

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL PARA LA RECUPERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN LA POBLACIÓN DE ALCALÁ

ARTIFICIAL WETLAND DESIGN AND CONSTRUCTION FOR WASTEWATER RECOVERY IN THE TOWN OF ALCALÁ

Quevedo Quispe Ariel Winston

Docente: Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca (Bolivia)

winston.quevedo@gmail.com

Enviado 21 de agosto aceptado 29 de septiembre

Resumen

En la población de Alcalá del Departamento de Chuquisaca, existe un grave problema de contaminación por aguas residuales que provienen mayormente de las actividades agropecuarias, que son vertidas sin ser sometidas a ningún tipo de tratamiento. Además, el recurso vital no puede ser desperdiciado, ya que es útil y necesario para la vida humana, animal y vegetal. Ante la necesidad de recuperación del preciado líquido, se precisa implementar un sistema de remediación eficiente, de bajo costo y sin afectación al ecosistema. Por todo lo anterior, el presente artículo se enfocó en el diseño y construcción de un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial para el tratamiento biológico de las aguas residuales en la población de Alcalá, mediante la técnica de fitorremediación.

Palabras Clave

Humedal, fitorremediación, tratamiento biológico, Alcalá.

Abstract

The town of Alcalá in the Department of Chuquisaca, is entering into a serious problem

of pollution due to wastewater that comes mainly from agricultural activities and is dumped untreated. In addition, water as vital resource should not be wasted for its usefulness and necessity to human, animal and plant life. Given the reasons for recovering this valuable resource, there is the need of implementing an efficient, low-cost biological treatment without affecting the ecosystem. Therefore, this article is focused on the design and construction of an artificial wetland with horizontal subsurface flow for wastewater biological treatment in Alcalá through the use of phytoremediation technique.

Keywords

Wetland, phytoremediation, biological treatment, Alcalá

Introducción

Uno de los problemas que más perjudica a la sociedad moderna, es la contaminación. Cada vez son más los ecosistemas afectados por el contacto con sustancias nocivas provenientes de actividades industriales, agropecuarias y mineras, entre otras. Situación que, repercute

de forma negativa sobre la calidad del agua y los suelos.

A los fines encontrar una solución favorable a esta problemática, se han desarrollado tecnologías para la remediación, que según Martínez et al. (1), consisten en:

Un conjunto de técnicas que tienen como objetivo hacer la recuperación de suelos o cuerpos de agua contaminados, lo anterior con miras a restaurar las características de ciertas propiedades de la matriz ambiental, de tal modo que se conserven o se mejoren sus características, manteniendo el equilibrio ecosistémico y evitando que se genere un peligro para animales, plantas y seres humanos (p13).

Ahora bien, los tratamientos de remediación pueden clasificarse en tres grandes grupos:

Tratamientos biológicos: También conocidos como biorremediación, se refieren al uso de organismos como plantas, hongos y bacterias, para destruir o convertir los contaminantes en sustancias más simples, de modo que el tratamiento para esas nuevas sustancias sea más fácil. Entre los principales métodos de biorremediación se encuentran el bioventeo, bioestimulación, bioaugmentación, landfarming y fitorremediación (2).

Tratamientos Físicoquímicos: Se basan en la utilización de las propiedades químicas o físicas del medio para contener, separa o destruir contaminantes. Entre los métodos físicoquímicos destacan la absorción por vapor, arrastre por vapor, oxidación química y electrocinética (1).

Tratamientos Térmicos: Buscan separar o inmovilizar contaminantes por medio de la oxidación térmica. Entre los tratamientos

térmicos se encuentran, la incineración, desorción térmica y pirolisis (1).

De los referidos tratamientos de remediación, la fitorremediación constituye una buena alternativa para comunidades debido a los resultados satisfactorios en términos de remoción de materia orgánica, al bajo costo de implantación y la facilidad de operación.

La fitorremediación es una técnica de remediación biológica que permite desintoxicar agua o suelos alterados con contaminantes, tales como los hidrocarburos derivados del petróleo, solventes y pesticidas entre otros (3). Se basa en el uso de las capacidades de las plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o tolerar contaminantes (4). Tiene como principal ventaja que, es una tecnología de bajo costo, cuyo requerimiento básico es el riego y fertilización para garantizar el crecimiento de las plantas y hongos empleados (5). Además, es respetuosa con el ambiente y no es invasiva (6).

Dependiendo del tipo de contaminación y el nivel de limpieza requerido; las tecnologías de fitorremediación pueden servir como medio de contención: rizofiltración y fitoestabilización; o eliminación: fitodegradación, fitoestimulación, fitoextracción, fitovolatilización (7). A continuación, se describe cada uno de los mecanismos referidos:

Fitoextracción: Consiste en la absorción de metales contaminantes a través de las raíces de las plantas, y su acumulación en los tallos y hojas. Para este proceso se utilizan pastos y plantas freáticas (8).

Rizofiltración: Se trata del uso de las raíces para absorber, concentrar y precipitar metales tóxicos del agua superficial o subterránea (9). Las plantas toman los metales a través de las raíces, que deben tener alta biomasa,

una amplia área superficial y tolerancia a los metales. Constituye una técnica de fácil manejo y bajo costo, que genera pocos residuos, permite remediar varios metales, y atrapa sólidos en suspensión (10). Las principales especies empleadas para la rizofiltración, son las macrófitas (11).

Fitoestabilización: Consiste en inmovilizar contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante su absorción y acumulación en las raíces (8). A través de este proceso, las plantas transforman los metales tóxicos en no tóxicos. Tiene como ventajas que es de bajo costo y resulta estéticamente agradable (10). Además, es muy eficiente para tratamiento de la contaminación por metales pesados y compuestos hidrofóbicos. Para este proceso se pueden utilizar pastos y plantas freáticas (5).

Fitoestimulación: Se refiere al tratamiento biológico de contaminantes mediante bacterias y hongos, mejorando la actividad en la rizósfera (9). Tiene su fundamento en el aprovechamiento de la relación de simbiosis que se produce entre la planta y algunos microorganismos, lo cual permite la eliminación de metales pesados (11). Es muy eficiente para el tratamiento de contaminación por hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, y aguas residuales agropecuarias (12).

Fitovolatilización: Los árboles y otras plantas en crecimiento absorben el agua junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos (8). De modo que, absorben los metales tóxicos y los transforman en menos tóxicos mediante el proceso de transpiración. Para estos fines suelen utilizarse juncos, canas o espadaña (10).

Fitodegradación: Este mecanismo se basa en la sujeción y reducción de contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la raíz, inactivando las sustancias tóxicas, ya

sea por absorción, adsorción o precipitación (8). Las plantas acuáticas y terrestres degradan la contaminación orgánica valiéndose de sus propios procesos metabólicos en asociación con la rizósfera microbial, permitiendo la remediación de contaminantes orgánicos como los insecticidas, herbicidas, solventes clorinados y nutrientes orgánicos (10).

Ahora bien, para poner en práctica la técnica de fitorremediación se recurre a la construcción de un humedal artificial. De acuerdo con Martínez et al. (1), estos pueden definirse como:

Sistemas depuradores de agua que se constituyen de canales o lagunas, son plantados con especies propias o endémicas de la zona, (...) los humedales construidos han sido convertidos en métodos de tratamientos naturales de aguas residuales y que en países de Europa y en Estados Unidos han sido catalogados como una tecnología efectiva y económica para la descontaminación de cuerpos de agua (p71).

Dependiendo del contaminante que se desee remover, y la tipología del humedal, este último puede cumplir tres procesos fundamentales (13):

Procesos Físicos: Remoción de contaminantes asociados con materiales particulados.

Procesos de Remoción Biológicos: Captación de los contaminantes por parte de las plantas.

Procesos de Remoción Químicos: El más representativo es la absorción, que produce la retención o inmovilización de contaminantes.

Entre los diferentes tipos de humedades artificiales, se encuentran los siguientes:

Humedales de flujo superficial: Generalmente tienen una profundidad que varía entre 0.4m y 0.6m, son pobladas por plantas enraizadas,

flotantes, emergentes o subemergentes; y son utilizados a gran escala (1).

Humedales de flujo horizontal subsuperficial: Denominados en inglés *subsurface flow constructed wetlands*. Son estanques con un fondo relativamente impermeable relleno con un medio poroso como por ejemplo grava. En este caso, el agua entra por un extremo y sale por el otro. Para este tipo de humedal se utilizan plantas acuáticas como la phragmites australis, pero también se emplean plantas autóctonas (1).

Humedales verticales: En este caso el agua se aplica uniformemente sobre la superficie y es drenada por la base del mismo, a los fines de que el agua pase por cada uno de los medios y las raíces. Este tipo de humedal opera de modo discontinuo con períodos de llenado y drenaje intermitentes (1).

Humedales con plantas flotantes: Se caracterizan por la utilización de especies vegetales acuáticas flotantes o plantas emergentes, de manera que las raíces se arraiguen a los sedimentos (14).

Objetivo

Objetivo General

Diseñar y construir un humedal artificial para la recuperación de aguas residuales en la población de Alcalá.

Objetivos Específicos

Caracterizar la situación de contaminación por aguas residuales en la población de Alcalá.

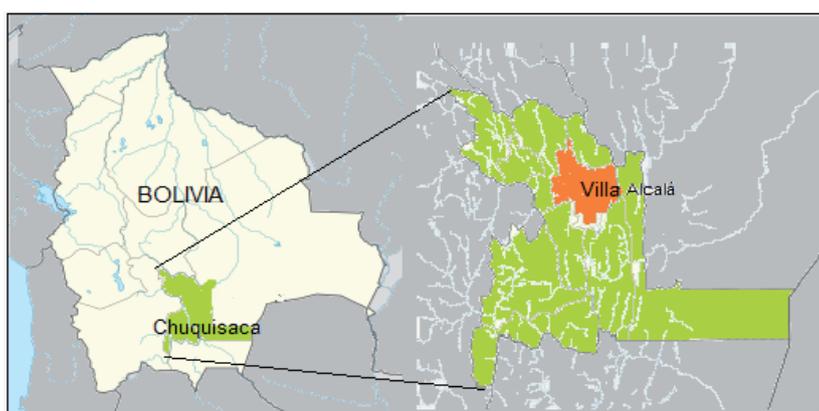
Evaluar los diferentes tipos de humedales existentes y elegir la alternativa más adecuada para la recuperación de aguas residuales en la población de Alcalá.

Metodología

Caracterización del Entorno de Trabajo

El estudio fue realizado en la población de Alcalá ubicada en el Departamento de Chuquisaca (Ver Figura N°1), Alcalá es un municipio de Bolivia, ubicado en la Provincia Tomina al centro del departamento de Chuquisaca; tiene una superficie de 443 km² y una población de 4.902 habitantes (según el Censo INE 2012). Está a una distancia de 182 km de la ciudad de Sucre, capital del país. Coordenadas: 64°27'30.04" y

Figura N° 1. Localización de Alcalá.



Nota. Adaptado de *Plan Territorial de Desarrollo Integral del municipio de Villa Alcalá 2016 – 2020 depuración* (p16) (15).

64°15'39.04" longitud Oeste, entre los paralelos 19°17'37.28" y 19°33'29.46" Latitud Sur. Presenta un clima característico de montaña, topografía muy accidentada, presencia de ríos y cuencas (15).

Existe una gran vocación por la producción agrícola diversificada, ganadera, frutícola y artesanal. Los principales productos agrícolas son las semillas de trigo, papa, maíz, trigo, cebada, maní, cebolla y ají. En la producción pecuaria se destaca la cría de ganado vacuno, caprino y ovino. En casi todas las comunidades el número de hectáreas de tierra cultivables sobrepasan las 100 Has; de las cuales los suelos cultivados a secano, es decir regados solo por la lluvia son casi el total de la tierra cultivable. En este sentido, es importante señalar que para el año 1975 se tenía una precipitación anual media de 801.0 mm, y para el año 1998 la precipitación pluvial disminuyó hasta 369.2 mm por efecto del Fenómeno del Niño, lo que denota la importancia de aumentar el riego y conservar los recursos hídricos (15).

Respecto a los recursos hídricos, las principales fuentes de agua en el Municipio de Alcalá son los ríos de Alcalá, Matela Alta y Limabamba. De estos ríos solo el de Matela Alta es permanente y los otros dos pierden su caudal en época seca. Estos ríos pasan por casi todas las comunidades del Municipio. También se cuenta con quebradas afluentes y vertientes ubicadas en las faldas de las cimas (15).

Para mejorar las condiciones de riego, en el año 2020 se inauguró una represa para el sistema de riego en la comunidad de Huasa Pampa, ubicado en el municipio de Villa Alcalá, que permitirá irrigar 49 hectáreas, la represa tiene una altura de 16 m, 60 m de longitud y una capacidad de almacenamiento de 75.000 metros cúbicos de agua. Además cuenta con tuberías a lo largo de

6 kilómetros y cámaras de distribución para el riego de las parcelas (16).

Secuencia Metodológica

La secuencia metodológica consistió primeramente en, la realización de visitas y recorridos en la población de Alcalá a los fines de evaluar la situación de la contaminación por aguas residuales. Luego, con base en una minuciosa revisión documental, con especial atención en los estudios realizados por Arias y Brix (17), se elaboró el diseño de un sistema de biorremediación apropiado para la recuperación de las aguas residuales en la referida localidad, el cual consistió en un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial; que finalmente fue construido y puesto en funcionamiento gracias a la participación conjunta del docente y cada uno de los estudiantes de la asignatura de Biodiversidad de la Carrera de Producción Agropecuaria de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca de la Carrera de Producción Agropecuaria con sede en Alcalá, durante el período académico correspondiente al año 2016.

Alcance y Limitaciones del Proyecto

Para evaluar el grado de contaminación de las aguas se utilizó una escala de valoración relativa respecto al color y olor de las aguas en los cauces y cuerpos hídricos antes y después de poner en marcha el proyecto de humedal artificial para la recuperación de aguas residuales de la zona. No se realizaron análisis físico-químicos formales de laboratorio.

Resultados y Discusión

Evaluación de la Situación de Contaminación por Aguas Residuales en Alcalá

Se realizaron múltiples visitas y recorridos en la localidad de Alcalá, a través de los cuales se observó que existe contaminación directa por aguas residuales con rebalse en las cuencas, evidenciándose circulación de aguas residuales

con aspecto muy oscuro y olor desagradable, provenientes principalmente de las actividades agropecuarias, afectando a los pobladores de la localidad, las regiones aledañas y sus respectivos ecosistemas (Ver Fotografía N° 1).

Fotografía N° 1. Contaminación por aguas residuales en la población de Alcalá.



En vista de la situación encontrada, el docente y los estudiantes de la asignatura de Gestión y Conservación de la Biodiversidad de la Carrera de Producción Agropecuaria de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca de la Carrera de Producción Agropecuaria con sede en Alcalá, durante el período académico correspondiente al año 2016; emprendieron conjuntamente la iniciativa de diseñar y construir un humedal artificial para la recuperación de aguas residuales en la población de Alcalá.

Diseño del Humedal Artificial

En general para seleccionar una técnica de remediación en particular, es necesario contar con información del lugar de aplicación y

para realizar su caracterización, así como la de los principales contaminantes a tratar. Finalmente, la tecnología se elige considerando sus costos y a la disponibilidad de materiales y equipos para realizar el tratamiento. En el caso de Alcalá, se trata de las aguas residuales provenientes principalmente de las actividades agropecuarias, la depuración de este tipo de contaminación se consigue haciendo pasar el agua contaminada a través, de zonas húmedas artificiales, donde se dan procesos físicos, biológicos y químicos, que la transforman y la depuran a la salida.

Un humedal de tratamiento de flujo subsuperficial (HHAA FSS) es aquel en el que el flujo de agua se produce a través de un medio poroso, constituido por el propio

sustrato o por grava, diseñados de tal modo que el nivel de agua permanezca siempre por debajo de la superficie del sustrato. Los HHAA FSS pueden dividirse a su vez según la dirección predominante del flujo a través del lecho poroso, ya sea horizontal o vertical. Los sistemas de flujo horizontal son los más utilizados, y son aquellos de efectividad más demostrada. La principal ventaja que presenta un humedal de flujo subsuperficial respecto a los de flujo superficial es que requieren menos superficie para lograr la misma eficacia de reducción de la carga contaminante.

Con base a las razones expuestas, se escogió el humedal de tratamiento de flujo subsuperficial (HHAA FSS) de flujo horizontal como alternativa para el diseño. Que adicionalmente, no es muy costoso, sirve para tratar flujos primarios, no genera olores fuertes, no acumula insectos, no requiere superficies de gran tamaño, es de fácil mantenimiento y es muy eficiente para el tipo tratar la contaminación por aguas residuales agropecuarias.

Elementos Constitutivos del Humedal Subsoperficial de Flujo Horizontal

En consonancia con el trabajo realizado por Alarcón, Zurita, Lara-Borrero y Vidal (18), el humedal quedó constituido por los siguientes elementos:

Influente

El agua residual que entra en el humedal. En este caso se trata de las aguas residuales que provienen principalmente de las actividades agropecuarias desarrolladas en la población de Alcalá. Se realizó mediante el tendido de la tubería encargada de transportar el agua a la cámara donde se realiza la sedimentación para permitir la entrada a la fosa en donde se instala un filtro de ingreso junto con respiraderos.

Sustrato

Son los materiales o medios filtrantes colocados en el lecho del humedal para servir de soporte a las plantas y el desarrollo del ecosistema. Puede incluir varias capas de arena, grava, rocas o sedimentos. En el presente caso se utilizaron los siguientes materiales:

- Plástico Agrofil para impermeabilizar.
- Piedra manzana.
- Ripio o grava de 3 cm. de diámetro.
- Gravilla de 0.5 cm. de diámetro.
- Arena fina o arenilla.
- Tubos PVC (desagüe) y accesorios.
- Cámara séptica.

Vegetación

Se refiere a las especies vegetales o plantas que llevan a cabo la depuración del agua residual. Estas son las que determinan la eficiencia de la fitorremediación (19); por lo que, se requiere que cumplan con las siguientes características (20):

- Ser tolerantes a altas concentraciones de metales.
- Ser acumuladora de metales.
- Tener una rápida tasa de crecimiento.
- Tratarse de una especie local.
- Fácilmente cosechable.

Las plantas más utilizadas para estos fines son: juncos, espadañas, esparganios, carrizos, entre otros. En este sentido, las especies que cumplen

con los requerimientos mencionados y fueron utilizadas en este caso, fueron las siguientes:

- Jacinto de agua: *Eichhornia crassipes*, también conocido como flor de bora, agua común o tarope, es una planta acuática familia de las Pontederiaceae, con características depuradoras y facilidad proliferación, capaces de retener en sus tejidos una gran variedad de metales pesados como cadmio, mercurio y arsénico (13).
- Lenteja de agua: *Lemna sp*, es una macrófita muy utilizada para los sistemas de fitorremediación (10). Es una planta acuática que tiene capacidad de doblar su biomasa en pocos días y bajo condiciones adecuadas de fertilización tiene rendimientos considerables (22).
- Totorá: *Scirpus californicus*, es una macrófita fitodepuradora que se adapta a las condiciones de humedad y sirve para mejorar los procesos de separación de partículas, asimilación de nutrientes y metales, purifica el agua mediante procesos aeróbicos de degradación y transporta grandes cantidades de oxígeno hasta sus raíces y rizomas, donde es usado por dicho microorganismos (21).
- Junco: *Schoenoplectus lacustris*, se trata de plantas emergentes que facilitan la filtración y adsorción de los constituyentes del agua residual, permiten la transferencia de oxígeno al agua y limitan la penetración de la luz solar (13). Además, favorecen la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos y la desaparición de bacterias patógenas (23).

Microorganismos

Son los organismos vivos que intervienen en las reacciones biológicas dentro del proceso de tratamiento. En el presente caso, se incluyeron bacterias, levaduras, hongos y protozoarios, mediante la utilización de abono orgánico fermentado.

El diseño del humedal

El diseño del humedal se realizó tomando como base los parámetros establecidos en los estudios realizados por Arias y Brix (17), que indica: Las reacciones bioquímicas en los humedales y el rendimiento de eliminación de contaminantes pueden ser descritos mediante modelos conocidos de reactores ideales, a los que se les añaden las expresiones de balance de masas. Los más relevantes para el caso de los humedales son: Reactor de flujo en pistón, Reactor de flujo en pistón con dispersión y Reactores de mezcla completa en serie.

El autor se basó en el modelo de Reactor de flujo en pistón con dispersión caracterizado por el número de Péclet (PE), el cual está relacionado con la dispersión del humedal (D) a través de la ecuación:

$$D = D / V.L = 1 / PE$$

Donde:

L = es la distancia desde la entrada a la salida, m

V = velocidad superficial m/d

D = coeficiente de dispersión, en el rango de rango 0.07- 0.35 m²/d

Luego PE, está en rango de 14 a 3

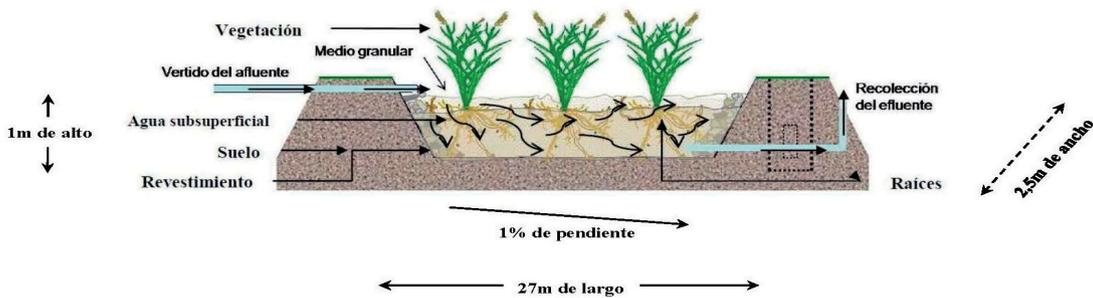
Parámetros técnicos para la Construcción del Humedal

- Tipo de flujo: Subsuperficial

- Carga orgánica afluyente : < 150 DBO₅ kg/ha.
- Carga hidráulica: < 5cm/d
- Tiempo de retención hidráulica: 5 a 15 días
- Área específica por PE: 5 a 20 m² PE (con PE = 4; Área de diseño entre: 20 a 80 m²)
- Profundidad: 0.60 m a 1 m
- Tipo de relleno: Arenas y gravas
- Vegetación: Variable

En concordancia con todo lo anterior, se completó el diseño del humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial, con unas dimensiones de 27 m de largo por 2,5 m de ancho, una pendiente de 1% y profundidad de 1 metro, para ser construido con los materiales y especies de plantas previamente descritas, como se ilustra en la Figura N° 2.

Figura N° 2. Diseño del humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial



Nota. Adaptado de *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración* (p15) por Rabat (24).

Construcción del Humedal Artificial de Flujo Horizontal Subsuperficial

En primer lugar se realizó la limpieza del terreno y seguidamente la excavación, la cual se efectuó durante un período de 20 días motivado a que el terreno presentaba estratos muy rocosos (Ver Fotografía N° 2).

Fotografía N° 2. Proceso de limpieza y excavación.



Una vez completada la limpieza y excavación, se procedió al acolchonamiento del piso y extendido del plástico Agrofil con el propósito de evitar la infiltración del agua (Ver Fotografía N° 3).

Fotografía N° 3. Acolchonamiento y extendido del plástico.



Concluido el extendido del plástico, se realizó el tendido de la tubería encargada de transportar el agua a la cámara donde se realiza la sedimentación para permitir la entrada a la fosa en donde se instala un filtro de ingreso junto con respiraderos, para la salida se instala un filtro de absorción con una diferencia de 40 cm. de la entrada que expulsa a la segunda cámara séptica. Y a continuación, se relleno la fosa con capas de piedra manzana, grava gruesa, grava, gravilla, arena y abono orgánico fermentado, respectivamente para garantizar el sostén de las plantas hasta que las raíces alcancen el agua (Ver Fotografías N° 4, 5, 6 y 7).

Fotografía N° 4. Colocación de piedra manzana.



Fotografía N° 5. Colocación de grava.



Fotografía N° 6. Colocación de arena fina o arenilla.



Fotografía N° 7. Colocación de materia orgánica.

Para culminar con la construcción del humedal, se realiza la plantación de las especies acuáticas previamente seleccionadas (Ver Fotografía N° 8). Adicionalmente, se incluyeron algunas plantas aromáticas con fines estéticos y odoríficos. En este sentido, se añadieron las siguientes especies: dalias, gladiolos, margaritas, totora, achira, rosas, claveles y gigantón.

Fotografía N° 8. Plantación de plantas acuáticas.

Una vez concluido el proceso de construcción, el humedal quedó como se muestra en la Fotografía N° 9.

Fotografía N° 9. Humedal construido.



Mediante el tratamiento con el humedal construido, las plantas absorben los nutrientes químicos y orgánicos necesarios para su desarrollo, se filtra y aclara el agua a medida que sube de nivel hasta llegar al a tubería de absorción; y además se consigue un ecosistema más limpio y agradable fragancia floral (Ver Fotografía N° 10).

Fotografía N° 10. Agua residual remediada por el humedal.



Al realizar la prueba del funcionamiento del humedal construido, se cumplieron las expectativas planteadas como grupo, con el ingreso y salida del agua tratada, que podrá ser utilizada en primera instancia para el riego de forrajes.

Los resultados obtenidos fueron presentados a las autoridades municipales y universitarias de la región como propuesta para el tratamiento y reducción de la contaminación de las aguas residuales, contándose con la presencia de ambientalistas, la comisión ambiental de la Asamblea Departamental de Chuquisaca y estudiantes de las unidades educativas del Municipio.

Conclusiones

Los problemas de contaminación por aguas residuales que existen en la población de Alcalá del Departamento de Chuquisaca, pueden reducirse de manera significativa mediante la implementación de humedales artificiales construidos para la biorremediación del agua a través de la técnica de fitorremediación.

La técnica de fitorremediación implementada en el humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial construido, permitió la remediación de aguas residuales en la localidad de Alcalá, obteniéndose como resultado, el filtrado, aclaramiento y agradable fragancia del líquido vital, que podrá ser utilizado en primera instancia para el riego de forrajes.

El humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial representa una alternativa económica, eficiente y ambientalmente amigable, para la reducción de la contaminación por las aguas residuales originadas principalmente por las actividades agropecuarias desarrolladas en la población de Alcalá del Departamento de Chuquisaca, que

puede hacerse extensiva a otras localidades que requieran la reducción de la contaminación por las aguas residuales o similares.

Para ampliar el uso del agua tratada para el riego de otros cultivos, es necesario realizar análisis formales de laboratorio: físicos, químicos y biológicos.

Agradecimientos

Mis agradecimientos a los estudiantes de ayer y hoy mis colegas, por el aporte que hicieron, ya sea con mano de obra y aportando de grandes ideas en cada momento y en cada detalle de la construcción del presente POSO HUMEDAL ARTIFICIAL, siempre con la finalidad de velar el bienestar y salud ambiental de la población de Alcalá, la misma es una contribución para su gente linda de este Municipio.

Bibliografía

1. Martínez, J., Sanchez-Yañez, J., Volke-Sepúlveda, T., Vallejo, V., Perez, L., Duarte, P., Umbacía, M., Márquez-Benavidez, L., Villaseñor, J., Castañeda, L., Casallas, M. (2019). Remediación de suelos contaminados: fundamentos y casos de estudio. Colombia: EAN.
2. Suarez, R. Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. (Tesis de Especialización), Universidad Libre, Bogotá, Colombia; 2013.
3. Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., y Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 184, 594-600.
4. Cameselle, C., y Gouveia, S. (2019). Phytoremediation of mixed contaminated

- soil enhanced with electric current. *Journal of Hazardous Materials*, 361, 95-102.
5. Martínez, J. y Casallas, M. (2018). Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro. Colombia: EAN.
 6. Galarza, A. y Pérez, G. Diseño de humedales artificiales para fitorremediación de plomo y cromo con typha latifolia en el lago Vahuarcocha-Imbabura. (Tesis de Pregrado), Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador; 2019.
 7. Thangavel, P. y Subhram, C. (2004). Phytoextraction—Role of hyper accumulators in metal contaminated soils. *Proceedings of the Indian National Science Academy. Part B.* 70 (1), 109-130.
 8. Delgadillo-López, A., González-Ramírez, C., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. y Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 597-612.
 9. Amaya, A., Lucero, M., Jiménez, M., Islas, M., Cano C., Roa, G. (2015). Fitorremediación de contaminantes orgánicos. México: UAEM.
 10. Montenegro, S., Yamilé, S. y Calderón, F. (2019). Prácticas de biorremediación en suelos y aguas. Colombia: UNAD.
 11. Jiménez, E. y Ramos, B. Evaluación de la eficiencia fitorremediadora de lupinus pubescens, plantago major y scirpus californicus en suelos contaminados con arsénico. (Tesis de Pregrado), Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador; 2019.
 12. Arias, S., Betancur, F., Gomez, G., Salazar, J. y Hernández, M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*, 74, 12-22.
 13. Paredes, J. Optimización de la fitorremediación de mercurio en humedales de flujo continuo empleando Eichhornia cassipes. (Tesis de maestría), Universidad Nacional Agraria de la Selva, tingo María, Perú; 2015.
 14. Cubillos, J. Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. (Tesis de maestría), Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia; 2011.
 15. Gobierno Autónomo Municipal de Villa Alcalá. (2016). Plan Territorial de Desarrollo Integral del municipio de Villa Alcalá 2016 - 2020. Bolivia: El autor.
 16. Viceministerio de Comunicación del Estado Plurinacional de Bolivia. Gobierno inaugura represa en la comunidad de Huasa Pampa, en Alcalá, Chuquisaca [Internet] La Paz, Bolivia: 2020 [Consultado 2021 Ago 10] Disponible en: <https://www.comunicacion.gob.bo/?q=20160325/20889>
 17. Arias, C. y Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 17-24.
 18. Alarcón, M., Zurita, F., Lara-Borrero, J. y Vidal, G. (2018). Humedales de tratamiento: alternativas de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina. Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.

19. Oquendo, J. Evaluación de *thypa latifolia* en la absorción de plomo y propuesta de fitorremediación de aguas residuales con metales pesados en la laguna de Yahuarcocha. (Tesis de Maestría), Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador; 2016.
20. Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R. y Olgún, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Ciencia – Academia Mexicana de Ciencias*, 55 (3), 69-83.
21. Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., y Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua.
22. Poveda, R. Evaluación de especies acuáticas flotantes para la fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola previamente caracterizadas en el Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua. (Tesis de Pregrado), Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador; 2014.
23. Arteaga, V. Propuesta de metodología para la construcción de humedales artificiales. (Tesis Doctoral), Instituto de Enseñanza e Investigación en ciencias Agrícolas, Texcoco, México; 2018.
24. Rabat, J. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. (Tesis de Maestría), Universidad de Alicante, Alicante, España; 2016.