

Resumen

La problemática de los metales pesados en cuerpos de agua superficial se ha observado a nivel mundial y ha sido objeto de múltiples estudios. La presencia de metales en concentraciones por encima de los límites establecidos adquiere mayor relevancia cuando estos se encuentran en fuentes de agua para abastecimiento público. Esta investigación toma como área de estudio a la Microcuenca Milluni, la cual se encuentra cercana de actividades mineras pasadas e ilegales que afectan directamente sobre sus recursos hídricos. Milluni está ubicada en el departamento de La Paz y es una fuente natural de agua para dos ciudades importantes de Bolivia, La Paz y El Alto (540 000 habitantes aproximadamente). El objetivo de esta tesis doctoral es estudiar la implementación de la Ósmosis Inversa (OI) operada a bajas presiones como alternativa sostenible de tratamiento para eliminar la contaminación minera en las aguas de Milluni. Adicionalmente se busca contribuir a la gestión de recursos hídricos, con énfasis en el control de la de calidad de agua en la zona.

Esta investigación doctoral se desarrolló en cuatro etapas. En la primera etapa se hizo la caracterización de los cuerpos de agua superficiales para identificar el metal pesado más peligroso presente en Milluni. Para ello, se diseñó un programa de monitoreo considerando las particulares características y limitaciones en la gestión del agua del área. En la segunda etapa del estudio se formularon dos mecanismos para fortalecer la gestión del agua de Milluni, planteando complementar el programa de monitoreo tradicional con la herramienta de teledetección de contaminantes e identificar las partes interesadas de Milluni, para contribuir a la toma de decisiones de la zona. En la tercera etapa de la investigación se diseñó, montó y puso en marcha una planta piloto de OI, tecnología seleccionada debido a su alta eficiencia en la separación de compuestos iónicos del agua. Además, se realizó un diseño de experimentos para estudiar el comportamiento y eficiencia de una membrana tipo ULP 2540 Marca Keensen. Finalmente, en la cuarta etapa se desarrolló un análisis estadístico de los resultados experimentales obtenidos, y la validación de los mismos por medio de un modelo matemático basado en el modelo de concentración de polarización de Spiegler-Kedem. El modelo incluyó un factor de ajuste de temperatura tipo Arrhenius, para obtener una predicción precisa del rendimiento del proceso.

Los resultados de la primera etapa expusieron que, en las dos primeras lagunas de Milluni, las lagunas Pata Khota y Jankho Khota no se presenta contaminación. Sin embargo, en las lagunas tres y cuatro, Milluni Chico y Milluni Grande, se detectó contaminación por metales pesados tóxicos producto de las actividades mineras en la zona. Destacando que Milluni Chico es la laguna más contaminada del sistema. El arsénico fue identificado como ion problema prioritario en Milluni, debido a que las concentraciones detectadas en sus lagunas superan por 100 los límites permitidos. Mediante el análisis estadístico de los resultados del primer año del programa de monitoreo se determinó que la frecuencia de monitoreo adecuada es de, al menos, dos veces al año, a realizarse en los meses más representativos de las estaciones húmeda y seca. El pH y la conductividad se identificaron como parámetros básicos de control de la presencia de iones metálicos detectados fuera de los límites permisibles.

En la segunda etapa se obtuvo que, la combinación de técnicas de monitoreo tradicional y la efectuada mediante teledetección permitieron analizar la calidad del agua de las 4 lagunas de

Milluni. Se comprobó nuevamente que el punto más contaminado es la laguna Milluni Chico. También, se realizó la identificación de partes interesadas dentro de la gestión del agua en la región de Milluni. Las 24 partes fueron analizadas y categorizadas de acuerdo a su importancia, poder e influencia en la aprobación e implementación de proyectos relacionados con el agua en la zona.

En la tercera etapa, la planta piloto de OI permitió el estudio del comportamiento y eficiencia de una membrana semipermeable de poliamida con configuración en espiral tipo ULP-2540, marca Kensem de procedencia China. El diseño de experimentos determinó 9 pruebas para analizar la interacción de las 3 variables de entrada al sistema, las cuales fueron presión, caudal y concentraciones del ion metálico problema (arsénico).

En la cuarta etapa se realizaron los experimentos con aguas sintéticas de arsénico. Los índices de rechazo del arsénico fueron superiores al 94% en todos los ensayos confirmando la eficiencia del proceso de OI operando con presiones bajas. Finalmente, se desarrolló un modelo matemático a partir del modelo de flujo unidimensional Concentración-Polarización (CP) de Spiegler-Kedem, incorporando un ajuste de temperatura tipo Arrhenius. En la validación del modelo se analizaron los valores teóricos esperados versus los datos experimentales obtenidos, presentando un error relativo de 4,4% entre ambos.

Esta tesis doctoral concluye que es posible remover el arsénico presente en aguas sintéticas utilizando la OI operada en condiciones sostenibles de presión (presiones bajas). Se ha demostrado que el uso de esta tecnología a baja presión no afecta a la eficiencia de separación del proceso y contribuye a disminuir el costo energético durante la operación. Este aporte es significativo en situaciones donde se cuenta con pocos recursos económicos y existen riesgos inminentes sobre la salud pública y los ecosistemas, como es el caso de la contaminación del agua por arsénico en Milluni, Bolivia.