

*Autoridad Binacional del
Lago Titicaca ALT*

*Programa de las
Naciones Unidas
para el Desarrollo PNUD*

PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD DEL SISTEMA TDPS

Uso de Totorales para la Descontaminación en Bolivia
Contrato 21.06

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN: PLANTA DE TRATAMIENTO COPACABANA

(Sistema de Flujo Subsuperficial)

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

La Paz, enero de 2003

Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana

INDICE

Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana	2
1. Planta de tratamiento y programa de investigación Copacabana	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Introducción	3
1.3. Los objetivos.....	4
2. La planta de tratamiento.....	5
2.1. Procesos biológicos	5
2.2. Funcionamiento técnico	6
3. Campaña de investigación	8
3.1. Metodología.....	8
3.2. Reporte del seguimiento	10
4. Interpretación de Resultados Obtenidos	12
4.1. Parámetros de referencia	12
4.2. Oxígeno y carbono orgánico y inorgánico	16
4.3. Nutrientes	20
4.4. Metales pesados.....	23
4.5. Coliformes fecales	28
5. Conclusiones	30
6. Apéndice	32
6.1. Expresiones científicas	32
6.2. Información adicional	33
6.3. Documentación fotográfica	34
6.4. Datos crudos	38
6.5. Bibliografía.....	53

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN: PLANTA DE TRATAMIENTO COPACABANA

Institución: Fundación MEDMIN

Encargados: Danilo Bocángel; coordinador del proyecto

Florian Erzinger; asistente científico

Patricia Delgadillo; asistente técnico

1. Planta de tratamiento y programa de investigación Copacabana

1.1. Antecedentes

En 1998, los gobiernos de Perú y Bolivia han suscrito con el programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), el convenio de asistencia técnica y financiera para la ejecución del proyecto “Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)”, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial GEF, a ser ejecutado por la Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT).

En el marco de ejecución del proyecto "BOL / 98 / G-31, Conservación de la Biodiversidad en la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)", se viene ejecutando el subproyecto “Pruebas del Uso de Totorales para la Descontaminación en el Ámbito Boliviano” (21.06), a cargo de la Fundación MEDMIN.

El contrato fue firmado en octubre de 2000 y tras una serie de adendas, se logró extender el mismo hasta febrero de 2003. El retraso en la culminación de este proyecto tiene su origen en diversas causas entre las que podemos citar:

- Ausencia de poblaciones rurales ubicadas a orillas del lago que cuenten con un sistema de alcantarillado.
- Las únicas poblaciones identificadas bajo este sistema fueron: Copacabana, Desaguadero y San Pedro de Tiquina, de las cuales fueron elegidas como poblaciones beneficiarias Copacabana y Desaguadero.
- En Copacabana se tropezó con la falta de terreno para la construcción de la planta. Finalmente el terreno elegido pertenecía a la Prefectura del Departamento y los trámites de transferencia de los mismos al Municipio de Copacabana demoraron bastante tiempo.
- El cambio de concepción del proyecto original, requirió la contraparte financiera de la Alcaldía de Copacabana para la construcción de la planta de tratamiento, motivo por el cual se realizaron sucesivos viajes y reuniones en Copacabana juntamente con representantes del ALT PNUD hasta lograr la firma de Convenios.
- La contraparte del Municipio de Copacabana tardó en hacerse realidad por los problemas políticos que vivía entonces.
- Una vez finalizada la construcción de la planta de tratamiento en Copacabana, el cárcamo de bombeo a cargo del municipio no se encontraba funcionando. Con ayuda de las motobombas de

MEDMIN, se logró mantener vivos los plantines de totoras por espacio de dos meses hasta que el cárcamo funcionó.

- Se tuvo que esperar un tiempo aproximado de dos meses hasta que las totoras reaccionen y se termine de activar el sistema.
- En el Desaguadero, por la magnitud de las obras civiles a construir, también se gestionó la contraparte de la ALT, para la construcción de terraplenes y sedimentadores, como parte de su proyecto de saneamiento ambiental y alcantarillado.

Pese a las numerosas dificultades presentadas que acabaron de ser descritas, finalmente se logró culminar obras satisfactoriamente en las regiones elegidas. El proyecto inicialmente estuvo dirigido a evaluar el comportamiento de los totorales en la descontaminación de aguas servidas, sin embargo, gracias al esfuerzo de las instituciones involucradas a lo largo de estos dos años y medio, se hizo posible extender los alcances del mismo al construir obras de verdadera magnitud en Copacabana y Desaguadero, las cuales formarán parte de los proyectos de mayor impacto para el bienestar social, ecológico y de salud pública durante los próximos años.

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 el **Monitoreo** ejecutado a través de un Programa de Investigación. Todos los criterios técnicos estuvieron orientados al tratamiento de desagües de poblaciones humanas sin impacto adicional de origen industrial.

De manera general, la planta de tratamiento consta de un **proceso primario** de eliminación y sedimentación de sólidos gruesos y suspendidos, seguido de un **proceso secundario** de purificación mediante tres celdas de tratamiento con flujo subsuperficial en el cual están insertadas las totoras, sistema en el que alternan procesos químicos y biológicos que favorecen la descontaminación.

Una vez concluidas las obras, se realizaron pruebas hidráulicas y reajustes en la planta para dar lugar al Programa de Investigación, que evalúe la eficiencia de purificación de la planta de tratamiento. Los resultados de este monitoreo de un mes y medio de duración se presentan y valorizan en el presente informe. Para la operación y mantenimiento óptimo de la planta de tratamiento se elaboró y entregó a los municipios de Copacabana y Desaguadero un Manual de Operación y Funcionamiento, con el fin de asegurar una purificación máxima de las descargas.

El Programa de Investigación contempló la medición de parámetros in situ: caudal, pH, temperatura y el potencial mV y el oxígeno disuelto del agua en los puntos de descarga de los tubos de evacuación. Los mismos parámetros se midieron in situ en el agua que se tomo del suelo de las celdas de tratamiento a una profundidad de 20cm mediante tubos cribados. Adicionalmente se tomó muestras de suelos de las celdas de tratamiento y de plantas (para analizar el contenido de contaminantes en raíces y tallos) para hacer analizar las concentraciones de nitrógeno total, fósforo total, del plomo y del cadmio además de sólidos suspendidos y definir la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) en las muestras de agua y las concentraciones de plomo y de cadmio en las muestras de suelo y raíces de las totoras.

A continuación, como parte del proyecto, se explican los objetivos bajo los cuales fue construida la planta de tratamiento de aguas servidas y los objetivos de la campaña de investigación. Para facilitar al lector del presente informe científico el entendimiento del funcionamiento de la planta de tratamiento, en el capítulo 2 se da una breve introducción en el funcionamiento biológico y técnico de una planta de purificación de aguas servidas mediante *tratamiento pasivo como es el caso de*

Copacabana o Desaguadero. En el capítulo 3 se describe la campaña de investigación, iniciando con la explicación de la *metodología utilizada*, seguido por un breve reporte del seguimiento de la campaña. Luego, en la parte principal de presente informe, el capítulo 4, *se presenta parámetro por parámetro los resultados de las mediciones de manera gráfica y se realiza una interpretación de los datos*. Al final, en el capítulo 5 de este documento, los resultados son discutidos y evaluados para deducir algunas conclusiones fundamentales sobre el funcionamiento y la eficiencia de la planta de tratamiento de Copacabana. La documentación de la campaña por fotos y los datos crudos de laboratorio, seguido por una breve explicación de las expresiones científicas utilizadas en este informe tiene lugar en el apéndice, capítulo 6.

1.3. Los objetivos

Como objetivos prácticos del proyecto y del Programa de Investigación, se tienen:

Dentro del Proyecto:

- Cumplir una de las partes fundamentales del contrato 21.06 del Convenio de asistencia técnica y financiera para la ejecución del proyecto "Conservación de la biodiversidad de la Cuenca del Lago Titicaca – Desaguadero – Poopó – Salar de Coipasa (TDPS)", suscrito con el Programa de las Naciones Unidas (PNUD): Validar las plantas de totoras y los humedales, es decir los sistemas de flujo subsuperficial (SFS) como una nueva tecnología de purificación a aguas residuales humanas en el perímetro Altiplanico

Específicos de la Investigación:

- Cuantificar la eficiencia de la planta de tratamiento, por un lado respecto de la eliminación de los nutrientes claves para evitar la eutrofización de sistemas acuáticos y por otro lado de la reducción de los contaminantes como la materia orgánica, los sólidos suspendidos, los coliformes y metales pesados y además conocer la influencia del sistema descontaminadora al pH y a la temperatura del agua tratado.
- Cuantificar el aumento progresivo en los niveles de oxígeno después del tratamiento en cada una de las celdas con totora.
- Realizar un análisis comparativo de las concentraciones de los metales pesados más importantes en aguas residuales humanas entre los suelos contaminados y las plantas de totoras mismas que crecen en estos suelos.
- Investigar si la composición bioquímica de las totoras criadas en las celdas de tratamiento cumplen las normas de alimentación de animales domésticos.

2. La planta de tratamiento

2.1. Procesos biológicos

Desde los años sesenta, humedales contruidos con helófitas se utilizan como “sistemas naturales” en la purificación de aguas servidas y sus usos se intensificaron en las últimas décadas, por ser un método alternativo de bajo costo que mantiene la integridad del paisaje y tiene un alto valor ecológico. En los humedales contruidos como sistemas de purificación se encuentran implantados helófitas, plantas macrófitas enraizadas y emergentes del agua, que habitan en pantanos y aguas someras. De estos sistemas se tiene más y más ejemplos en los países en vías de desarrollo. *MEDMIN a través de este y tipo de proyectos, es la primera institución en el país que esta experimentando introducir este tipo de sistemas en zonas rurales afectadas por la contaminación doméstica, industrial y minera.*

Entre los helófitas más usados comúnmente se encuentran gramíneas como *Phragmites australis* entre otros. En el altiplano Andino se tiene dos helófitas que son aptas para el uso de la purificación de aguas contaminadas: La totora (*Schoenoplectus tatora*) y la matara (*Juncus andicola*), las cuales ya han sido probados como buenos purificadores dentro del sistema de humedales de tratamiento de aguas servidas (Franken 1988, 1990 y Taucer 1991,1993).

De acuerdo a diversos estudios realizados en el mundo, se ha demostrado que el lugar donde se realiza la mayor actividad de purificación de aguas servidas es en la zona de la rizósfera de los helófitas. Para el caso de la totora, el proceso se realiza en la raíz, rizoma y el substrato que la alberga. En cambio en el tallo y en la columna de agua que la rodea el proceso de purificación de las aguas servidas es menor. Asimismo, en la rizósfera de la totora se encuentra un conjunto de sustancias que inhiben y anulan el desarrollo de microorganismos fecales y patógenos y al mismo tiempo crea condiciones de oxigenación que son ideales para la producción de bacterias aeróbicas que contribuyen a la eliminación de nutrientes (fósforo, nitrógeno) y tóxicos (pesticidas, metales pesados etc.) disueltos en el agua (Bahlo & Wach 1993).

Eso implica que para un proceso de purificación de aguas servidas por medio de la totora, todo el caudal de agua contaminada, debe pasar por la zona de la rizósfera pues es en esta zona donde se efectuará el mayor tratamiento de las aguas servidas. El principio del sistema de tratamiento se basa entonces en utilizar la zona más activa de purificación de la totora para el tratamiento, la cual se ubica en la zona de la rizósfera y del substrato que la alberga. En consecuencia se tiene que tomar todas las precauciones de hacer transcurrir el agua mediante un sistema subsuperficial. Tomando en cuenta esta condición, agregando un filtro de substrato de arena especialmente preparado y adecuado para este fin, se establecen sistemas de tratamiento muy eficientes. El nivel de eficiencia de este tipo de plantas de purificación, es superior a cualquier otro sistema de tratamiento con plantas helófitas.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el proceso constructivo de un sistema de flujo subsuperficial es mucho más complejo que otros tipos de sistema de tratamiento pasivo con el uso de helófitas. Esto implica que el costo de inversión (construcción de la obra) puede llegar a ser muy elevado. No obstante, la ventaja de estos sistemas pasivos de flujo subsuperficial radica en dos aspectos fundamentales: por un lado *su eficiencia*, y por otro *sus bajos costos de operación y mantenimiento*. Esto último es el factor que más se debe tomar en cuenta a la hora de realizar estudios de factibilidad técnica en materia de medio ambiente en regiones rurales, en las que sus municipios no están en condiciones de afrontar elevados costos de operación y funcionamiento de una obra determinada. Menos aun, considerando que los presupuestos asignados al saneamiento ambiental en estos lugares son muy bajos en relación a otras prioridades como educación y salud.

2.2. Funcionamiento técnico

En la Figura 1 se describe de manera gráfica el sistema de tratamiento de aguas servidas de Copacabana. El diseño del sistema de humedales artificiales construido para el tratamiento de aguas servidas, en breve consta de una rejilla que permite retener los materiales gruesos, una cámara de distribución a un tanque de sedimentación, un dispositivo de distribución y regulación de caudal, por lo menos tres estanques de totora ubicados en serie para evacuar a una poza de control para luego introducir las aguas tratadas a la zona de evacuación a través de los peines de infiltración.

La rejilla consiste en una estructura metálica que permite retener los materiales más gruesos provenientes del cárcamo de bombeo ubicado a 2,5km, impidiendo su ingreso hacia el tanque sedimentador. Dicho sedimentador consiste en una estructura de concreto que tiene como función el tratamiento primario de las aguas a través de procesos físicos de sedimentación del material en suspensión que llega desde el cárcamo de bombeo. La compuerta de regulación, que sigue al tanque de sedimentación tiene la función de controlar el caudal de entrada al sistema de tratamiento con totoras, dependiendo del caudal necesario según los parámetros proyectados. El caudal ingresado al sistema de purificación biológica se controla por un medidor de caudal, un dispositivo un vertedero triangular de 90° sin contracción, con el cual uno puede definir la masa de agua pasando por unidad de tiempo por una relación matemática entre la altura del agua y el caudal.

$$\begin{aligned}\text{Vertedero rectangular: } Q &= 0.533 \cdot \sqrt{2g} \cdot C \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot h^{5/2} \\ &\cong 1.393 \cdot \sqrt{\frac{m}{\text{sec}^2}} \cdot h^{5/2} \quad [\text{m}^3\text{sec}^{-1}]\end{aligned}$$

Con:

Q := Caudal [m³sec⁻¹]

h := Diferencia de altura entre la punta del vertedero triangular y el nivel del agua antes del vertedero [m]

C := Coeficiente del vertedero dependiendo parámetros adicionales; en el caso de mediciones en el campo se pone un valor constante de 0,59 []

g := Constante gravitacional [msec⁻²]

θ := Ángulo del vertedero [°]

Una vez que el agua pasa por el medidor de caudal, inmediatamente llega a un dispositivo de aireación, que eficienta la purificación biológica en las celdas de tratamiento incrementando mayor oxigenación. Desde la caja de aireación, el agua pasa por tubos cribados a la primera celda de tratamiento y pasa en su mayor parte por flujo subterráneo por un relleno de 80cm, en la cual están insertadas las plantas de totora, el agente biológico fundamental en la descontaminación de aguas servidas. Una vez que el agua pasa por el sistema de filtros de arena, es recolectada al punto más bajo de la celda de tratamiento para luego ser evacuada a la siguiente celda de purificación pasando previamente por otra caja de aireación.

El sistema de tratamiento consta de 3 celdas de purificación. Las celdas de tratamiento están constituidas de arena con la granulometría especificada en el expediente técnico, la misma que sirve para el tratamiento y fijación de los agentes contaminantes. Una vez que las aguas han terminado de transcurrir por las tres celdas, el agua pasa finalmente por los peines de infiltración, sistema que extrae los últimos restos de sólidos suspendidos antes de su evacuación al Lago Titicaca.

Planta de tratamiento Copacabana

(Corte transversal)

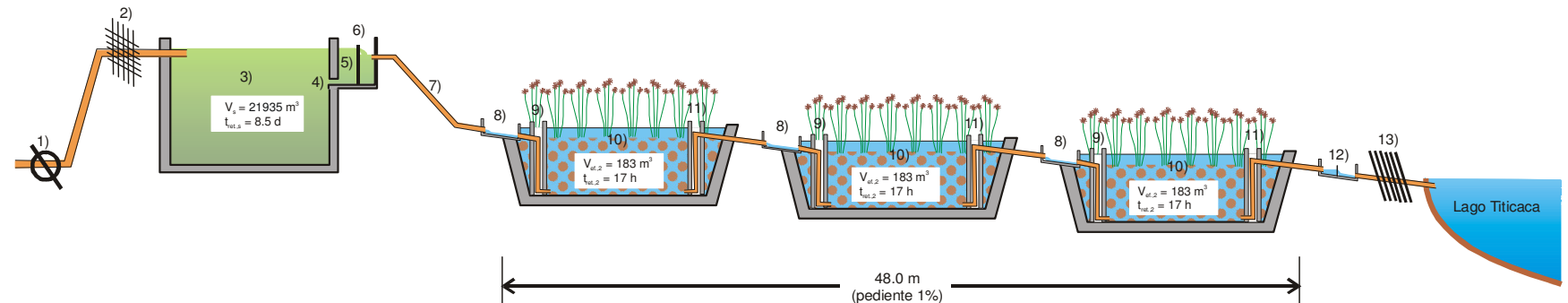


Figura 1: Esquema de funcionamiento de la planta de tratamiento de Copacabana: Las aguas servidas entran por bombeo en el tanque de sedimentación, de lo cual pasan las tres celdas de tratamiento planteadas con totoras (*Schoenoplectus tatora*) para finalmente ser tratadas por peines de infiltración 1) cárcamo de bombeo, 2) rejilla, 3) tanque de sedimentación con 4) compuerta de regulación de caudal, 5) poza de disipación de energía y 6) medidor de caudal, 7) la tubería de conexión al sistema principal, 8) dispositivo de aireación, 9) caja de distribución e inspección, 10) celdas de tratamiento, 11) caja de control de niveles, 12) medidor de caudal de salida y 13) peines de infiltración.

3. Campaña de investigación

3.1. Metodología

Muestreo

En el plan de muestreo existen siete puntos de muestreo y cuatro clases de muestras: agua, suelo y tanto raíces como tallos de plantas. Cuatro de los siete puntos corresponden a las cajas de aireación de cada celda de tratamiento y tienen como referencia (ver Figura 1):

- Tubo 1 (Entrada de agua a la primera celda de tratamiento que procede del tanque de sedimentación)
- Tubo 2 (Salida de agua de la primera celda de tratamiento)
- Tubo 3 (Salida de agua de la segunda celda de tratamiento)
- Tubo 4 (Salida de agua de la tercera celda de tratamiento)

Se recogió una muestra de agua en cada tubo para análisis de todos los parámetros (pH, potencial mV, temperatura, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto, demanda biológica y química de oxígeno, nitrógeno total, fósforo total, plomo, cadmio y colifecales) en un intervalo de tiempo de 7 días durante 35 días. Para determinar los caudales se registró el tirante en cada tubo. La frecuencia de muestreo se determinó en respecto del tiempo de retención del agua en el tanque de sedimentación, que se estimó en un promedio de 8½ días.

Los otros tres puntos corresponden a las celdas de tratamiento cuya referencia es:

- Celda 1 (Primera celda de tratamiento directamente después el tanque sedimentador)
- Celda 2 (Segunda celda de tratamiento)
- Celda 3 (Tercera celda de tratamiento antes de la salida del agua a los peines de infiltración)

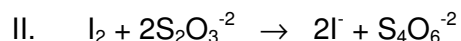
Se obtuvo una muestra de suelo y plantas (raíces y tallos separadamente) en cada celda para análisis de Pb y Cd al principio y al final de la campaña de monitoreo. También se registraron datos de pH, temperatura del agua y altura de saturación del agua (h_s) en cada celda y datos climáticos locales como la precipitación, la evaporación, la temperatura mínima, máxima, y la temperatura de mediodía del ambiente en el intervalo de tiempo de 1 día durante 7 días.

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 de oxígeno disuelto

Para determinación de oxígeno disuelto se emplea el método de Winkler: La prueba está basada en la adición a la muestra de una solución de manganeso divalente, seguido por un álcali fuerte dentro de un frasco con tapa de vidrio. El oxígeno disuelto presente oxida rápidamente a una cantidad equivalente del hidróxido manganeso precipitado y lleva a los hidróxidos a estados de valencia más altos. En la presencia de iones yoduro y acidificación, el manganeso oxidado revierte a su estado divalente con la liberación de yodo equivalente al oxígeno disuelto originalmente contenido en la muestra. El yodo es luego titulado con una solución estándar de tiosulfato:



Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana

Equipo de medición:

Kit para la teterminación de oxígeno disuelto, 0.2-4 y 1-20mg/L O₂, MOD. OX-2P, # 1469-00

Reactivos y materiales:

- Matraz DBO, 60mL, marcado en los 30mL, con tapón de vidrio esmerilado
- Matraz cuadrado de vidrio (para mezclar)
- Pinzas cortantes para cápsulas intermedias
- Cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 1
- Cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 2
- Cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 2
- Tarjeta de Instrucciones, juego de Prueba OX-2P
- Probeta, plástico 5.83mL
- Solución patrón estabilizada de tiosulfato de sodio, 0.0109 N, 100mL

Procedimiento:

Se llena el matraz para oxígeno (matraz con tapón de vidrio esmerilado) con la muestra de agua, dejando resbalar la muestra por el matraz suavemente durante 2 o 3 minutos, evitando la formación de turbulencias y burbujas en la muestra al llenar. Se inclina ligeramente el matraz y coloque el tapón de un golpe para evitar atrapar burbujas de aire.

Se quita el tapón y añadir el contenido de una cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 1 y de una cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 2 al matraz. Tapar el matraz suavemente para evitar atrapar burbujas de aire. Se sacude vigorosamente el matraz para mezclar. Se forman flóculos de precipitado. Se espera a que el precipitado se deposite aproximadamente hasta la mitad del volumen del matraz.

Se quita el tapón y añade el contenido de una cápsula de reactivo para oxígeno disuelto 3, tape el matraz suavemente para evitar atrapar burbujas de aire. Se sacudir vigorosamente el matraz. Los flóculos se disolverán y la muestra se volverá amarilla si contiene oxígeno disuelto.

Se llena hasta el máximo la probeta de plástico con la muestra hasta aquí preparada. Se vierte el contenido de la probeta en el matraz para mezclar. Se añade gota a gota la solución patrón de tiosulfato sódico al matraz. Contar cada gota añadida y agitar hasta mezclar tras añadir cada gota. Continuar añadiendo gotas hasta que la muestra se vuelva totalmente incolora. El número total de gotas de solución valorada equivale al total de oxígeno disuelto expresado en mg/L.

Determinación del pH y potencial mV

La acidez / alcalinidad se determina generalmente por método potenciométrico midiendo la concentración de 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 y el potencial mV 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 y microbiológicos, es decir las concentraciones del nitrógeno total (N_{tot}), del fósforo total (P_{tot}), del plomo (Pb), del cadmio (Cd) y de los sólidos suspendidos (SST) y tanto la demanda biológica de oxígeno (DBO), tanto la demanda química de oxígeno (DQO) en las muestras de agua y las concentraciones de plomo y de cadmio en las muestras de suelo y en las raíces de la plantas totaras 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 tres días después de la toma de muestras.

3.2. Reporte del seguimiento

4. 12. 2002:

Llegando a la planta de tratamiento, los encargados de la fundación MEDMIN encontraron al ingeniero de la obra, Sr. Guillermo Noriega, que les informó que dos días antes, los tubos de la planta se han destruidos por violencia obviamente por un acto de sabotaje. Por esta razón, los responsables del programa e investigación decidieron reponer el inicio de la campaña de medición al día 20 de diciembre 2002 para que se puede reparar la construcción y se establece un equilibrio de flujos de masa.

20. 12. 2002:

En este día, primero, los encargados de la fundación MEDMIN encontraron la planta de tratamiento sin ningún agua afluente, también el caudal en los tubos entre las tres celdas de tratamiento era muy bajo. El encargado del mantenimiento de la alcaldía de Copacabana, Sr. Felipe Maydana, les informa que por razón de corte energía eléctrica no era posible bombear el agua desde la canalización de la ciudad a la planta de tratamiento durante varios días. Después una medio hora, alcanzó meter el bombeo en marcha y así re-establecer la nutrición de la planta con el agua residual. Después haber esperado el establecimiento de un cierto equilibrio de flujos entre las celdas de tratamiento, los encargados de la fundación MEDMIN pudieron tomar las muestras de agua.

Una vez se estableció un caudal constante entre las distintas celdas, se midió los distintos parámetros in situ y se tomó las muestras de agua, de suelos y de plantas.

27. 12. 2002:

En este día se observó que el funcionamiento del sistema era estable en las condiciones de alimentación y en las celdas de tratamiento. Se realizó la medición del tirante y la toma de muestras para definición de los parámetros fisicoquímicos y biológicos.

3. 1. 2003:

El encargado de la fundación MEDMIN encontró la planta de tratamiento casi totalmente secado, es decir los caudales en los tubos 1, 2 y 3 que nutren a las tres celdas de tratamiento era casi nula. Sólo el efluente de la celda 3 muestra un flujo mínimo. Por el hecho de que el tiempo de retención en las tres celdas está aproximadamente en un día, se puede estimar que al menos desde este periodo la planta de tratamiento no estaba nutrido por aguas servidas. Como el tubo 2 (entre la celda 1 y 2) no tenía ningún flujo y no se pudo ubicar una persona responsable del mantenimiento a la planta de tratamiento de la alcaldía, no fue posible tomar una muestra de dicho tubo y, las tomas de muestras se pudo realizar solamente en los tubos 1, 3 y 4.

Además el encargado de la fundación MEDMIN encontró que una instalación de medición fue destruida otra vez por violencia. Esa situación insatisfactoria fue comunicado al encargado del mantenimiento de la alcaldía de Copacabana, Sr. Felipe Maydana, cuatro días más tarde.

10. 1. 2003:

Monitoreo del sistema de tratamiento estableciendo la variación del caudal esta vez el volumen del agua tratada era mayor. Se registraron datos de tirante en cada tubería. Considerando los procedimientos de muestreo se realizó la toma de muestras de las siguientes clases: agua, plantas y suelo también la caracterización de parámetros in situ.

10. 1. – 16. 1. 2003:

Durante un período de una semana se registró datos físicos y ambientales como los caudales que entraron las distintas celdas de tratamiento, la temperatura, el pH y el potencial mV del agua en las celdas y la temperatura ambiental, la precipitación y la evaporación para conocer mejor la relación entre estos parámetros exteriores y el funcionamiento de la planta de tratamiento.

17. 1. 2003:

En este día se observó que el volumen de agua tratada es mayor, las celdas tienen en su interior un alto nivel de agua, sin embargo con volumen constante. Además de la toma de muestreos de agua, plantas y de suelos y de la registración de los anteriormente mencionados datos ambientales se realizó también tomas fotográficas de los detalles constructivos de la planta.

4. Interpretación de Resultados Obtenidos

4.1. Parámetros de referencia

Para ganar una primer vista del agua contaminada que sea purificada física (por el tanque sedimentador) y biológicamente en la planta de tratamiento de Copacabana se presenta primeramente algunos parámetros de referencia como el pH, la temperatura y los sólidos suspendidos. Con estas informaciones ya se puede conocer la calidad del agua vagamente y estimar los requisitos generales a una tal planta de tratamiento.

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 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, impactan la integridad de los sistemas ecológicos y también a la salud del ser humano. La acidez o 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 y microbiológicos 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.

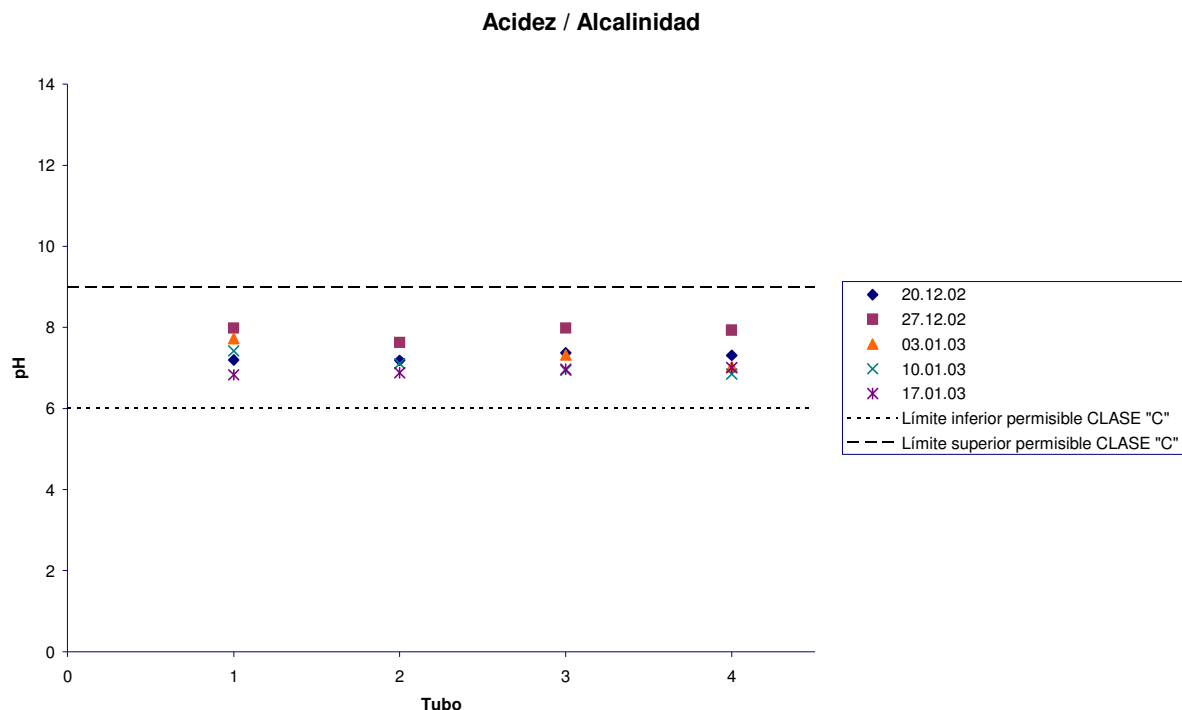


Figura 2: Los valores de pH en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

En la Figura 2, se encuentra una fluctuación de pH insignificante entre los dos valores extremos de pH 6,8 y pH 8,0 con un promedio alrededor de 7,3. Comparando los valores del inicio del proceso de purificación con los de la salida del agua hacia el Lago Titicaca, se observa en promedio una ligera reducción del pH de 7,4 a 7,2. Por el otro lado, el agua en el tubo 1 muestra una fluctuación en el tiempo un poco mayor que el agua que sale de la última celda de tratamiento. Estos hechos conjuntos se puede interpretar como una suave estabilización del pH por la reducción de los contaminantes anteriormente mencionados.

La normativa ambiental boliviana, pide para aguas potables (clase "A") 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 entra directamente al Lago Titicaca con la posibilidad de ser usada para riego de las chacras alrededor de la planta de tratamiento, para fines de este informe se utiliza la clase "C" 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 2.

En consecuencia, el agua que sale de la planta de tratamiento cumple absolutamente y en todos los casos, los límites permisibles tanto de la clase "C", como los de la clase "A".

Temperatura

La temperatura de un cuerpo de agua natural es el parámetro físico más importante de un ecosistema acuático, porque la temperatura influye directamente en todos los procesos microbiológicos y químicos, por ejemplo, en aguas estancadas (mar, lagos y humedales), el crecimiento de la masa biológica y de los microorganismos que viven en el agua, y en aguas corrientes, la saturación de oxígeno. Con temperaturas elevadas, el crecimiento biológico aumenta proporcionalmente y el punto de saturación de gas baja. En el caso de una planta de tratamiento, que purifica el agua por la asimilación de los distintos nutrientes y la reducción de las sustancias tóxicas disueltas en el agua, el objetivo principal es adquirir un ecosistema con productividad máxima. En consecuencia, el aumento de la temperatura en la planta misma es un efecto positivo.

En la Figura 3, se observa que el agua que entra por el tubo 1 a la primera celda de tratamiento está significativamente alterada en su temperatura, mostrando un promedio de 20,1 °C. con una fluctuación de $\pm 5,0^{\circ}\text{C}$; igualmente se caracteriza por una gran inestabilidad en su temperatura, esto debido a la larga permanencia del agua en el tanque de sedimentación y los grandes volúmenes de agua que almacena este tanque. Por otro lado, la fluctuación en los tubos 2, 3, y 4 se estabiliza progresivamente a 18,5 °C en promedio, con una fluctuación que disminuye de $\pm 3,7^{\circ}\text{C}$ hasta $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$. Eso significa que la sucesión de humedales provoca en la primera celda de tratamiento un enfriamiento del agua calentada en el tanque de sedimentación y al mismo tiempo asegura en las siguientes dos celdas de tratamiento la estabilización de la temperatura del agua alrededor de los 18 °C.

La Ley de Medio Ambiente Boliviana exige para desagües de la clase "C" que la alteración 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 un promedio anual del agua superficial del Lago Titicaca de 14°C ¹, se puede anticipar que el agua que sale de la planta de tratamiento cumple la ley en la mayor parte del tiempo, ya que la temperatura promedio del agua del lago Titicaca en esta época del año es de $17,5^{\circ}\text{C}$.

¹ Hay que tener en cuenta, que también el agua superficial muestra fluctuaciones de temperatura dependiente de la radiación solar de cada época.

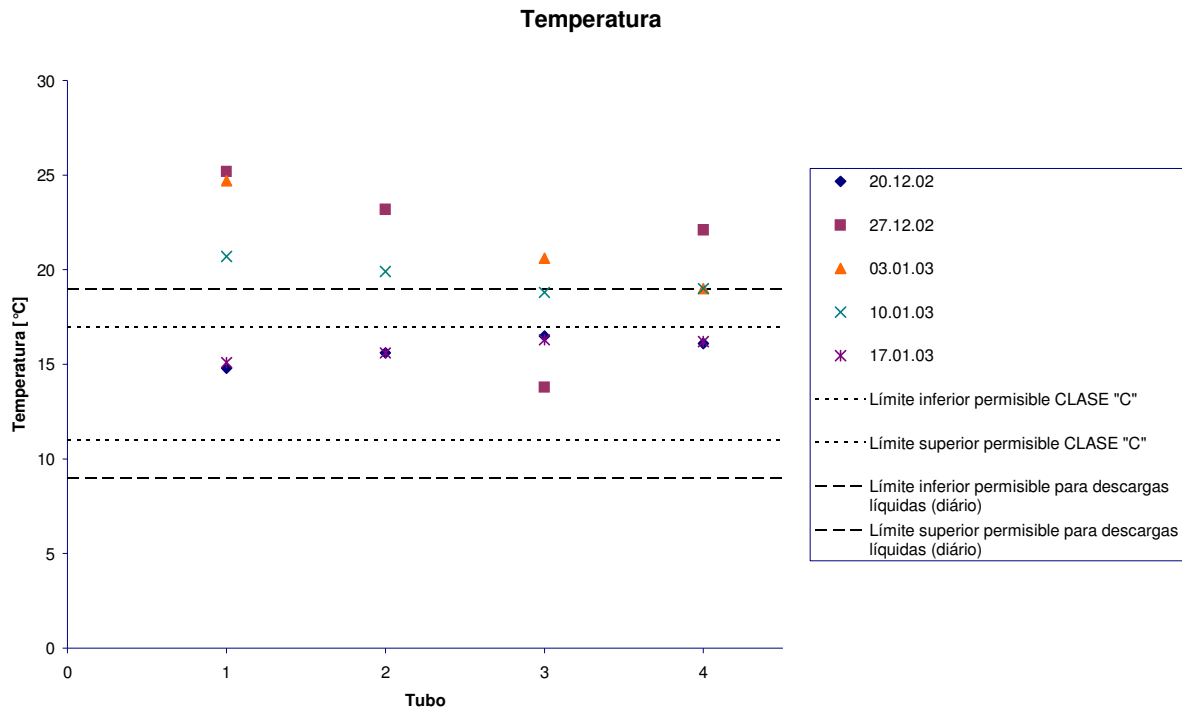


Figura 3: Los valores de temperatura en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

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 en 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, 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 bacteriano 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.

Del análisis de los sólidos suspendidos en la Figura 4, se observan dos hechos fundamentales: la concentración de sólidos suspendidos fluctúa tanto entre los distintos tubos como entre las distintas fechas de muestreo de manera muy fuerte. Además, en la sucesión de los humedales no se puede reconocer una reducción sistemática de los sólidos suspendidos. Sólo las muestras de agua del último muestreo, es decir del 17 de enero 2003, muestran un curso más o menos satisfactorio, cumpliendo al menos el límite permisible para descargas líquidas, la que pide una concentración máxima de sólidos suspendidos de 60mg/L.

La eficiencia de la planta en la reducción de los SST irá incrementándose a medida que los espacios porosos de la cama de arena sean ocupados por las raíces adventicias de la totora.

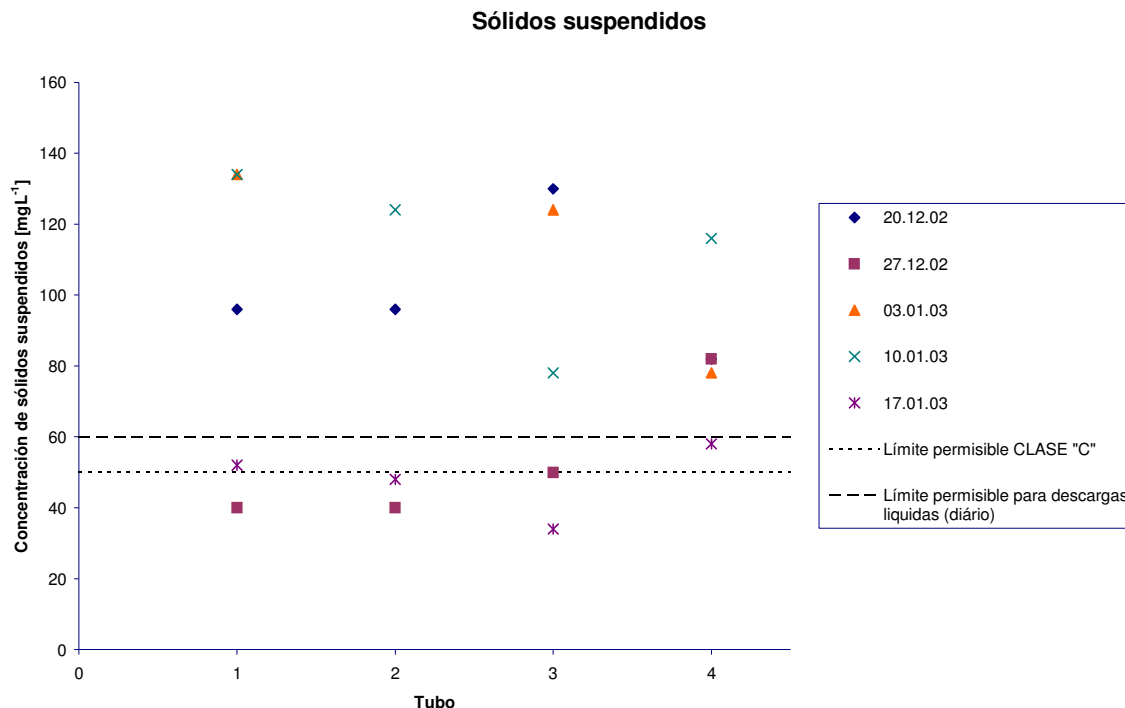


Figura 4: Las concentraciones de sólidos suspendidos en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

Las razones para este comportamiento inesperado en la concentración de los sólidos suspendidos se puede ver por un lado en el hecho que la construcción de la planta de tratamiento ha concluido recién antes que el programa de investigación ha comenzado, por lo cual, la rizósfera de las totora todavía no se pudo consolidar. Por otro lado, las mediciones se hicieron en la época de lluvia, lo que puede impactar la calidad de los resultados por el agua de lluvia que pasa adyacente a las celdas de tratamiento y entran en el sistema de purificación, bien cargada con sólidos suspendidos del suelo del entorno. Por último, hay que mencionar también que la nutrición inconstante de la planta de tratamiento con aguas servidos de la ciudad de Copacabana, como se ha observado varias veces durante el monitoreo, muy probablemente contribuye a fluctuaciones alteradas sobre todo en la cantidad de los sólidos suspendidos en estos desagües. Finalmente, se ha podido evidenciar que el cárcamo de bombeo no esta funcionando de manera adecuada, dejando ingresar apreciables cantidades de sólidos gruesos que se van disgregando pequeñas cantidades de SST a lo largo de su recorrido por el sedimentador.

El límite permisible para desagües de la clase "C" del RMCH, pide una concentración de sólidos suspendidos máxima de 50mg/L y el límite permisible para descargas líquidas una de 60mg/L. Como se ve en la Figura 4, la carga de los sólidos suspendidos en el agua que sale de la planta de tratamiento, está en la mayoría de las muestras muy por encima de los dos límites. En el futuro se tendría que averiguar, si con caudales más constantes se alcanzaría cumplir la ley.

4.2. Oxígeno y carbono orgánico e inorgánico

Los tres parámetros presentados en los siguientes subcapítulos, el oxígeno disuelto, la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) están en contexto con el metabolismo respiratorio de los organismos que viven en un cierto ecosistema, es decir, con el oxígeno consumido por organismos aeróbicos y el carbono orgánico e inorgánico que está acumulado en el agua y que potencialmente puede ser asimilado por procesos oxidativos. Con esta información, se pueden precisar conclusiones respecto al potencial Redox de un ecosistema acuático impactado por desagües y en consecuencia sobre los distintos procesos oxidativos que pueden tener lugar en éste.

Oxígeno disuelto

El parámetro químico más importante para la vitalidad de un ecosistema acuático es el contenido de oxígeno disuelto (OD) en el agua. La falta de oxígeno impide la existencia de vida aeróbica, es decir de los peces, larvas de insectos y seres inferiores que requieren oxígeno para respirar. Además, aguas con concentraciones de oxígeno disuelto por debajo de 1,9 mg/L inician los procesos oxidativos anaeróbicos con la transformación de nitrato en nitrógeno molecular (N_2) y amonio (NH_4^+), con el producto secundario de nitrito (NO_2^-). Los últimos dos compuestos mencionados son altamente tóxicos. En el caso extremo de la ausencia casi absoluta de oxígeno, es decir en entornos anóxicos con concentraciones de oxígeno disuelto por debajo de 0,15 mg/L, el potencial reductor disminuye hasta que las bacterias anóxicas utilicen sulfato (SO_4^{2-}) para oxidar la materia orgánica, lo que resulta en la producción de sulfuro de hidrógeno (HS^-), sustancia que hace que el agua sea no potable.

Como se aprecia en la Figura 5, el agua que entra a la planta de tratamiento por el tubo 1 muestra un rango en el contenido de oxígeno disuelto entre 0,0mg/L y 2,0mg/L con un promedio de 0,6mg/L. Se puede decir que este agua, por razón de fuertes procesos oxidativos en el tanque de sedimentación, es anaeróbica hasta anóxica. Sin embargo, con la sucesión de las celdas de tratamiento, la concentración del oxígeno disuelto sube significativamente hasta un promedio de 2,7mg/L, un nivel entonces que está dentro de los parámetros aeróbicos. Este fenómeno puede ser atribuido al aporte de oxígeno atmosférico por procesos simbióticos en la rizósfera de las totoras.

El límite permisible para desagües de la clase "C" del RMCH, exige un contenido mínimo de oxígeno disuelto de 60% de la concentración de saturación. Para descargas líquidas la ley no reconoce ningún límite para el contenido de oxígeno disuelto. Saliendo de una presión atmosférica de 0,61atm. en la altura de Copacabana (3'868 msnm.) según la fórmula de altura barométrica² y una presión parcial del oxígeno en el aire de 23%, se puede calcular la concentración de saturación en el cuerpo de agua superficial del Lago Titicaca por la Ley de Henry:

$$K_H(O_2) = \frac{[O_2]_{sat.}}{p_{O_2}(h=3'868m.)} = 1,26 \cdot 10^{-3} M / atm.$$

$$\text{En consecuencia: } [O_2]_{sat.}(h=3'868m.) = 0,177mM = 2,84mgO / L$$

Según estos cálculos, la concentración mínima de oxígeno disuelto que se debe establecer para aguas de la clase "C" que ingresen al cuerpo receptor del Lago Titicaca es 1,7 mg de oxígeno / L.

² La fórmula de altura barométrica: $p(h) = p_0 \cdot e^{\frac{-\rho_0 \cdot g \cdot h}{p_0}}$

con: $p_0 = p(h=0) = 101325Pa$
 $\rho_0 = \rho(h=0) = 1,293kg/m^3$

Como se puede ver en la Figura 5, las muestras de agua que se tomaron del tubo 4 tienen enteramente un contenido de oxígeno disuelto por encima de este límite.

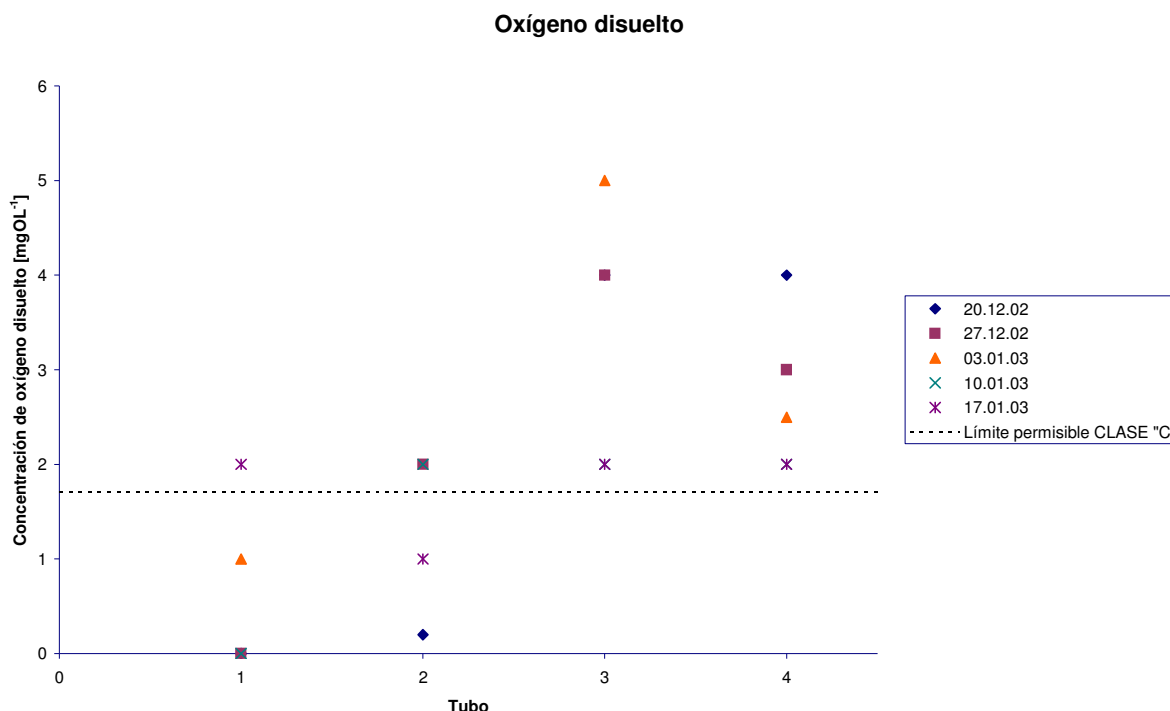


Figura 5: Las concentraciones de oxígeno disuelto en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según el RMCH.

Demanda biológica de oxígeno

La demanda biológica de oxígeno (DBO) representa la cantidad de carbono de origen biológico, es decir orgánico, disuelto en un cuerpo de agua. En otras palabras, la DBO nos brinda información acerca de la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica presente en el agua. En la naturaleza, el carbono orgánico se asimila por organismos quimioheterotrofos aeróbicos o anaeróbicos por la oxidación del carbono con las sustancias oxidativas presentes en un cierto entorno en la siguiente secuencia: Oxígeno (O_2), nitrato (NO_3^-), óxido de manganeso (MnO_2), hidróxido de hierro ($FeOOH$) y sulfato (SO_4^{2-}). El interés ecológico en este parámetro un poco abstracto, es conocer el potencial de un agua cargada con materia orgánica de reducir al potencial Redox en el cuerpo de agua recipiente por la oxidación de este material orgánico.

Evaluando los resultados presentados en la Figura 6, se reconoce que a excepción de la muestra del 17 de enero 2003, los aguas tomadas del tubo 1 se caracterizan por una demanda biológica de oxígeno muy elevada, $123mgO_2/L$ hasta $175mgO_2/L$. De igual manera, se observa que el contenido de materia orgánica disminuye exponencialmente en las siguientes celdas de tratamiento hasta que las muestras de agua del tubo 4 muestran un promedio de $22mgO_2/L$. Una razón de la presencia de valores relativamente bajos en los cuatro tubos el día 17 de enero de 2003, puede ser la dilución de los desagües de la ciudad de Copacabana por las lluvias fuertes que empezaron esos días, lo que se puede verificar en los caudales significativamente elevados medidos en estos días (ver cap. 0.).

Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana

Tomando en cuenta sólo los datos de los primeros cuatro muestreos, se puede calcular una reducción promedio del DBO de $146\text{mgO}_2/\text{L}$ a $25\text{mgO}_2/\text{L}$, es decir una eficiencia de purificación de la planta de tratamiento de -83%.

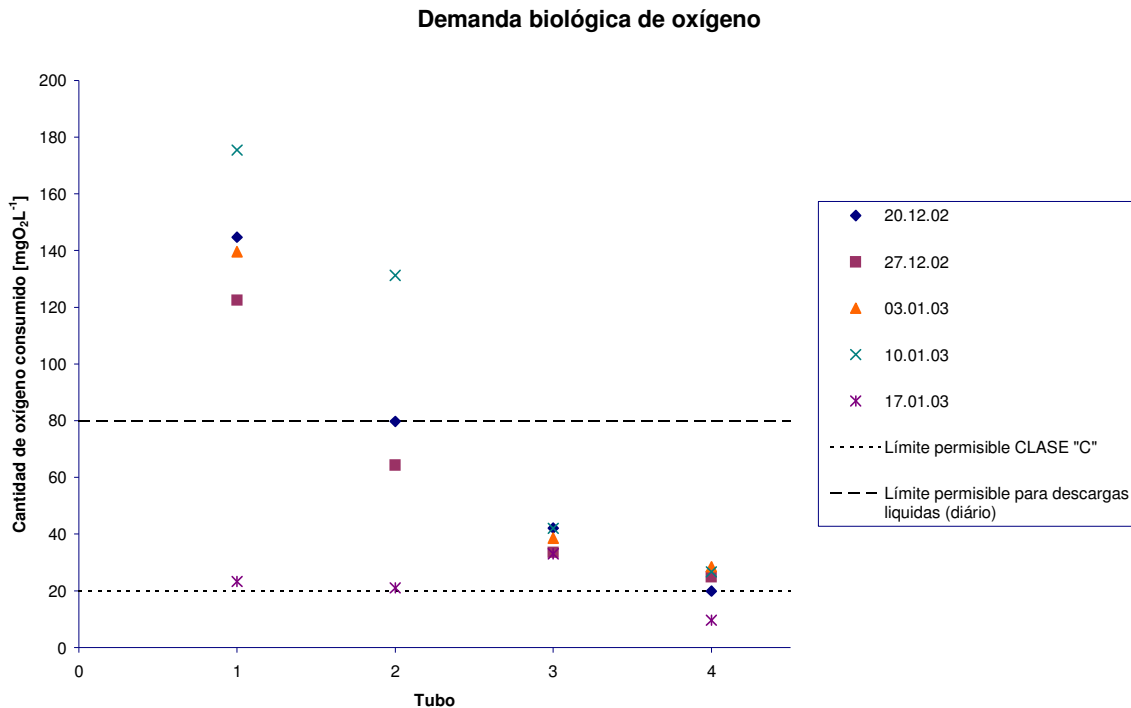


Figura 6: Las cantidades de oxígeno consumido por demanda biológica en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según del RMCH.

La normativa ambiental para este parámetro presenta un límite permisible para desagües de la clase "C" máxima de $20\text{mgO}_2/\text{L}$, mientras que el límite permisible para descargas líquidas es $80\text{mgO}_2/\text{L}$. Como se ve en la Figura 6, el agua que sale de la planta de tratamiento para desembocar en el Lago Titicaca, cumple el límite para descargas líquidas en todas las muestras y con el límite de la clase "C" al menos en un parte de las muestras.

Después de un tiempo mayor de estabilización ecológica de la planta de tratamiento, se piensa casi con total certeza que los niveles de DBO reducirán hasta encontrarse en todos los casos dentro de la Clase "C". En unos meses más, cuando los procesos de degradación de materia orgánica en las tres celdas de purificación sean más eficientes, la carga de carbono de origen biológico en el agua que sale de la planta de tratamiento será más baja. Una condición importante para que eso suceda sin embargo, es que los caudales en los tres tubos de nutrición al sistema sean lo más constante posibles.

Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO) representa, en contraste a la DBO, la cantidad de carbono inorgánico disuelto en un cuerpo de agua. En la naturaleza, el carbono inorgánico se asimila por organismos químiolitoautótrofos, los cuales en su mayoría son aeróbicos, es decir utilizan el oxígeno disuelto en el agua como medio de oxidación. De igual manera, el interés ecológico en este parámetro, es conocer el potencial de un agua cargada con carbono inorgánico para reducir al potencial Redox en el cuerpo de agua receptora por la asimilación de este carbono inorgánico. En otras palabras, la DQO nos brinda información acerca de la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar el carbono inorgánico presente en el agua.

El análisis de la demanda química de oxígeno nos da una imagen muy similar al de la demanda biológica de oxígeno, presentada en el subcapítulo anterior. Como se reconoce en la Figura 7, la carga de carbono inorgánico en el tubo 1 está muy elevada en las muestras del 20 de diciembre de 2002, 27 de diciembre de 2002, 3 de enero de 2003 y 10 de enero de 2003, mostrando valores entre 392mgO₂/L y 550mgO₂/L. Igualmente como la DBO, la DQO se reduce en las muestras de estos días exponencialmente, al transcurrir el agua por las tres celdas de purificación, mostrando finalmente un promedio de 89mgO₂/L en el tubo 4. Considerando otra vez solamente los resultados de los primeros cuatro muestreos, se calcula una eficiencia de purificación del agua con respecto a la carga de carbono inorgánico de -78%.

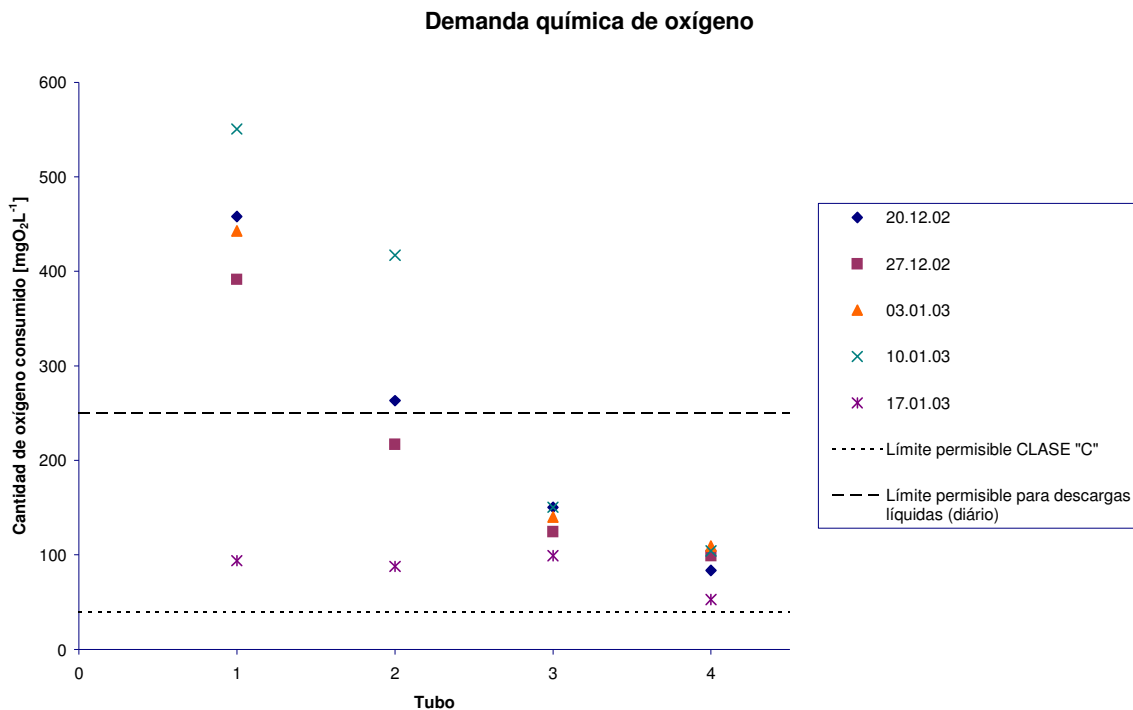


Figura 7: Las cantidades de oxígeno consumido por demanda química en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con los límites permisibles para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

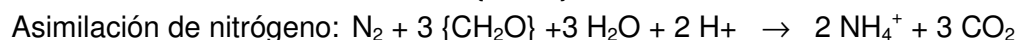
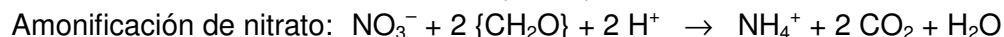
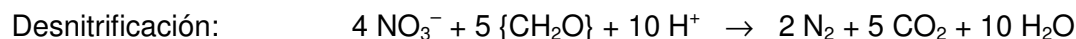
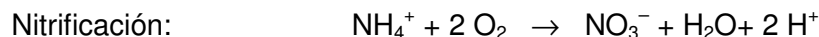
El límite permisible para la clase "C" del RMCH, exige una demanda química de oxígeno máxima de 40 mgO₂/L y el límite permisible para descargas líquidas exige 250mgO₂/L. Como vemos en la Figura 7, la carga de carbono inorgánico en el agua que sale de la planta de tratamiento está muy por debajo del límite para descargas líquidas y suavemente por encima del límite para desagües de la clase "C". Igualmente como en el caso del parámetro DBO, se puede anticipar que en los próximos meses, con un mantenimiento de la planta de tratamiento óptimo y constante, también los valores de carbono inorgánico disuelto en el agua que desemboca al Lago Titicaca estarán por debajo del límite de los desagües de la clase "C".

4.3. Nutrientes

En los próximos dos subcapítulos se presentan y evalúan los datos de las dos sustancias consideradas como nutrientes en ecosistemas acuáticos, el nitrógeno y el fósforo. En aguas estancadas, el perjuicio por estos dos elementos se relaciona directamente con el grado de eutrofización, es decir, con la productividad biológica de un ecosistema por la asimilación fotosintética de anhídrido carbónico (CO₂) e indirectamente el consumo de oxígeno disuelto por la degradación de esta materia orgánica ({CH₂O}) acumulada por la producción biológica incrementada.

Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento que en sistemas acuáticos puede aparecer en especies químicas muy diversas, de las cuales unas con otras están conectadas por varias reacciones Redox. Este sistema reactivo muy complejo y todavía no enteramente entendido por los científicos, se llama ciclo de nitrógeno, en el cual las reacciones y los compuestos transformados más importantes son:



La primera de las cuatro reacciones es aeróbica, las otras tres son facultativamente anaeróbicas. Tanto el nitrato (NO₃⁻), como el amonio (NH₄⁺) y el nitrito (NO₂⁻, que son productos secundarios de la nitrificación, de la desnitrificación y de la amonificación de nitrato), son tóxicos. Por eso, la sobrecarga de un ecosistema acuático por nitrógeno significa por un lado la intoxicación de este sistema natural, y por otro lado la reducción progresiva del potencial Redox con las consecuencias explicadas en el capítulo 4.2.. El nitrógeno en las aguas residuales tienen su origen en general, en la contaminación por orina humana o animal.

Interpretando los resultados de la Figura 8, se observa otra vez una fluctuación muy grande en las análisis de nitrógeno total en el tubo 1 y por lo menos concentraciones muy elevadas en los primeros cuatro muestreos entre 46,6mgN/L y 59,8mgN/L. También en los datos de estas fechas se reconoce una reducción progresiva en los contenidos de nitrógeno total del agua de una celda a la próxima, hasta que llegan a una concentración promedio de 20,0mgN/L en el tubo 4. Tomando en cuenta también en este caso sólo los datos de los primeros cuatro muestreos, se puede calcular una reducción promedio en la concentración del nitrógeno de 51,6mgN/L a 22,2mgN/L, es decir una eficiencia de purificación de la planta de tratamiento de -57%.

La Ley de Medio Ambiente Boliviana exige para el nitrógeno total un límite permisible para desagües de la clase "C", un máximo de 12,0mgN/L en su concentración total. Para descargas líquidas la ley no reconoce ningún límite para su contenido de nitrógeno disuelto. Como se ve en la Figura 8, el agua que sale de la planta de tratamiento muestra concentraciones de nitrógeno

levemente por encima de este límite permisible. Tomando en cuenta que la planta de tratamiento todavía no está en un total equilibrio ecológico y que se conoce eficiencias de purificación con respecto al nitrógeno total en plantas de tratamiento similares a la de Copacabana que son mucho mayores, se puede esperar un aumento en la reducción del nitrógeno también en esta planta de tratamiento de manera significativa en el futuro, hasta cumplir los límites permisibles para desagües de la clase "C". Para alcanzar esto, sin embargo, se necesita mantener la planta con una alimentación constante de aguas residuales.

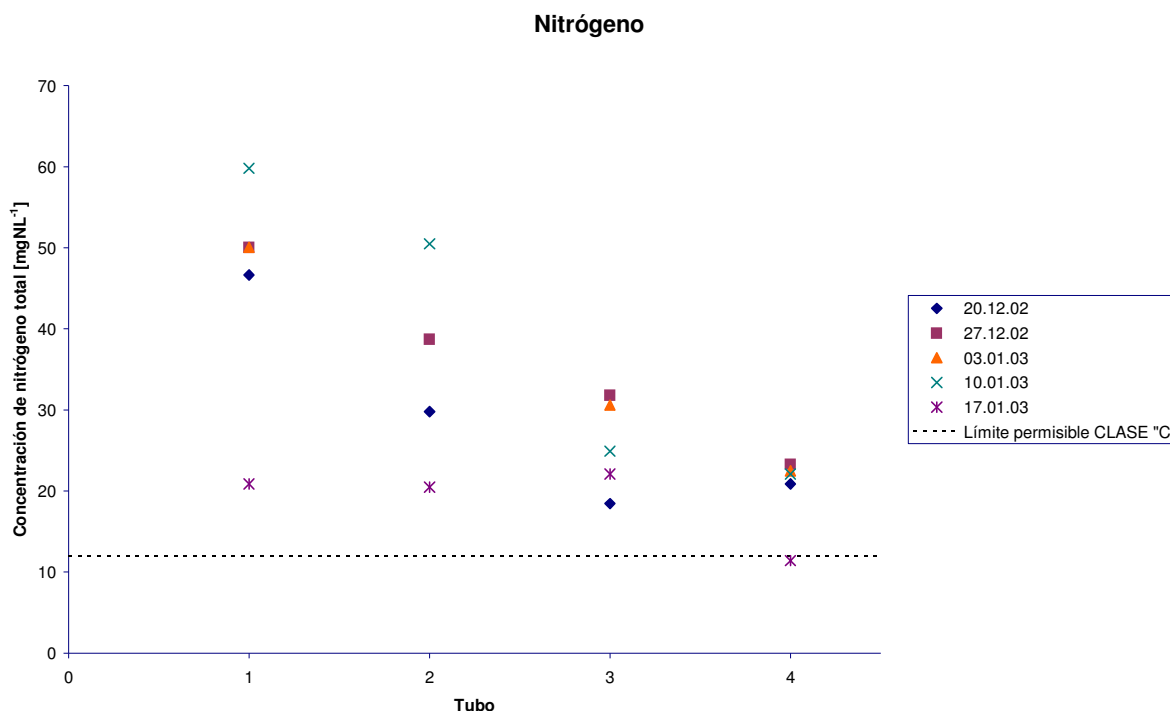


Figura 8: Las concentraciones de nitrógeno total en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

Fósforo

El fósforo es el nutriente limitante al crecimiento de la biomasa en ecosistemas acuáticos, por un lado porque su presencia en la materia orgánica - la composición química de la cual simplificada puede ser anotada como $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4)$ - en comparación con los otros elementos, es la más escasa y por otro lado, porque la especie química de fósforo - la más frecuente en la naturaleza - tiene una fuerte tendencia de adsorber a la materia orgánica. Por estas razones, el contenido de fósforo en aguas estancadas es el parámetro que predominantemente influye en la eutrofización de estos ecosistemas con todas sus consecuencias explicadas en la introducción de este capítulo. El fósforo en las aguas residuales tiene origen por lo general en la contaminación por excrementos fecales humanos o animales.

Analizando los resultados de los distintos muestreos en la Figura 9, se reconoce una fluctuación en la concentración del fósforo total muy grande en todos los cuatro puntos de toma de muestras. El agua que entra a la planta de tratamiento muestra concentraciones de fósforo entre 0,8mgP/L y

Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana

2,1mgP/L, con un promedio de 1,7mgP/L. Sin embargo, lo que se ve también muy claramente es que la reducción del contenido de fósforo en el agua, evidentemente sucede en todos los cinco casos linealmente aproximadamente con la misma eficiencia de -45% en promedio, independiente de la concentración de inicio. Este hecho nos muestra, que la eliminación del fósforo en el estado de equilibración ecológica al sistema todavía está dominado por procesos físicos, es decir por la adsorción del fosfato a la matriz de suelo, y no por su asimilación biológica. Es decir, se puede esperar que una vez que la productividad biológica de esta planta de tratamiento sea la óptima, la eficiencia en la eliminación del fósforo será mucho mayor.

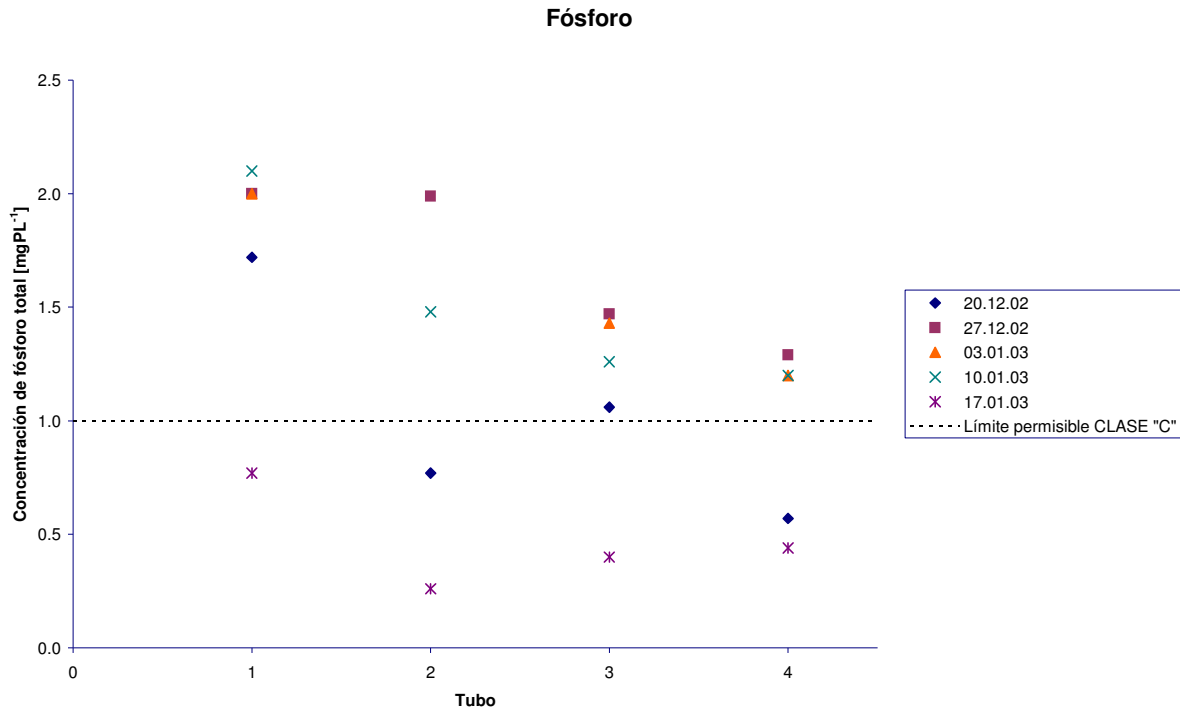


Figura 9: Las concentraciones de fósforo total en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

El límite permisible para desagües de la clase "C" según la normativa boliviana, exige un contenido máximo del fósforo total disuelto en el agua de 1mgP/L. Para descargas líquidas la normativa no conoce ningún límite para su contenido de fósforo. Como se puede observar en la Figura 9, el agua que sale de la planta de tratamiento muestra concentraciones de fósforo cercano a este límite permisible. Tomando en cuenta que también en el caso del fósforo total se sabe de eficiencias de purificación en plantas de tratamiento similares a la construida en Copacabana, son mucho mayores, se puede esperar un aumento progresivo en la reducción del fósforo. Pero también en este caso hay que decir que esto se logrará sólo con un mantenimiento óptimo y alimentación lo más constante posible.

4.4. Metales pesados

En los siguientes dos subcapítulos se presentan y evalúan los contenidos de los dos metales pesados más frecuentes en aguas servidas, el plomo (Pb) y el cadmio (Cd). Se debe recordar que se cuentan con datos tomados en el agua tratada, en los suelos de las celdas de tratamiento y en las raíces de las plantas de totora.

El interés en los metales pesados en ecosistemas acuáticos se explica por dos razones: por un lado, los metales pesados se caracterizan por una fuerte tendencia de acumularse en organismos biológicos (bioacumulación) y por otro lado las dos sustancias son tóxicas para mamíferos como el ser humano y otros seres vivos como p. e. los insectos, peces y anfibios. Por estas características, el plomo y el cadmio tienen un peligro alto de intoxicación por el consumo crónico incluso de concentraciones muy por debajo de la dosis letal aguda.

En el contexto de la acumulación de metales pesados³ hay que mencionar que en los helófitos, la bioacumulación más alta tiene lugar en las raíces. Por esta razón y porque se anticipaba en general concentraciones de metales pesados muy por debajo incluso del límite de detección (lo que resultó cierto), para tener datos representativos y seguros, en este programa de investigación se ha tomado solamente muestras de las raíces de las totoras, que nos sirven para inferir conclusiones sobre el contenido de metales pesados en toda la planta.

Plomo

En mamíferos, el plomo por su consumo causa daños en el sistema de sangre, en el tracto digestivo, en el sistema central nervioso y también puede tener como consecuencia de su consumo el disturbio en el desarrollo fetal. La característica especialmente peligrosa de este elemento es que tiene una permanencia química en sistemas ecológicos muy alta y que por eso, una vez absorbido en la grasa de un organismo biológico, la posibilidad de degradación y eliminación del cuerpo es casi nula, es decir que tiene un alto factor de bioacumulación en la cadena ecológica de nutrición y en consecuencia de intoxicación crónica.

Las fuentes de este elemento se relacionan con el combustible, compuestos de plomo se utilizan como antiacústico en los motores de gasolina. Otra fuente de plomo en aguas residuales son los tubos de cañerías que son revestidos con plomo, lo que con el tiempo se oxida y se disuelve en el agua.

Analizando los contenidos de plomo en el agua en la Figura 10, se reconoce una concentración casi absolutamente constante durante todo el período de monitoreo y en todos los tubos de alrededor de 0,01mgPb/L, que representa el límite de detección. Eso significa que obviamente el plomo disuelto en las aguas residuales que llegan a la planta de tratamiento están muy por debajo de los límites permisibles y no se reduce de manera significativa por la biomasa en las celdas de tratamiento. La eficiencia de eliminación del plomo, sin embargo, puede cambiar cuando se de un equilibrio ecológico instalado que facilitaría un crecimiento microbiológico mayor.

Por otro lado, cuando se evalúa la Figura 11, se observa que las concentraciones de plomo en las muestras de suelos y de las raíces de las plantas de totora en dependencia con el tiempo, se comprueba que tampoco existe una acumulación significativa de plomo en la biomasa de la planta de tratamiento. Además, se reconoce que las muestras del 20 de diciembre 2002, con concentraciones entre 124mgPb/kg y 32mgPb/kg en los suelos y entre 2,4mgPb/kg y 1,0mgPb/kg

³ La bioacumulación tiene lugar principalmente en los lípidos, es decir la grasa y los aceites de un organismo. Como los tallos de una planta están compuestos en su mayoría de celulosa, es lógico que los metales pesados se acumulan en los rizomas, dónde por razón de simbiosis con distintos microorganismos y hongos, la planta muestra un contenido de lípidos aumentado.

en las raíces, muestran valores mucho mayores a los del 17 de enero 2003, los que están entre 8mgPb/kg y 4mgPb/kg en los suelos y en 6,0mgPb/kg en todas las muestras de raíces. Eso provoca una fluctuación en todos los resultados que está muy alto alrededor del promedio de los mismos datos. Este fenómeno se puede atribuir a la heterogeneidad natural de muestras de suelos y plantas. Sin embargo, comparando las concentraciones en la sucesión de las tres celdas de tratamiento, se ve que en cada muestreo el contenido de este metal pesado disminuye tanto en el suelo (de 66mgPb/kg a 18mgPb/kg en promedio), como en las plantas de totora (de 4,2mgPb/kg a 3,5mgPb/kg en promedio) de una celda a la siguiente. Este fenómeno indica que sí existe una acumulación en la biomasa de las celdas de tratamiento, la cual depende de la concentración del plomo en el medio de nutrición, aún cuando no se percibe la eliminación del plomo disuelto en el agua misma, debido a que estos cambios en las concentraciones de plomo en el agua están por debajo del límite de detección. Por esta razón sería necesario seguir observando los contenidos de plomo en la biomasa durante un horizonte de tiempo mínimo de aproximadamente unos dos años, para poder arribar a conclusiones confiables acerca la bioacumulación del plomo en el sistema de purificación.

En el caso del plomo, la normativa ambiental boliviana reconoce límites permisibles para el plomo disuelto, únicamente en el agua. Para cuerpos de agua de la clase "C", el límite permisible exige una concentración máxima de 0,05mgPb/L y para descargas líquidas exige un máximo 0,6mgPb/L. En la planta de tratamiento de Copacabana, todas las muestras tomadas, se encuentran por debajo de ambos límites.

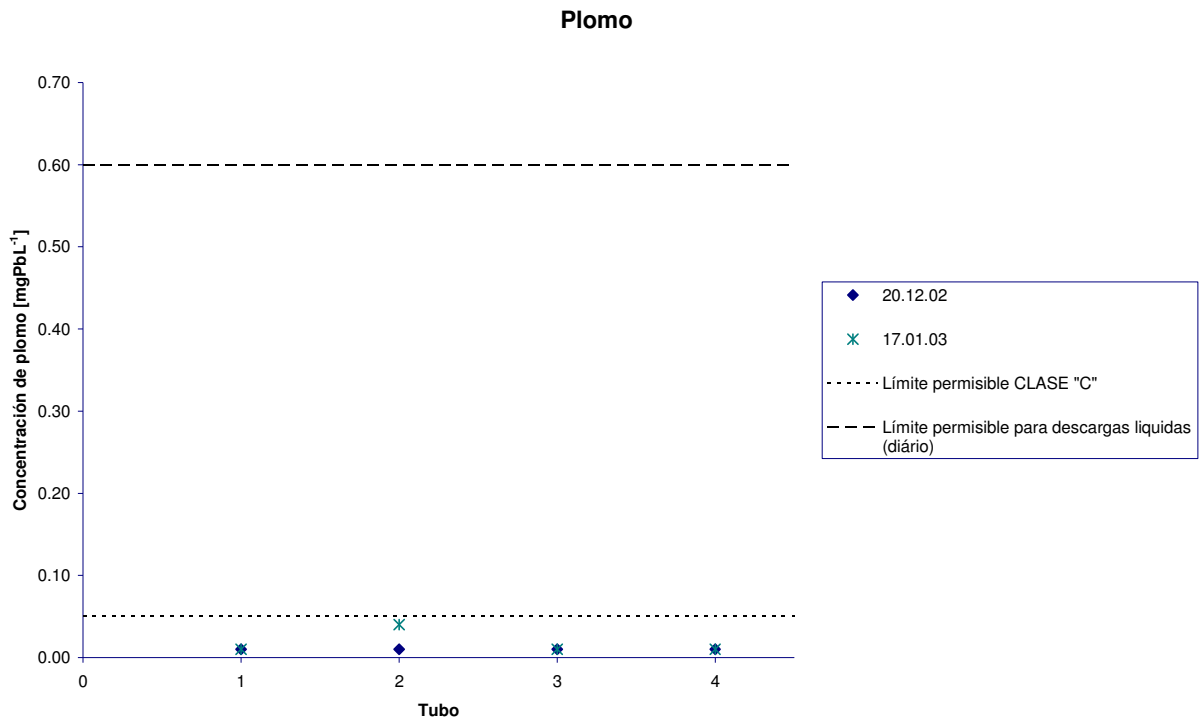


Figura 10: Las concentraciones de plomo disuelto en el agua en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según el RMCH.

Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana

Para valorar los resultados adquiridos de las muestras de suelos y de las raíces de las plantas de totora se recurrió a límites correspondientes a las leyes de medio ambiente de otros países (ver cap. 6.2.). Tomando en cuenta que los distintos países trabajan con diferentes recursos naturales, de los cuales unos implican más urgencia de acción que otros y en consecuencia piden límites para ciertos parámetros más altos que los otros⁴, para esta evaluación se utilizaron los límites jurídicamente vinculatorios, los más exigentes encontrados en las distintas leyes, lo que son para suelos el límite recomendado de la Ley Chilena (200mgPb/kg) y para plantas el límite permisible para forraje de la Ley Suiza (40mgPb/kg). A excepción del valor para la concentración de plomo en el suelo de la celda 1 del 20 de diciembre de 2003, que muy probablemente se trata de una muestra foránea, todas las concentraciones medidas tanto en los suelos, como en las raíces de las plantas de totora están muy por debajo del límite correspondiente indicado.

Estos resultados nos permiten afirmar que más adelante se podrán utilizar las totoras podadas, como medio de forraje. Sin embargo, como ya se explicó, con una bioacumulación aumentada, eso podría cambiar en los próximos meses y años, por lo cual se sugiere medir el contenido de plomo en las plantas de totora cada vez antes de su poda.

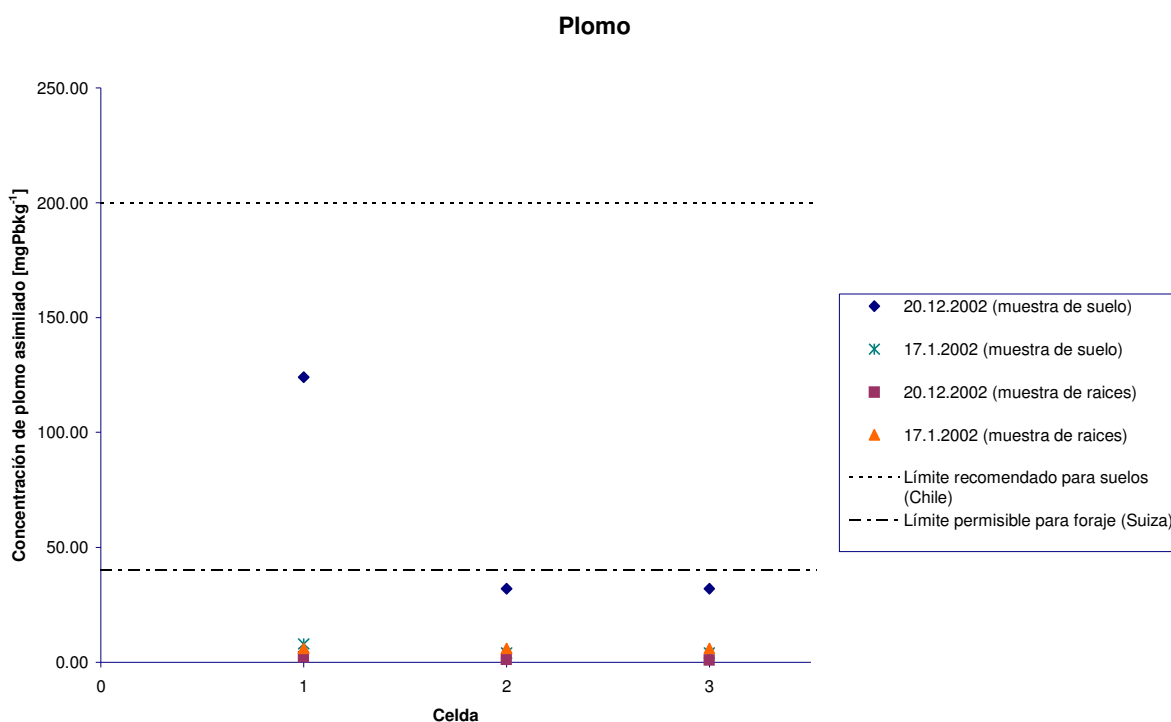


Figura 11: Las concentraciones de plomo acumulado en el suelo y las plantas en las tres celdas de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite recomendado para suelos según la Ley de Medio Ambiente Chilena y el límite permisible para forraje según la Ley de Medio Ambiente Suiza.

⁴ Lógicamente, los límites jurídicamente vinculantes, deben ser más altos que los límites indicativos, de otra manera sería muy difícil cumplirlos.

Cadmio

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. Los compuestos de cadmio, igualmente como los de plomo, se caracterizan por una permanencia química en ecosistemas muy elevada y tienen una tendencia fuerte de bioacumularse en la cadena de nutrición. 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. El cadmio en los aguas residuales humanas generalmente tiene origen en las pilas y baterías a base de cadmio eliminados de manera inapropiada.

Evaluando las concentraciones de cadmio en el agua en la Figura 12, se reconoce que están homogéneamente y absolutamente constantes durante todo el período de monitoreo y en todos los tubos de por debajo de 0,01mgPb/L, es decir por debajo del límite de detección de la metodología utilizada para analizar los contenidos de cadmio. Por esta razón, no se puede afirmar exactamente si se da lugar a una reducción en las concentraciones del cadmio por bioacumulación en las celdas de tratamiento.

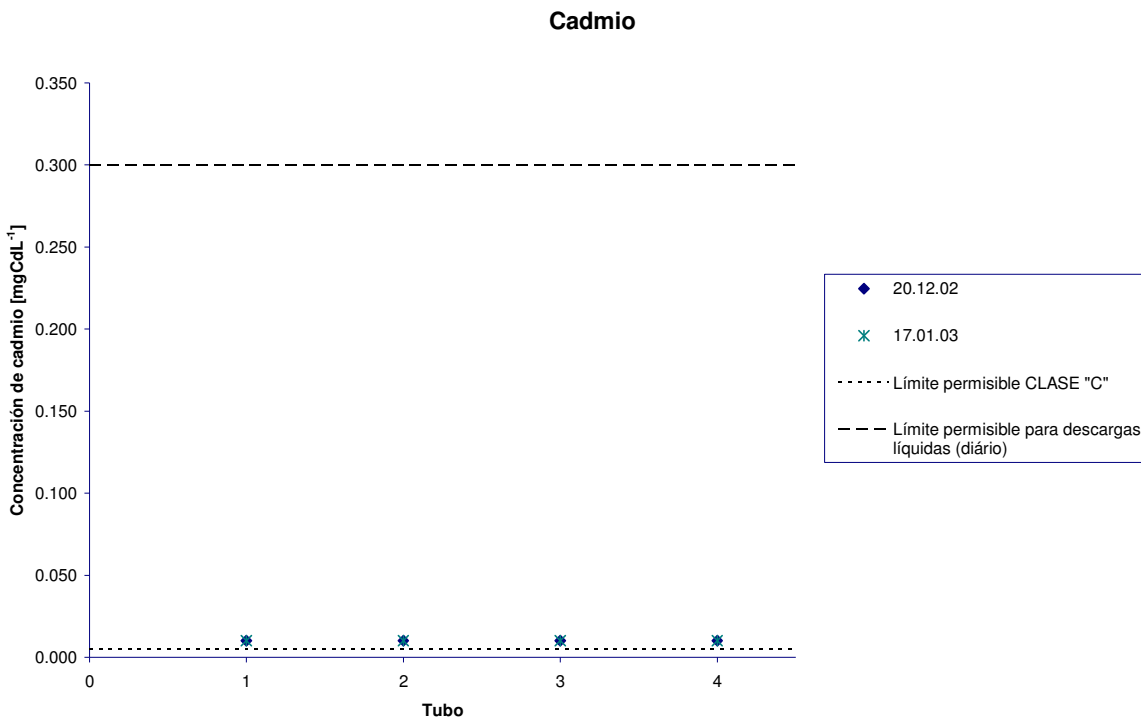


Figura 12: Las concentraciones de cadmio disuelto en el agua en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" y para descargas líquidas según el RMCH.

También en el caso de los contenidos de cadmio en las muestras de suelo y en las raíces de las plantas de totora, las concentraciones se ubican muy constantemente alrededor los valores promedios entre 0,01mgCd/L (suelos) y 0,015mgCd/L (raíces) con una excepción en la muestra de la celda 1 del 20 de diciembre 2002, la que muy probablemente representa un valor fugitivo. Con

menos de 0,01mgCd/L en promedio, la fluctuación de estos valores está muy baja alrededor del límite de detección. Obviamente, por esta limitación técnica en los análisis del cadmio, no es posible decir si el cadmio se está bioacumulando en los microorganismos de suelo o en las plantas de totora o no. Sin embargo, por causa del tiempo de monitoreo muy corto para procesos ecológicos tan sensibles, sería indicado continuar la observación, midiendo los contenidos de cadmio en la biomasa durante un horizonte de tiempo mínimo de aproximadamente unos dos años, utilizando en el futuro metodologías de análisis, enviando las muestras a un laboratorio especializado del exterior.

La normativa ambiental para el cadmio sólo reconoce límites permisibles para el cadmio disuelto en el agua. Para cuerpos de agua de la clase "C", el límite permisible exige una concentración máxima de 0,005mgCd/L y para descargas líquidas un máximo de 0,3mgPb/L. Como hemos visto en el párrafo anterior, los valores de concentración en el agua tratada en la planta de tratamiento están por debajo del límite de detección de 0,01mgCd/L, lo que quiere decir que cumplen en todos los casos seguramente el límite para descargas líquidas. En el caso del límite para la clase "C", no se puede decir si cumplen o no, pues el límite por sí mismo está muy por debajo del límite de detección de la metodología aplicada para el análisis del cadmio disuelto. También en este contexto hay que decir, que sería muy indicado utilizar para futuros análisis una metodología con límite de detección más bajo.

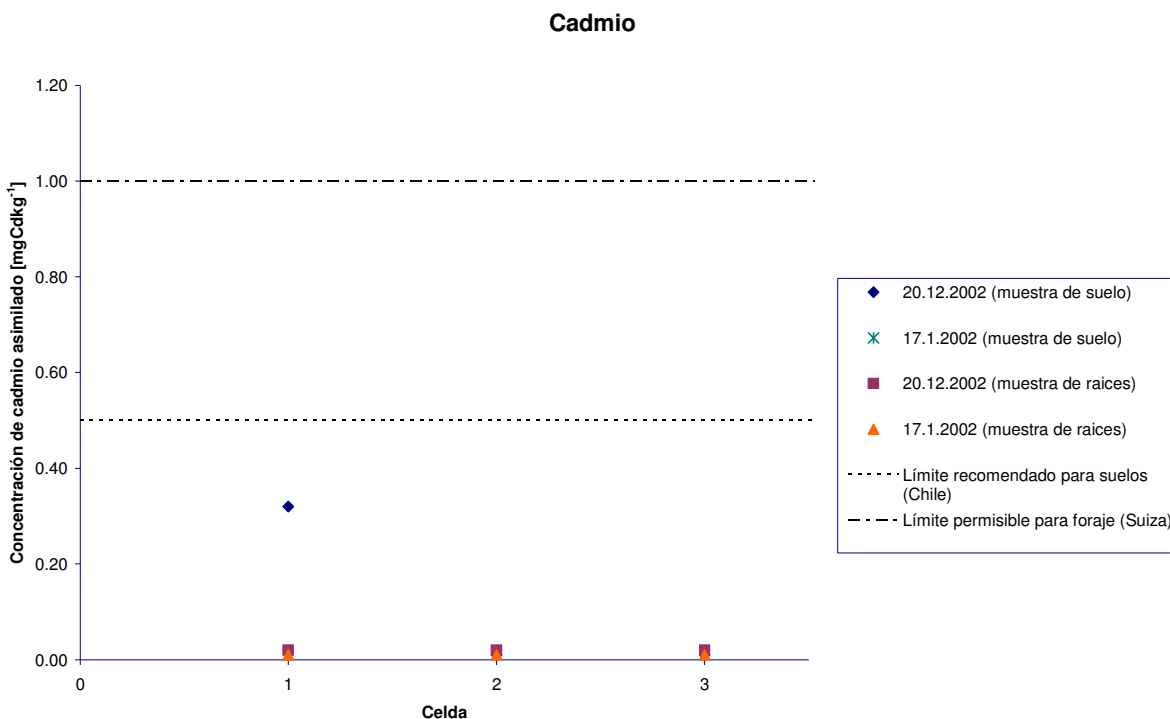


Figura 13: Las concentraciones de cadmio acumulado en el suelo y las plantas en las tres celdas de la planta de tratamiento de Copacabana con el límite recomendado para suelos según la Ley de Medio Ambiente Chilena y el límite permisible para forraje según la Ley de Medio Ambiente Suiza.

Por las mismas razones que fueron explicadas en el capítulo anterior, para valorar los resultados adquiridos de las muestras de suelos y de las raíces de las plantas de totora, también en el caso del

cadmio nos servimos del límite recomendado por la Ley Chilena para las muestras de suelos (0,5mgCd/kg) y del límite permisible para forraje de la Ley Suiza para las muestras de plantas (1,0mgPb/kg) (ver cap. 6.2.). A parte del valor para la concentración de cadmio en el suelo de la celda 1 del 20 de diciembre 2003, lo que muy probablemente es un valor fugitivo, todas las concentraciones medidas tanto en los suelos, como en las raíces de las plantas de totora, están muy por debajo del límite correspondiente indicado.

Como ya se explicó, de la misma manera que en el caso del plomo, debido a las concentraciones de cadmio encontradas, se podría utilizar el corte semestral de las totoras totora para el forraje de animales. Sin embargo, sería apropiado medir también el contenido de cadmio en las plantas de totora en cada poda antes de utilizarlo para forraje.

4.5. Coliformes fecales

Los coliformes fecales son bacterias del aparato digestivo humano, que por su consumo oral por el agua contaminada pueden causar graves enfermedades de digestión y afectar al sistema inmunológico. La concentración de microorganismos entonces nos da una idea de la contaminación del agua por residuos fecales.

Como se ve en la Figura 14, en los días 20 de diciembre 2002, 27 de diciembre 2002, 3 de enero 2003 y 10 de enero 2003 el agua que llega a la planta de tratamiento muestra concentraciones bastante homogéneas de 1'200NMP/dL hasta por encima de 1'600NMP/dL. Además, se observa que en las primeras dos fechas de muestreo no existe ninguna reducción en el contenido de bacterias colifecales en el agua tratada. También el día 3 de enero 2003 se puede suponer que en realidad no había una eliminación de los coliformes fecales durante el tratamiento del agua, pues el valor medido en el tubo 3 en este día muy probablemente es un valor fugitivo. Sin embargo, ya el día 10 de enero 2003 se observa una reducción significativa en la concentración de los coliformes fecales de 1'200NMP/dL hasta 70NMP/dL, y también el día 17 de enero 2003 una reducción de 140NMP/dL hasta 50NMP/dL tiene lugar. Estos últimos valores en promedio dan una eficiencia de purificación con respecto a la carga de bacterias colifecales en el agua de -91%. Analizando el curso de estos valores registrados, se puede suponer que durante el período de monitoreo, tuvo lugar la estabilización del sistema microbiológico en las tres celdas de tratamiento, que permite atacar eficientemente a las bacterias colifecales. Del mismo modo, se puede reafirmar lo que anteriores estudios demostraron acerca de las propiedades de los rizomas de la totora para excretar sustancias que actúan como antibióticos específicos de coliformes.

La normativa ambiental boliviana exige para desagües de la clase "C" una concentración máxima de coliformes fecales de 1'000NMP/dL y para descargas líquidas una de 5'000NMP/dL. Como se ve en la Figura 14, las cargas de bacterias colifecales en el agua que desemboca en el Lago Titicaca están muy por debajo del segundo límite mencionado y al menos también en los últimos dos muestreos, claramente por debajo del límite de la clase "C".

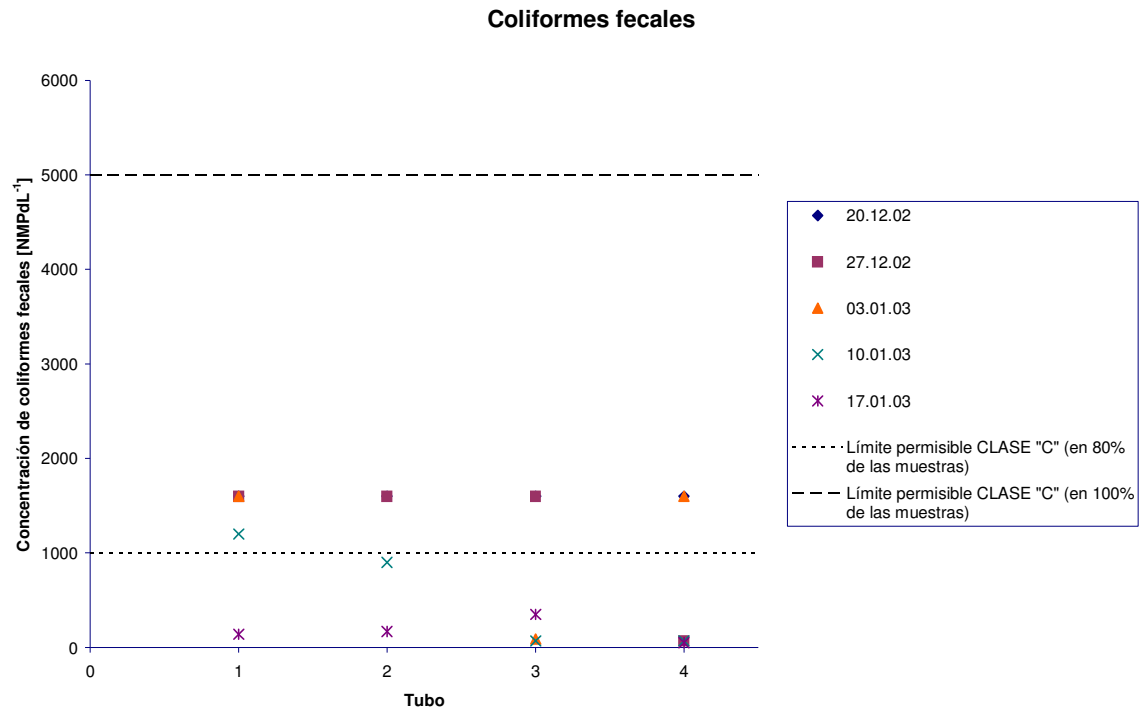


Figura 14: Las concentraciones de coliformes fecales en los cuatro tubos de la planta de tratamiento de Copacabana con el límites permisible para cuerpos de agua según su aptitud de uso de la clase "C" según el RMCH.

5. Conclusiones

Después 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 pasivo de la ciudad de Copacabana, 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 discutió el impacto de la planta de tratamiento en los dos parámetros más fundamentales, la acidez / alcalinidad y la temperatura del agua tratada. Se observó 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 del agua que desemboca al Lago Titicaca cumple absolutamente con la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

Por el otro lado, la temperatura que muestra el agua que sale de la planta de tratamiento está ligeramente por encima de la temperatura promedio del cuerpo superficial del Lago Titicaca, sin embargo, en la mayoría del tiempo se encuentra dentro de los márgenes de los límites permisibles tanto para descargas líquidas, como para desagües de la clase "C".

Se analizó y valorizó también la eficiencia de purificación para distintos parámetros químicos alcanzados actualmente en la planta de tratamiento de Copacabana y se anticipó los procesos futuros. Respecto a la eliminación de los nutrientes acuáticos se puede hablar de una eficiencia mediana de -45% para el fósforo total y -57% para el nitrógeno total disuelto en el agua tratada. Las concentraciones alcanzadas por el tratamiento del agua, en consecuencia cumplen sólo parcialmente los límites permisibles para desagües de la clase "C". Sin embargo, con el establecimiento de un equilibrio ecológico óptimo por un mantenimiento de la planta de tratamiento constante en su alimentación con aguas residuales, en los próximos meses se puede esperar, que estos dos parámetros también cumplirán con los límites permisibles más estrictos para desagües de la clase "C".

En el caso de los sólidos suspendidos, por razón de un periodo de estabilización al sistema ecológico demasiado corto desde la conclusión de la construcción de la planta de tratamiento, los datos adquiridos no muestran una calidad bastante alta para ofrecer alguna conclusión sobre su eficiencia. Como consecuencia, sería indicado seguir observando este parámetro en el futuro para averiguar si con el tiempo se establece una eficiencia de purificación satisfactoria respecto a los sólidos suspendidos.

Con respecto al carbono orgánico (DBO), al carbono inorgánico (DQO) y a la presencia de bacterias colifecales, se puede afirmar que la planta de tratamiento de Copacabana luego de un tiempo muy corto desde la conclusión de la construcción, muestra una eficiencia elevada de -78% para el DQO, de -83% para el DBO y de -91% para los coliformes fecales. Aún cuando la planta de tratamiento todavía no cumple las exigencias más estrictas para los desagües de la clase "C", cumple los límites para descargas líquidas en todos los casos. También la eficiencia de estos parámetros fundamentales de contaminación de agusa servidas, se irá incrementando en los próximos meses. Una vez que se logre una estabilización ecológica completa.

Otro parámetro muy importante para la salud de un ecosistema acuático, es el contenido de oxígeno disuelto en el agua tratado, para el cual se obtuvieron resultados muy satisfactorios. Con un incremento progresivo en cada celda de tratamiento en total de +350% hasta una concentración de 2,7mgO/L en promedio, el agua que pasa por la planta de tratamiento cambia su carácter de un nivel absolutamente anóxico hasta uno claramente aeróbico. En consecuencia, gracias a los procesos de oxigenación esperados durante el diseño de la planta, el agua que desemboca al Lago Titicaca saliendo de la planta de tratamiento cumple enteramente el límite permisible para desagües de la clase "C" del RMCH, respecto a su contenido de oxígeno disuelto

Finalmente, respecto a los metales pesados disueltos en el agua tratada, no es posible concluir de manera absoluta sobre la eficiencia de su eliminación, porque las concentraciones analizadas están casi enteramente por debajo de los límites de detección del laboratorio. Sin embargo, hay que poner en claro que en el caso del cadmio, el agua que sale de la planta de tratamiento, al menos cumple el límite permisible para descargas líquidas y en el caso del plomo cumple los límites permisibles tanto para descargas líquidas, como para desagües de la clase "C".

Respecto a las concentraciones de estos dos metales pesados en los suelos de las celdas de tratamiento y en las raíces de las plantas de totora, se puede concluir que en todas las muestras las concentraciones tanto del cadmio, como de plomo están claramente por debajo de los límites permisibles internacionalmente utilizados. Los contenidos de plomo en las raíces de las plantas de totora están muy por debajo de las concentraciones correspondientes en las muestras de suelos, mostrando una proporcionalidad entre 1 parte en las raíces a 16 partes en los suelos hasta 1 en las raíces a 5 en los suelos.

A la pregunta, si estos dos elementos se acumulan en la biomasa de las celdas de la planta de tratamiento, no se puede responder directamente, pues los cambios probablemente efectuados en las muestras de suelos y de plantas están muy por debajo del límite de detección de la metodología de análisis aplicada en este programa de investigación. Sin embargo, teniendo en cuenta las cantidades de cadmio y plomo acumuladas en la biomasa en la sucesión de las tres celdas, se puede suponer, que existe una cierta bioacumulación, lo que exige una observación atenta de estos parámetros durante un periodo más prolongado, analizando muestras de plantas y de suelos una vez antes de utilizar las plantas como forraje. De cualquier manera, bajo la situación actual, se puede manifestar que la nutrición de animales domésticos con plantas de totoras de las celdas de tratamiento es absolutamente inocua.

En base al objetivo general del proyecto, es decir, la validación de los sistemas de flujo subsuperficial como una nueva tecnología de purificación de aguas residuales humanas en el ámbito altiplánico, como consecuencia de todos los argumentos anteriormente presentados, concluye que los humedales artificiales contruidos, cuyo componente principal es la totora, representan un sistema natural 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 muy satisfactoria, b) costos de construcción y de mantenimiento relativamente bajos y c) un manejo bastante simple y poco susceptible a errores.

Sin embargo, de todas maneras se debe tener en claro que la eficiencia de la planta de tratamiento depende fuertemente de su mantenimiento óptimo y una alimentación con aguas servidas a la planta purificadora lo más constante posible. Sólo de esta manera se puede asegurar que la planta de tratamiento continúe purificando las aguas servidas, cumpliendo la Ley de Medio Ambiente Boliviana.

6. Apéndice

6.1. Expresiones científicas

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

OD: Oxígeno disuelto

RMCH: Reglamento Ambiental Boliviano en Materia de Contaminación Hídrica

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

Totora: Planta local de la cual se conoce que asimila muchos nutrientes y metales pesados. Nombre científico: *Schoenoplectus tatora*.

Humedal Artificial: Ecosistema saturado por aguas superficiales y subterráneas con profundidad inferior de un metro (para evitar áreas extensas anóxicas).

Sistema de flujo subsuperficial (SFS): Planta de tratamiento en la cual las aguas servidas son purificados por procesos biológicos en la matriz del suelo mediante flujo subterráneo horizontal.

Eutrofización: Sobrecarga de un ecosistema acuático con nutrientes suspendidos, sobre todo el fosfato y el nitrógeno en forma de amonio y nitrato.

Coliformes: Bacterias anaerobios del aparato digestivo que sirven como indicador de contaminación séptica.

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.

Organismos aeróbicos: Utilizan el oxígeno disuelto en el agua como medio de oxidación del carbono asimilado.

Organismos anaeróbicos: Utilizan para la oxidación del carbono asimilando otras sustancias oxidativas como el nitrato (NO_3^-), el óxido de manganeso (MnO_2), el hidróxido de hierro (FeOOH) o el sulfato (SO_4^{2-}).

Organismos quimioheterotrofos: Ganan la energía respiratoria por reacciones químicas (en contraste al los organismos fototrofos, que ganan su energía por la radiación solar), asimilando el carbono de compuestos orgánicos (hetero-).

Organismos quimioautotrofos: Ganan la energía respiratoria también por reacciones químicas, utilizando los iones hidrógenos (H^+) necesarios para los procesos Redox de compuestos inorgánicos (lito-) y asimilando el carbono de compuestos inorgánicos (auto-).

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.

Balance hídrico: Calculo del equilibrio de los procesos de transporte del agua en un sistema casi-cerrado, es decir partiendo de la teoría de que la suma de los flujos que entran y de los que salen de un ecosistema sean nula.

Flujo de materia: Proceso de transformación respecto de un cierto elemento o compuesto, partiendo de la teoría de que el total de la masa en un cierto ecosistema sea mantenido.

6.2. Información adicional

Tabla 1: Concentraciones en la naturaleza de metales pesados en suelos

Concentración de trasfondo natural	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Sb [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Sn [mg/kg]
Cuenca Pilcomayo ¹		6 - 34	17 - 132	0,01 - 0,087	3 - 24		<0,05 – 0,3	<0,01 – 0,22		

¹ Datos obtenidos de Kabata-Pendias (1995).

Tabla 2: Límites permisibles para concentraciones de metales pesados en suelos

Pautas de salud	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Sb [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Sn [mg/kg]
Holanda (niveles de acción)	55	530	720	10	190		12			
Estados Unidos ² (límites máximos)			4		2	8	0,08	10	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		0,4			0,5			
Suiza (valor indicativo ⁴)		50	150	0,5	40		0,8	50		

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

³ Límites recomendados por INTA Chile (1996).

⁴ Valores indicativos jurídicamente no son vinculatorio.

Tabla 3: Límites permisibles para concentraciones de metales pesados en plantas de forraje

Pautas de salud	As [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Zn [mg/kg]	Hg [mg/kg]	Cu [mg/kg]	Sb [mg/kg]	Cd [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Fe [mg/kg]	Sn [mg/kg]
Suiza (límites máximos)	2	40		0,1			1			

6.3. Documentación fotográfica



Figura 15: La planta de tratamiento en Copacabana sector Chapampa durante su construcción en agosto de 2002.



Figura 16: Visita de la planta de tratamiento justamente después la conclusión del acondicionamiento y terminación de detalles constructivos de la obra en diciembre de 2002. Algunas personas habían destruido las tuberías de conexión al sistema principal y de distribución entre las distintas celdas de purificación.



Figura 17: Pruebas hidráulicas, en la fotografía se observa el tubo de conexión al sistema principal ya reparado antes de colocar las cajas de distribución e inspección con cierre candados.



Figura 18: La planta de tratamiento después la conclusión definitiva de la obra a principios de diciembre de 2002.



Figura 19: Medición de la altura de agua en la tubería de conexión al sistema principal y de distribución entre las distintas celdas de purificación para la computación de los correspondientes caudales durante el programa de investigación.



Figura 20: Medición in situ del pH, del potencial mV y de la temperatura en las cajas de de aireación. En el segundo plano se reconoce las distintas botellas de muestreo y una caja con el kit para la determinación de oxígeno disuelto durante el programa de investigación.



Figura 21: Extracción de una planta de totora que sirvió de realizar los análisis del contenido de nitrógeno, fósforo, plomo y cadmio en sus raíces y tallos.



Figura 22: Una planta de totora extraída en su entera magnitud, con sus flores, tallos y las raíces al lado de la planta de tratamiento de Copacabana.

6.4. Datos crudos

Análisis de la Fundación MEDMIN

pH

Fecha	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
20.12.02	7.2	7.2	7.4	7.3			
27.12.02	8.0	7.6	8.0	7.9	8.2	9.0	9.6
03.01.03	7.7		7.3	7.0			
10.01.03	7.4	7.1	6.9	6.9	7.3	7.4	7.3
11.01.03	7.2	7.2	7.1	7.1	7.5	7.6	7.4
12.01.03	7.8	7.1	7.2	7.3	7.1	7.2	7.7
13.01.03	7.6	7.3	7.2	7.2	7.5	7.4	7.5
14.01.03	7.6	7.3	7.1	7.1	7.3	7.8	7.5
15.01.03	7.9	7.2	7.2	7.0	7.6	7.5	7.6
16.01.03	7.7	7.1	7.1	7.1	7.4	7.4	7.7
17.01.03	6.8	6.9	7.0	7.0	7.0	7.2	7.1

Potencial

Fecha	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
20.12.02	-8.0	-5.0	-19.0	-15.0			
27.12.02	-54.0	-43.0	-54.0	-50.0	-71.0	-108.0	-145.0
03.01.03	-48.0		-32.0	-18.0			
10.01.03	-39.0	-27.0	-13.0	-8.0	-38.0	-19.0	-35.0
11.01.03	-42.0	-33.0	-17.0	-19.0	-45.0	-66.0	-44.0
12.01.03	-49.0	-19.0	-24.0	-34.0	-25.0	-26.0	-51.0
13.01.03	-40.0	-27.0	-27.0	-24.0	-43.0	-34.0	-36.0
14.01.03	-45.0	-24.0	-20.0	-19.0	-39.0	-64.0	-33.0
15.01.03	-51.0	-21.0	-27.0	-15.0	-55.0	-43.0	-40.0
16.01.03	-41.0	-20.0	-19.0	-22.0	-31.0	-29.0	-45.0
17.01.03	-9.0	-9.0	-14.0	-16.0	-14.0	-27.0	-23.0

Las indicaciones están en mV.

Temperatura

Fecha	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3
20.12.02	14.8	15.6	16.5	16.1			
27.12.02	25.2	23.2	13.8	22.1	22.5	21.6	20.4
03.01.03	24.7		20.6	19.0			
10.01.03	20.7	19.9	18.8	19.0	19.4	18.7	19.8
11.01.03	19.8	17.6	17.4	18.2	20.5	21.4	20.3
12.01.03	17.3	20.9	20.3	19.4	24.7	25.3	23.9
13.01.03	18.4	18.5	18.3	17.5	20.4	20.4	21.6
14.01.03	21.9	20.4	19.5	17.8	22.4	23.4	20.0
15.01.03	22.1	21.8	21.2	19.2	21.8	20.7	19.7
16.01.03	19.4	18.8	19.7	18.9	25.3	22.2	23.1
17.01.03	15.1	15.6	16.3	16.2	18.8	18.1	17.9

Las indicaciones están en °C.

Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana

Oxígeno disuelto

Fecha	Tubo 1	Tubo 2	Tubo 3	Tubo 4
20.12.02	0.0	0.2	4.0	4.0
27.12.02	0.0	2.0	4.0	3.0
03.01.03	1.0		5.0	2.5
10.01.03	0.0	2.0	2.0	2.0
11.01.03	0.0	2.0	4.0	4.0
12.01.03	0.0	3.0	3.0	3.0
13.01.03	0.0	3.0	2.0	4.0
14.01.03	0.0	2.0	4.0	4.0
15.01.03	0.0	2.0	3.0	3.0
16.01.03	0.0	2.0	4.0	4.0
17.01.03	2.0	1.0	2.0	2.0

Las indicaciones están en mg/L.

Caudales

La medición de los caudales en el vertedor rectangular y en los 4 tubos del sistema de tratamiento se intentó hacer según las siguientes formulas, midiendo la altura del agua en el vertedor y en los tubos, para comparar los distintos caudales y finalmente calcular un balance hídrico:

Vertedero rectangular: $Q = 0.533 \cdot \sqrt{2g} \cdot C \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot h^{\frac{5}{2}}$

$$\cong 1.393 \sqrt{\frac{m}{\text{sec}^2}} \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad [\text{m}^3\text{sec}^{-1}]$$

Con:

Q := Caudal [m³sec⁻¹]

h := Diferencia de altura entre la punta del vertedero triangular y el nivel del agua antes del vertedero [m]

C := Coeficiente del vertedero dependiendo parámetros adicionales; en el caso de mediciones en el campo se pone un valor constante de 0.59 []

g := Constante gravitacional [msec⁻²]

θ := Ángulo del vertedero [°]

Vertedero redondo (tubo):

[m³sec⁻¹]

$$Q = k \cdot S \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}}$$

Con:

Q := Caudal [m³sec⁻¹]

k := Coeficiente de Manning-Strickler; en el caso de materiales muy lisas como PVC se elige un valor de 60 [m^{1/3}sec⁻¹]

S := Área de la sección "mojada" [m²]

R := Rayón hidraulico [m]

J := Pendiente de la tubería ≈ 1% [.]

Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana

$$\text{Con: } R = \frac{S}{P}$$

$$S = \frac{h \cdot (32 \cdot r \cdot h - 13 \cdot h^2)}{6\sqrt{8 \cdot r \cdot h - 4 \cdot h^2}} \quad ; \quad h \leq r$$

$$P = 2 \cdot r \cdot a \cos\left(\frac{r-h}{r}\right)$$

P := Perímetro de la sección "mojada" [m]

h := Altura del agua en la tubería [m]

r := Radio de la tubería = 5,25cm [m]

Sin embargo, como el monitoreo tuvo lugar al menos en sus últimos días durante plena época de lluvia, la condición elemental para poder trabajar con esta última fórmula no era dada, pues la altura del agua era mayor del radio de los tubos (entonces $h > r$). Para el primer parte del monitoreo sin embargo se pudo calcular los siguientes resultados:

	Tubo 1		Tubo 2		Tubo 3		Tubo 4	
Fecha	h [cm]	Q [Lsec ⁻¹]	h [cm]	Q [Lsec ⁻¹]	h [cm]	Q [Lsec ⁻¹]	h [cm]	Q [Lsec ⁻¹]
20.12.02	4.0	1.42	2.0	0.36	2.0	0.36	2.0	0.36
27.12.02	1.0	0.09	1.5	0.20	2.0	0.36	4.3	1.62
03.01.03	0.5	0.02	0.0	#DIV/0!	0.2	0.00	2.0	0.36
10.01.03	1.3	0.15	0.8	0.05	1.7	0.26	2.1	0.40
11.01.03	6.7	3.54	3.1	0.87	2.3	0.48	3.8	1.29

Por razón de las fluctuaciones muy fuertes en la nutrición del sistema con aguas servidas de la ciudad de Copacabana, sin embargo no era posible calcular un balance hídrico, pues esta teoría sale de un sistema en equilibrio de flujos de materia. En investigaciones futuras, con humedales constantemente mantenidos, con los datos de los distintos caudales y de los de la cantidad de agua evaporada y de lluvia se podría averiguar el balance hídricos de este ecosistema integralmente.

Datos climáticos

Fecha	Ev. [Lm ⁻² d ⁻¹]	Ev. + LI [Lm ⁻² d ⁻¹]	T _{atm.} [°C]	T _{atm., max.} [°C]	T _{atm., min.} [°C]
20.12.02			13	22	3
27.12.02			17	28	4
03.01.03			31		
10.01.03	1	0	13	21	2
11.01.03	0.5	6	11	22	3
12.01.03	2	0	18	30	7
13.01.03	2	8	19	33	4
14.01.03	2	4	18	29	3
15.01.03	2.5	5	20	31	4
16.01.03	3	4	22	35	11
17.01.03	0	13	28	30	4

Ev. := Evaporación, LI. := Lluvia, T_{atm.} := Temperatura atmosférica.

Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana

Análisis de la SGS

20. 12. 2002:



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 2

INFORME DE ENSAYO

ORDEN N° **MA – 179 – 02**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-15**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **AGUA**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **SST, NTK, P, Fe, Cd, DBO₅, DQO, Coliformes fecales.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 24**

Su referencia:	Cd mg/l	Pb mg/l	DQO mgO ₂ /l	DBO ₅ mgO ₂ /l	P mg/l	SST mg/l	NTK mg/l	Coliformes fecales NMP/100ml
M-1 Entrada	<0.01	0.01	458.1	144.7	1.72	96.0	46.63	>1600
M-2 Salida 1	<0.01	0.01	263.2	79.73	0.77	96.0	29.80	>1600
M-3 Salida 2	<0.01	0.01	150.4	42.13	1.06	130.0	18.45	>1600
M-4 Salida 3	<0.01	0.01	83.8	19.93	0.57	82.0	20.88	>1600
Limites de detección de laboratorio	0.01		0.05	2	0.05	0.5	0.5	2
Metodos utilizados	Standad Methods for Examination of Water and Wastewater, 20 th Edition, 2000, APHA, AWWA, WEF.							
Observaciones								

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002



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 – 179 – 02**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-14**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **SUELOS**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **NTK, P.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002-diciembre – 24**

Su referencia:	P mg/Kg	NTK mg/Kg
M-1 SUELO 1	7.48	0.20
M-2 SUELO 2	2.60	0.12
M-3 SUELO 3	10.97	0.61
Limite de detección laboratorio	0.05	0.05

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002



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 – 179 – 02**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-31**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **SUELOS**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **Cd, Pb.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 24**

Su referencia:	Cd mg/Kg	Pb mg/Kg
M-1 SUELO 1	0.32	124.0
M-2 SUELO 2	<0.01	32.0
M-3 SUELO 3	<0.01	32.0
Límites de detección	0.01	0.02

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002



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 – 179 – 02**

FECHA EMISIÓN : **2003- enero - 14**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **RAICES**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **NTK, P, Pb, Cd, Peso de la planta, Número de plantas.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 24**

Su referencia:	Cd mg/Kg	Pb mg/Kg	NTK mg/Kg	P mg/Kg	Peso de la Planta g	Número de Plantas
M-1 Raíz 1	0.02	2.4	0.06	0.43	771.75	105.0
M-2 Raíz 2	0.02	1.2	0.06	0.18	549.45	135.0
M-3 Raíz 3	0.02	1.0	< 0.05	1.02	478.10	105.0
Límite de detección laboratorio	0.01	0.01	0.05	0.05		

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002



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 – 179 – 02**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-14**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **TALLOS**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **NTK, P.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 24**

Su referencia:	P mg/Kg	NTK mg/Kg
M-1 PLANTA 1	0.47	0.41
M-2 PLANTA 2	0.64	<0.05
M-3 PLANTA 3	0.65	<0.05-
Límites de detección laboratorio	0.05	0.05

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002

Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana

27. 12. 2002



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 – 179 – 02**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-15**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **AGUA**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **SST, NTK, P, DBO₅, DQO, Coliformes fecales.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2002- diciembre – 30**

Su referencia:	DQO mgO ₂ /l	DBO ₅ mgO ₂ /l	P mg/l	SST mg/l	NTK mg/l	Coliformes fecales NMP/100ml
M-1 Entrada	391.6	122.5	2.0	40.0	50.07	>1600
M-2 Salida 1	217.1	64.3	1.99	40.0	38.72	>1600
M-3 Salida 2	124.8	33.6	1.47	50.0	31.83	>1600
M-4 Salida 3	99.20	25.0	1.29	82.0	23.31	70.0
Límites	0.05	2	0.05	0.5	0.5	2
Metodos utilizados	Standad Methods for Examination of Water and Wastewater, 20 th Edition, 2000, APHA,AWWA,WEF.					
Observaciones						

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002

3. 1. 2003



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 – 001 – 03**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-20**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **AGUA**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **SST, NTK, P, DBO₅, DQO, Coliformes fecales.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 06**

Su referencia:	DQO mgO ₂ /l	DBO ₅ mgO ₂ /l	P mg/l	SST mg/l	NTK mg/l	Coliformes fecales NMP/100ml
M-1 Entrada	442.7	139.6	2.0	134.0	50.07	>1600
M-2 Salida 1	140.2	38.6	1.43	124.0	30.61	90.0
M-3 Salida 2	109.4	28.5	1.20	78.0	22.50	>1600
Límites	0.05	2	0.05	0.5	0.5	2
Metodos utilizados	Standad Methods for Examination of Water and Wastewater, 20 th Edition, 2000, APHA,AWWA,WEF.					
Observaciones						

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002

Programa de investigación: Planta de tratamiento Copacabana

10. 1. 2002



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 – 005 – 03**

FECHA EMISIÓN : **2003- enero - 21**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **AGUA**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **SST, NTK, P, DBO₅, DQO, Coliformes fecales.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 13**

Su referencia:	DQO mgO ₂ /l	DBO ₅ mgO ₂ /l	P mg/l	SST mg/l	NTK mg/l	Coliformes fecales NMP/100ml
M-1 Entrada	550.4	175.4	2.10	134.0	59.80	1200
M-2 Salida 1	417.0	131.2	1.48	124.0	50.48	900
M-3 Salida 2	150.4	42.1	1.26	78.0	24.93	70.0
M-4 Salida 3	104.3	26.7	1.20	116.0	22.09	70.0
Límites	0.05	2	0.05	0.5	0.5	2
Metodos utilizados	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20 th Edition, 2000, APHA,AWWA,WEF.					
Observaciones						

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002

17. 1. 2002



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 – 008 – 03**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-27**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **AGUA**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **SST, NTK, P, DBO₅, DQO, Coliformes fecales.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 20**

Su referencia:	Pb mg/l	Cd mg/l	DQO mgO ₂ /l	DBO ₅ mgO ₂ /l	P mg/l	SST mg/l	NTK mg/l	Coliformes fecales NMP/100ml
M-1 Entrada	<0.01	<0.01	94.0	23.33	0.77	52.0	20.88	140.0
M-2 Salida 1	0.04	<0.01	88.0	21.03	0.26	48.0	20.48	170.0
M-3 Salida 2	<0.01	<0.01	99.2	33.06	0.40	34.0	22.10	350.0
M-4 Salida 3	<0.01	<0.01	53.0	9.66	0.44	58.0	11.43	50.0
Límites	0.01	0.01	0.05	2	0.05	0.5	0.5	2
Metodos utilizados	Standad Methods for Examination of Water and Wastewater, 20 th Edition, 2000, APHA, AWWA, WEF.							
Observaciones								

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002



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 – 008 – 03**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-31**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **SUELOS**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **Cd, Pb, NTK, P.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 20**

Su referencia:	Cd mg/Kg	Pb mg/Kg	P mg/Kg	NTK mg/Kg
M-1 SUELO 1	<0.01	8.0	3.53	0.55
M-2 SUELO 2	<0.01	4.0	1.26	1.07
M-3 SUELO 3	<0.01	4.0	4.52	<0.05
Límites de detección	0.01	0.01	0.01	0.05

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002



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 2

INFORME DE ENSAYO

ORDEN N° **MA – 008 – 03**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-31**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **RAICES**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **Peso de raices, Cd, Pb, NTK, P.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 20**

Su referencia:	Pesos de raices g*	Cd mg/Kg*	Pb mg/Kg*	P mg/Kg*	NTK mg/Kg*
M-1 RAÍZ 1	30.44	<0.01	6.0	0.18	<0.05
M-2 RAÍZ 2	16.24	<0.01	6.0	0.16	<0.05
M-3 RAÍZ 3	23.85	<0.01	6.0	0.23	<0.05
Límites de detección	-	0.01	0.01	0.01	0.05
Observación	* Peso de materia seca				

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002



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 – 008 – 03**

FECHA EMISIÓN : **2003-enero-31**

CLIENTE : **FUNDACION MEDMIN**
MATERIAL : **TALLOS**
NUESTRA REFERENCIA : **COMERCIAL**
ENSAYOS SOLICITADOS : **Peso de tallos, Número de plantas, NTK, P.**
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO : **2003- enero – 20**

Su referencia:	Peso de tallos g*	Número de plantas	P mg/kg*	NTK mg/kg*
M-1 PLANTA 1	804.6	202.0	0.35	<0.05
M-2 PLANTA 2	320.51	84.0	0.37	<0.05
M-3 PLANTA 3	266.14	136.0	0.42	<0.05
Límites de detección	-	-	0.01	0.05
Observaciones	* Peso de materia seca			

Vilma Hurtado
DIVISIÓN MEDIO AMBIENTE

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. ©2002

6.5. Bibliografía

Literatura científica

Coronel T. (1995): Hidráulica. CECSA, México.

Ferrero C. M. (1999): Manual de Obras Rurales. Colombia.

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.

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.

Páginas de Web

<http://www.pnud.bo/biodiversidadtdps/proyecto/antecedentes.html>

<http://www.agualtiplano.net/cuencas/titicaca.htm>

http://129.13.103.40/shop/evaluation/10/demo_de/Mechanik/FlueGas/Barome/Barome.htm