.02.2004; 9 a.m.	4.4	3.8	13.8	
14.02.2004; 5 p.m.	3.9	4.5	8.1	10.7

Las indicaciones están en °C.

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

6.3.2. Análisis de la SGS

25. 1. 2004:

 SGS Bolivia S.A. Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)	LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126
---	---

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO

ORDEN N°	MA – 014– 2004	FECHA EMISIÓN	: 2004 - febrero - 06
CLIENTE	: FUNDACIÓN MEDMIN		
MATERIAL	: AGUA		
NUESTRA REFERENCIA	: COMERCIAL		
ENSAYOS SOLICITADOS	: Cu, Zn, Pb, Cd, As, Fe, Sn, Cn ⁻¹ libre, SST.		
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO	: 2004- enero – 28		

Su referencia:	Cu mg/l	Zn mg/l	Pb mg/l	Cd mg/l	As mg/l	Fe mg/l	Sn mg/l	SST mg/l	Cn ⁻¹ libre mg/l
P1 -1-1	20.5	19.25	0.27	0.12	1.80	132.0	<0.01	296.0	<0.01
P1 -1-2	19.0	20.75	0.07	0.12	0.80	112.5	<0.01	288.0	<0.01
P2 -1-1	18.5	18.25	0.18	0.12	2.40	132.5	<0.01	744.0	<0.01
P2 -1-2	16.0	17.50	0.10	0.12	2.20	122.5	<0.01	708.0	<0.01
P3 -1-1	10.75	17.0	0.12	0.09	2.40	87.5	<0.01	484.0	<0.01
P3 -1-2	14.00	21.00	0.10	0.11	1.70	120.0	<0.01	616.0	<0.01
P4 -1-2	9.00	5.25	<0.01	0.04	<0.01	1.27	<0.01	24.0	<0.01
Límite de detección	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01
Métodos utilizados	Standard Method for Examination of Water and Wastewater, 20 th Edition, 2000, APHA,AWWA,WEF.								
Observaciones	Muestras analizadas por duplicado.								


Vilma Hurtado
Jefe Medioambiente

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención
Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado. NO reproducir parcialmente sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. ©2004

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

4. 2. 2004:

 SGS SGS Bolivia S.A. Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)	LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126
--	---

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO

ORDEN N°	MA – 018– 2004	FECHA EMISIÓN	: 2004 - febrero - 026
CLIENTE	: FUNDACIÓN MEDMIN		
MATERIAL	: AGUA		
NUESTRA REFERENCIA	: COMERCIAL		
ENSAYOS SOLICITADOS	: Cu, Zn, Pb, Cd, As, Fe, Sn, Cn ⁻¹ libre, SST.		
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO	: 2004- enero – 28		

Su referencia:	Cu mg/l	Zn mg/l	Pb mg/l	Cd mg/l	As mg/l	Fe mg/l	Sn mg/l	SST mg/l	Cn ⁻¹ libre mg/l
P1 -2-1	33.75	41.25	0.19	0.14	0.80	170.96	<0.01	178.0	<0.01
P1 -2-2	20.63	31.88	0.10	0.11	0.60	119.49	<0.01	72.0	<0.01
P2 -2-1	32.50	39.38	0.16	0.14	3.0	262.50	<0.01	906.0	<0.01
P2 -2-2	19.38	31.25	0.19	0.11	1.80	169.12	<0.01	1292.0	<0.01
P3 -2-1	24.38	35.63	0.20	0.11	2.20	180.15	<0.01	850.0	<0.01
P3 -2-2	16.25	30.0	0.15	0.10	2.20	143.38	<0.01	726.0	<0.01
P4 -2-2	1.95	0.27	<0.01	0.02	<0.01	0.88	<0.01	46.0	<0.01
Límite de detección	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01
Métodos utilizados	Standard Method for Examination of Water and Wastewater, 20 th Edition, 2000, APHA,AWWA,WEF.								
Observaciones	Muestras analizadas por duplicado.								



Vilma Hurtado
Jefe Medioambiente

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención
Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado: NO reproducir parcialmente sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. #2004

Programa de Investigación: Planta de Tratamiento Kumurana – La Lava

14. 2. 2004:

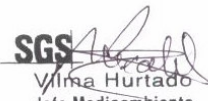
 SGS SGS Bolivia S.A. Miembro del Grupo SGS (Société Générale de Surveillance)	LABORATORIO PARA ENSAYOS MEDIOAMBIENTALES SGS LA PAZ – Av. Mcal. Santa Cruz, Ed. Hansa P-5, Telf.: (591-2) 40-8080 SGS ENVILAB – El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro Telf.: (591-2) 82-4160 / 82-1139, Fax: (591-2) 82-0126
--	---

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO

ORDEN N°	MA – 029– 2004	FECHA EMISIÓN :	2004 - marzo - 01
CLIENTE	: FUNDACIÓN MEDMIN		
MATERIAL	: AGUA		
NUESTRA REFERENCIA	: COMERCIAL		
ENSAYOS SOLICITADOS	: Cu, Zn, Pb, Cd, As, Fe, Sn, SST.		
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO	: 2004- febrero – 16		

Su referencia:	Cu mg/l	Zn mg/l	Pb mg/l	Cd mg/l	As mg/l	Fe mg/l	Sn mg/l	SST mg/l
P1 -3-1	26.25	34.38	0.33	0.14	1.0	237.50	<0.01	200.0
P1 -3-2	32.50	41.25	0.17	0.17	0.70	243.75	<0.01	104.0
P2 - 3-1	26.25	32.50	0.42	0.14	1.35	262.50	<0.01	981.0
P2 -3-2	23.13	25.63	0.21	0.14	1.25	187.50	<0.01	1938.0
P3 -3-1	15.00	18.75	0.37	0.11	1.10	118.75	<0.01	820.0
P3 -3-2	21.88	26.88	0.17	0.12	0.75	181.25	<0.01	834.0
P4 -3-2	0.63	0.30	<0.01	0.02	<0.01	1.45	<0.01	20.0
Límite de detección	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.05
Métodos utilizados	Standard Method for Examination of Water and Wastewater, 20 th Edition, 2000, APHA,AWWA,WEF.							
Observaciones	Muestras analizadas por duplicado.							


Vilma Hurtado
Jefe Medioambiente

El presente certificado, refleja nuestros resultados solamente en el momento y el lugar de la intervención
Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.

Documento Controlado. NO reproducir parcialmente sin la autorización escrita del Laboratorio SGS Bolivia S.A. ©2004

6.4. Bibliografía

6.4.1. *Literatura científica*

Deutschschweizerische Mathematikkommission (DMK), Deutschschweizerische Physikkommission (DPK) (1977 4. ed): Formeln und Tafeln; Mathematik - Physik. Orell Füssli Verlag, Zürich.

Ley de Medio Ambiente (27 – Abril – 1992): Ley N° 1333.

Métodos Normalizados. Edición 20 APHA (American Public Health Association) - AWWA (American Water Works Association) - WPCF (Water Pollution Control Federation) y ASTM (American Society for Testing and Materials).

Fent K. (1998): Ökotoxikologie: Umweltchemie, Toxikologie, Ökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart / New York.

Reglamentos a la Ley de Medio Ambiente (1995): Decreto Supremo N° 24176.

Schwarzenbach R. P., Gschwend P. M. und Imboden D. M. (1993): Environmental Organic Chemistry. John Wiley & Sons, Inc. New York etc.

Sigg L. und Stumm W. (1994): Aquatische Chemie: Eine Einführung in die Chemie wässriger Lösungen und natürlicher Gewässer. Vdf Verlag der Fachvereine an den Schweizerischen Hochschulen und Techniken AG und B. G. Teubner, Zürich / Stuttgart.

6.4.2. *Páginas de Web*

<http://www.eng.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/SEDIMENT/sedsettle.html>

<http://www.net-lexikon.de/>

<http://de.wikipedia.org/>

<http://www.arrakis.es/~lluengo/>

<http://laguna.fmedic.unam.mx/>

<http://www1.universia.net/CatalogaXXI/>

http://cuhwww.upr.clu.edu/~inieves/w_CONDUCTANCIA-.htm

(Todas las páginas de web indicadas se hicieron consultar a fines de abril 2004)