

‘Fitodepuración de lixiviado del vertedero Municipal de Pampa Galana, Tarija - Bolivia, utilizando especies locales

Phytodepuration of leachate from the Pampa Galana Municipal landfill, Tarija - Bolivia, using local species

Díaz Álvarez Paolo Jackson & Leigue Fernández María Alejandra

Universidad Católica Boliviana San Pablo - Sede Tarija. Centro de Investigación de Ingenierías y Ciencias Exactas. Calle Colon N° 734 Zona central.

aleigue@ucb.edu.bo

Resumen: El riego con lixiviados ofrece la oportunidad de cerrar el ciclo de nutrientes y producir un efluente de calidad adecuada para su vertido. La fitodepuración ha sido identificada como solución tecnológica efectiva, con bajos costos de implementación, fácil operación y mantenimiento disponible para la remoción de contaminantes de suelos y aguas contaminadas. En este marco, se realizó una investigación a escala laboratorio en la Universidad Católica Boliviana Sede Tarija. El objetivo de la investigación: verificar la fitodepuración del lixiviado del vertedero Municipal Pampa Galana ciudad de Tarija, utilizando tres especies ornamentales: *Canna Indica*, *Zantedeschia Aethiopica*, *Pseudosasa Japonica*. La fitodepuración de lixiviados se ha realizado en macetas individuales de aproximadamente 20 litros, con flujo vertical sub-superficial, donde se plantaron las especies ornamentales en un espacio abierto; las macetas se llenaron con sustratos: 1/3 de grava y 2/3 de suelo proveniente del mismo vertedero. Durante la experimentación los prototipos fueron alimentados considerándose una dilución media del 10%, donde se ha evaluado la eficiencia de eliminación de nutrientes: Nitrógeno y Fosfatos, y Demanda Química de Oxígeno (DQO). De los resultados, la especie *Canna Indica* mostró mejores rendimientos, obteniendo altos porcentajes de remoción: DQO (η hasta 80%), fosfatos ($\eta > 70\%$) y nitrógeno ($\eta > 98\%$). En términos generales, los resultados de todas las especies confirman la viabilidad del uso de diferentes especies en la fitodepuración de lixiviados de rellenos sanitarios. El riego con lixiviados diluidos tampoco afectó al crecimiento de las especies; las plantas regadas con el lixiviado diluido desarrollaron mayor biomasa que las plantas de control.

Palabras clave: fitodepuración, lixiviados de vertederos, humedales artificiales, nutrientes.

Abstract : Leachate irrigation offers the opportunity to close the nutrient cycle and produce an effluent of suitable quality for discharge. Phytodepuration has been identified as an effective technological solution, with low implementation costs, easy operation and available maintenance for the removal of pollutants from

contaminated soils and water. Within this framework, laboratory-scale research was carried out at the Bolivian Catholic University, Tarija Campus. The objective of the research: to verify the phytodepuration of leachate from the Pampa Galana Municipal Landfill in the city of Tarija, using three ornamental species: *Canna Indica*, *Zantedeschia Aethiopica*, and *Pseudosasa Japonica*. The phytodepuration of leachates was carried out in individual pots of approximately 20 liters, with vertical subsurface flow, where the ornamental species were planted in an open space; the pots were filled with substrates: 1/3 gravel and 2/3 soil from the same landfill. During the experimentation, the prototypes were fed considering an average dilution of 10%, where the efficiency of nutrient elimination was evaluated: Nitrogen and Phosphorus, and Chemical Oxygen Demand (COD). From the results, the *Canna Indica* species showed better performances, obtaining high removal percentages: COD (η up to 80%), phosphates ($\eta > 70\%$) and nitrogen ($\eta > 98\%$). In general terms, the results for all species confirm the feasibility of using different species in the phytodepuration of landfill leachate. Irrigation with diluted leachate also did not affect species growth; plants irrigated with diluted leachate developed higher biomass than control plants.

Keywords: phytodepuration, landfill leachate, constructed wetlands, nutrients.

1 Introducción

Las actividades de investigación relacionadas con métodos de tratamiento sostenible siguen siendo de gran interés para los científicos e ingenieros, especialmente en la gestión de los residuos (sean líquidos, sólidos o gaseosos). En cuanto al riego de terrenos por lixiviación, éste nos brinda la oportunidad de cerrar el ciclo de nutrientes y al mismo tiempo, producir un efluente de una calidad adecuada para el vertido de acuerdo con lo permisible en norma. (1) Los vertederos de residuos ocupan bastante volumen y superficie y en dicha superficie no es posible hacer crecer especies para uso no alimentario.

El tratamiento de lixiviados de vertedero requiere tratamientos muy costosos por las tecnologías avanzadas que se presentan en el mercado, y se debe a la alta concentración de sus contaminantes, pero sobre todo a los cambios cualitativos que sufre el lixiviado a lo largo del tiempo durante las fases de gestión del vertedero (2).

Muchos expertos coinciden en que el tratamiento de lixiviados requiere un método de bajo costo y ambientalmente seguro, siendo el más recomendable el tratamiento in situ utilizando la tecnología verde como parte de la solución sostenible para los vertederos, evitando el transporte que puede ser peligroso y costoso (3).

1.1 Planteamiento del problema

El actual vertedero de Pampa Galana funciona desde el año 1995, siendo el municipio de la ciudad de Tarija el encargado de las gestiones de funcionamiento y

ampliación de éste. Para el almacenamiento de los lixiviados producidos en el relleno sanitario, se construyó una piscina que cuenta con una base de geo-membrana impermeable y cercada con malla olímpica, pero que no está en funcionamiento, ya que falta la instalación de drenaje. Dicho vertedero fue diseñado con un periodo de uso para veinte años y hasta la actualidad no se aplicado ningún plan de cierre.

Uno de los problemas más sobresalientes y de mayor preocupación que presenta el vertedero de Pampa Galana, es la falta de un sistema de tratamiento de lixiviados y por ende un post-tratamiento, ya que, de no efectuarse dicho tratamiento, estos residuos líquidos se convierten en una amenaza para el medio ambiente, contaminando el suelo, los cuerpos de agua superficiales y hasta los cuerpos de agua subterránea por la infiltración.

En este marco, se realizó una investigación a escala laboratorio en la Universidad Católica Boliviana - Sede Tarija tratando de combinar un proceso de tratamiento de lixiviados naturales con el uso de especies de la región. La investigación se desarrolló con los lixiviados provenientes del vertedero de Pampa Galana, ubicación: figura 1, sitio en actual funcionamiento; en el que no ha sido posible diferenciar la parte antigua de la más actual, ya que el lixiviado llega a un solo sector, una piscina.

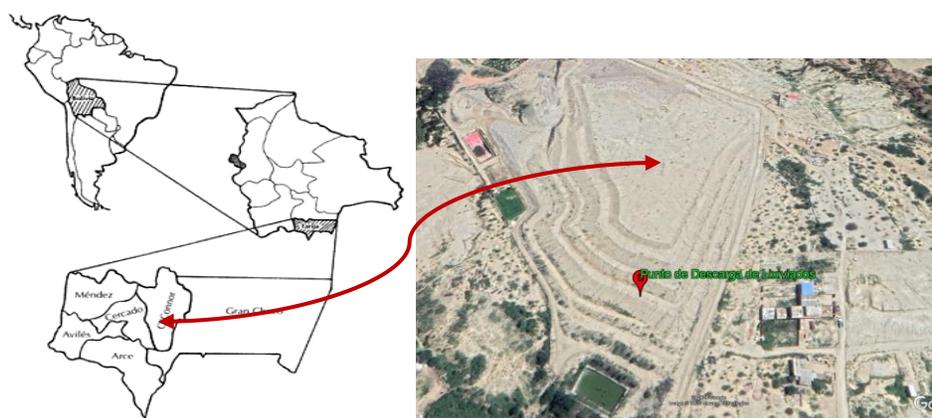


Figura 1: Mapa del sitio. Google earth

1.2 Objetivo

La investigación tuvo por objetivo la fitorremediación de los lixiviados utilizando especies de la región: *Canna Índica* (achira), *Zantedeschia aethiopica* (cartucho) y *Pseudosasa Japónica* (caña bambú), conocidas por su capacidad de adaptabilidad a condiciones extremas y grado de adaptación a las condiciones edáficas y climáticas locales.

2 Fundamentación Teórica

2.1 La fitodepuración

La fitodepuración consiste en el uso de especies vegetales para contener, remover o neutralizar compuestos orgánicos, metales pesados o radionucleidos. Aunque todavía se encuentra en desarrollo, constituye una estrategia muy interesante, debido a la capacidad que tienen algunas especies vegetales de absorber, acumular y/o tolerar altas concentraciones de contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos y radioactivos, etc. (4)

Tomando en cuenta la planta y el agente contaminante, la fitodepuración puede producirse por:

- Acumulación del contaminante en las partes aéreas de la planta.
- Absorción, precipitación y concentración del contaminante en raíces.
- Reducción de la movilidad del contaminante para impedir la contaminación de aguas subterráneas o del aire.
- Desarrollo de bacterias y hongos que crecen en las raíces y degradan contaminantes.
- Captación y modificación del contaminante para luego liberarlo a la atmósfera con la transpiración.
- Captación y degradación del contaminante a compuestos menos tóxicos. (por ej. pesticidas, herbicidas, TNT, etc.).

La fitodepuración se caracteriza por los tratamientos de tipo biológico, en los que las plantas que crecen en un suelo saturado con agua desarrollan un papel clave para la acción directa de las bacterias que colonizan el sistema de la raíz y rizoma. La fitodepuración se aplica mejor en sitios susceptibles a contaminación superficial de compuestos orgánicos, contaminantes metálicos, entre otros. (4)

Se pueden identificar los siguientes procesos de la fitodepuración (ver figura 2):

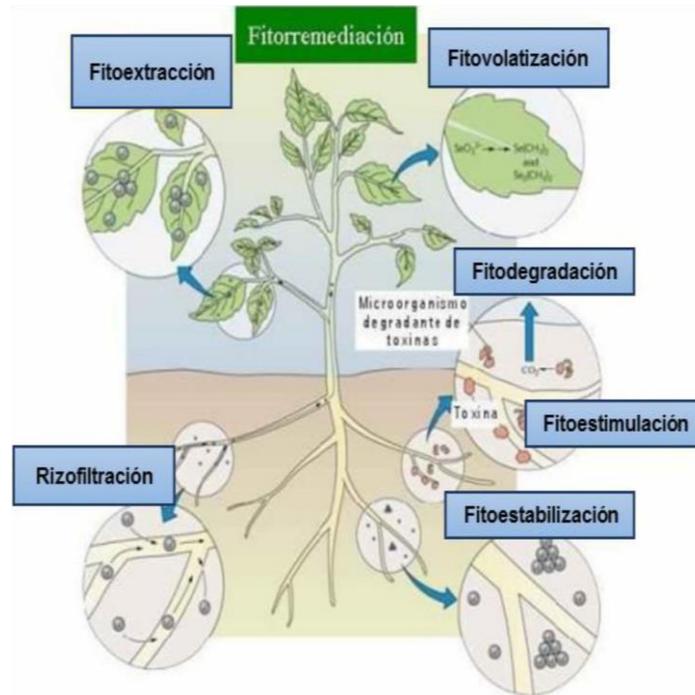


Figura 2: Principales procesos de la fitodepuración (4).

Fitoextracción: Se refiere a la captación de compuestos orgánicos, nutrientes u otros compuestos como metales pesados y su utilización para el desarrollo de una nueva biomasa, o el secuestro en las raíces y/o en la parte aérea – acumulación. (2)

Rizofiltración: Esta técnica explota plantas terrestres o acuáticas para adsorber, concentrar y precipitar en las raíces de las sustancias contaminadas presentes en corrientes de agua que se caracterizan por un bajo nivel de contaminación, las plantas tienen la capacidad de liberar radicales en la rizosfera exudada que favorecen la precipitación de muchos metales; los contaminantes inmovilizados o acumulados en las plantas o cerca de ellos se eliminan con la recolección de plantas.

Fitoestabilización: Se refiere a la inmovilización de los contaminantes en la zona radicular. Las plantas deben liberar en la rizosfera radicales exudados que potencian la precipitación de algunos compuestos como los metales pesados.

Fitolatización: Se refiere a la absorción de contaminantes de suelo y su liberación a la atmósfera en forma de compuestos volátiles, es especialmente eficaz con los contaminantes como mercurio y selenio.

Fitodegradación: llamada a menudo rizodegradación, se refiere al proceso de eliminación de contaminantes debido a la degradación directa de los tejidos biológicos de las raíces o en asociación con los microorganismos que viven en simbiosis en al rizosfera.

Una desventaja importante de la fitodepuración es que requiere un compromiso a largo plazo, como el proceso mismo que depende de la capacidad de una planta para crecer y prosperar en un entorno que no es ideal para el crecimiento normal de la planta. La fitodepuración se puede aplicar siempre que sea el suelo o el medio ambiente estático del agua se ha contaminado o está sufriendo de contaminación; esto se refiere a la capacidad natural de ciertas plantas llamadas hiperacumuladoras o de bioacumulación, estas se encargan de degradar, o hacer inofensivos los contaminantes en suelos, agua o aire. (3)

2.2 Los humedales artificiales

La importancia de los humedales naturales radica tanto en sus singularidades biológicas (vegetación y fauna especializada) como en las funciones que desempeñan en el ciclo del agua y de la materia orgánica, reciclado de nutrientes, mantenimiento de redes tróficas y estabilización de sedimentos. Tienen un importante papel como 'depuradoras' naturales, contribuyendo al mantenimiento de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales, de ahí derivan los denominados sistemas blandos de depuración de aguas residuales (lagunaje y humedales artificiales), que son sistemas desarrollados por el hombre en los que se imita la dinámica depuradora de las humedades naturales, pero con una mayor velocidad que la que se produce estos últimos. (5)

La fitodepuración se realiza en humedales artificiales, sistemas que como ya se mencionó, reproducen las condiciones existentes en las zonas húmedas naturales, consiste en un mono o polí cultivo de plantas macrofitas dispuestas en sitios pocos profundos. La depuración de contaminantes ocurre a través de varios procesos físico-químicos y bacteriológicos, el oxígeno necesario para estos procesos es suministrado por las propias plantas que forman por fotosíntesis o toman del aire e inyectan a la zona radicular (4)

Los humedales artificiales tienen usos variados, pudiendo nombrar entre otros, la depuración de drenaje de minas, los tratamientos de escorrentía pluvial, urbana y agrícola, el tratamiento de lodos y lixiviados de vertederos (5)

Los humedales artificiales son una alternativa de tipo natural propuesta para el tratamiento de lixiviados, que presenta facilidad y bajos costos de operación y mantenimiento, además de bajo consumo de energía, adaptables a diferentes niveles

de tratamiento. Presentan remociones de materia orgánica aproximadamente del 27-98% y del 11-96%, medida con DBO5 y DQO, respectivamente. Los valores fluctúan dependiendo del tipo de humedal utilizado, de las configuraciones del sistema de tratamiento y de las condiciones climáticas (6)

Los humedales artificiales se clasifican de acuerdo con el tipo de flujo: flujo superficial y flujo sub-superficial. La mayoría de los humedales de flujo sub-superficial emplean grava como medio para apoyar el crecimiento de las plantas y el agua de riego puede fluir vertical u horizontalmente (figura 3) a través del sustrato donde entra en contacto con los microorganismos que viven en las superficies de las raíces de las plantas y el sustrato, lo que permite la eliminación de contaminantes desde la línea base.

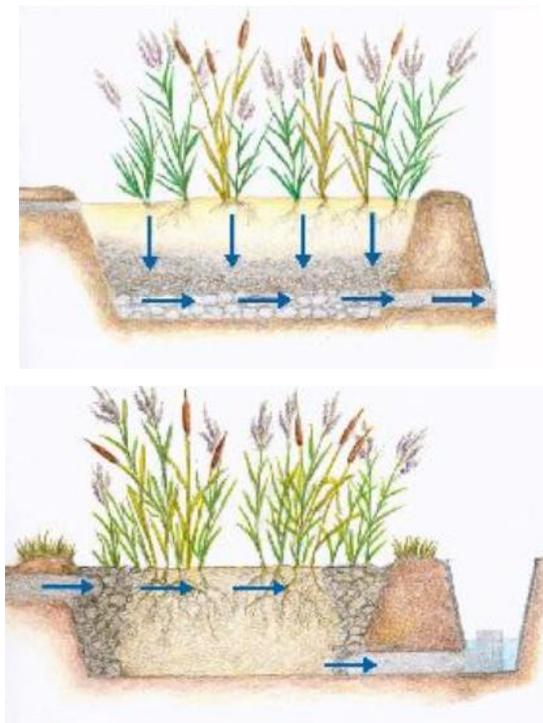


Figura 3: Humedal Sub-superficial de Flujo Vertical & Humedal Sub-superficial de Flujo Horizontal.

2.3 Los lixiviados de rellenos sanitarios o vertederos

Los lixiviados de vertedero se puede definir como el líquido producido a partir de la descomposición de la materia orgánica de los residuos y la infiltración de agua

de lluvia en un vertedero. La generación de lixiviado es una combinación compleja de procesos biológicos físicos, químicos, y en el que la edad de los residuos tiene impacto en el rendimiento de los vertederos que generan lixiviados. Los lixiviados varían de un vertedero a otro, y en el espacio y en el tiempo, con fluctuaciones que dependen de períodos cortos y largos debido a las variaciones en el clima, hidrogeología y composición de los residuos. En vertederos jóvenes, que contienen grandes cantidades de materia orgánica biodegradable, en la fase acidogénica se lleva a cabo una fermentación anaeróbica rápida, lo que resulta en ácidos grasos volátiles. En vertederos maduros, se produce la fase metanogénica; significa que los microorganismos metanogénicos desarrollan en los residuos, y los ácidos grasos volátiles se convierten en biogás (CH_4 , CO_2); la fracción orgánica en el lixiviado es dominada por los compuestos no biodegradables, tales como las sustancias húmicas (3).

La composición de los lixiviados de un vertedero es compleja y altamente contaminada; la contaminación es el resultado de procesos biológicos, físicos y químicos que tienen lugar en todo el interior de los vertederos, junto con la composición de los residuos y el régimen de agua de vertedero (Leigue, 2014). Debido a las condiciones anaeróbicas y largo tiempo de retención que prevalecen en los rellenos sanitarios, los lixiviados poseen altas concentraciones de amoníaco y compuestos orgánicos contaminantes, medidos en términos de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno demanda (DBO), hidrocarburos halogenados y metales pesados. Además, el lixiviado contiene normalmente altas concentraciones de sales inorgánicas (principalmente cloruro de sodio, carbonato y sulfato) (4).

Los lixiviados de los rellenos sanitarios y/o vertederos tiene típicamente valores altos de sólidos totales disueltos y demanda química de oxígeno, y un valor de pH que va de ligeramente baja a moderadamente. Contienen componentes peligrosos, tales como compuestos orgánicos volátiles y metales pesados. Como ya se indicó, hay muchos factores que afectan a la calidad de dicho lixiviado: la edad, la precipitación, la variación estacional del tiempo, el tipo de residuos y la composición; pero en particular, la composición de los lixiviados de vertedero varía mucho dependiendo de la edad del vertedero (7).

En la tabla 1 se muestra la composición típica de los lixiviados, de diferentes autores.

Tabla 1. Composición Típica de los Lixiviados (3)

Parámetros (mg/L) excepto pH	Lee y Jones, 1991	Renou et al. 2008	Oman, Junestedt, 2008	Kejledsen, 2010
pH	-	5.08-8.05	6.04-8.05	4.5-9
Alcalinidad	-	-	-	2500-35000
Calcio	240-2330	-	-	10-7200
Cloruro	47-2400	-	360-4900	150-4500
Magnesio	4-780	-	-	30-15000
Sulfato	20-730	-	20-130	8-7750
Sólidos	1-20000	1666	8.7-2100	-
suspendidos	0.1-1	2.7-76	-	3-5500
Hierro	2.6-945	0.2-13000	54-287	14-2500
Nitrógeno total	-	-	0.13-4	0.1-2.3
Fosforo total	28-1700	-	-	50-3700
Potasio	0.5-1	-	-	0.02-1.5
Cromo	100-51000	100-79000	4-110	140-152000
DQO	1000-30300	1200-4000	250-1300	20-57000
DBO				

Muchos expertos coinciden en que el tratamiento de lixiviados requiere un método de bajo costo y ambientalmente seguro, siendo el más recomendable el tratamiento in situ utilizando la tecnología verde como parte de la solución sostenible para los vertederos, evitando el transporte que puede ser peligroso y costos (3)

2.4 La fitodepuración en rellenos sanitarios

La fitodepuración es una posibilidad de prioridad el desarrollo de la gestión económica y ambientalmente sostenible de los residuos y sitios contaminados, que está siendo de interés en los últimos años, la purificación de la tierra a partir de sustancias contaminantes, al tiempo que conserva un estado de buena calidad para el cultivo agrícola, mediante el uso de un suelo-sistema de la planta.

A pesar de los diferentes puntos de vista sobre el tratamiento de lixiviados, muchos expertos coinciden en que se necesita instalación de tratamiento en el lugar que requiere poco mantenimiento o que sea económicamente menos exigente. Un método de bajo costo es el tratamiento in situ utilizando la tecnología verde como parte de la solución sostenible para los vertederos. Los sistemas de fitodepuración utilizan el potencial del sistema de suelo-planta natural o de gestión activa para

desintoxicar, degradar e inmovilizar elementos potencialmente tóxicos en el lixiviado (3).

El éxito de la fitodepuración depende del crecimiento de las plantas, requiere más tiempo para fitorremediar un sitio cuando se compara con las tecnologías de limpieza convencionales, pero no se puede aplicar en sitios que implican un grave peligro para los receptores ecológicos humanos y otros. Las altas concentraciones de contaminantes o tóxicos pueden inhibir el crecimiento de plantas y por lo tanto limitar la aplicación en algunos sitios.

2.5 Especies vegetales utilizadas en fitodepuración

Las plantas se alimentan de los nutrientes que hay en las aguas bajo tratamiento, evaporan y transpiran agua al realizar sus funciones, así como por sus raíces inyectan oxígeno al agua. Es muy importante implementar especies vegetales que logren vivir en agua más que en tierra (plantas macrófitas), para que realicen mejor su función limpiadora. (8)

Generalmente las macrófitas son el tipo de planta más utilizada, por sus características acuáticas y alta resistencia. Las plantas emergentes aportan significativamente al tratamiento de las aguas residuales por medio de la estabilización, reducción de la velocidad del agua, captación de nutrientes por medio de raíces y la incorporación de estos a los tejidos de la planta, transferencia de gases a la atmósfera a través de la evapotranspiración, además, su tallo y raíces proporcionan capacidad de fijación microbiana.

Existen varias especies que se utilizan en el tratamiento de aguas y que son reconocidas por los elevados porcentajes de remoción que obtienen en una variada gama de sustancias. Se conocen alrededor de 400 especies de plantas con capacidad para hiperacumular contaminantes. Plantas comunes que se han ensayado como posibles especies fitodepuradoras son el girasol, la alfalfa, la mostaza, el cartucho, la calabaza, el esparto, el sauce, el bambú, la achira y la totora entre otros. Incluso existen especies vegetales capaces de eliminar la alta salinidad del suelo, gracias a su capacidad para acumular el cloruro de sodio (9)

2.6 El Sustrato.

El sustrato es el principal material de apoyo para el crecimiento vegetal y la película microbiana, además que debe retener agua y nutrientes con un buen equilibrio entre macroporosidad para la circulación de aire y el desarrollo de las raíces evitando el agua estancada, y microporosidad para una adecuada retención de agua, que debe estar disponible para el crecimiento de las plantas. Por otra parte, la matriz del suelo tiene una influencia decisiva en los procesos hidráulicos. La rizosfera

también debe permitir la vida de los microorganismos útiles para la planta, capaz de proporcionar los nutrientes, como también para facilitar los procesos de eliminación útiles para la fitorremediación del proceso. Tanto la composición química y parámetros físicos como la distribución de tamaño de grano, los espacios de poros intersticiales, de tamaño de grano eficaz, grados de irregularidad y el coeficiente de permeabilidad, son todos factores importantes que influyen en el sistema de biotratamiento (1) (3).

En los humedales, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 3-5 mm aproximadamente y con pocos finos (8).

3 Materiales y Métodos

Las pruebas experimentales han sido realizadas en los predios de la Universidad Católica Boliviana (UCB) – Sede Tarija, y los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos se realizaron en el Laboratorio de Servicios Ambientales -SA Labs de dicha institución.

3.1 El lixiviado

La extracción de la muestra del lixiviado se realizó de la única descarga puntual de residuos líquidos del área de disposición final del relleno sanitario de Pampa Galana, muestreo que se ejecutó siguiendo las recomendaciones de la guía para toma de muestras de aguas residuales del ministerio de medio ambiente y agua (MMAYA).

La composición del lixiviado de Pampa Galana, se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Caracterización inicial de lixiviados del vertedero de Pampa Galana

Parámetro	Unidad	Valor
pH	-	8,17 ±0.2
DQO	mg/l	9810 ±640
DBO5	mg/l	2845 ±220
N total	mg/l	3970 ±350
TKN	mg/l	3740 ±280
N-NO ₃	mg/l	223 ±48

PO_4^{3-}P	mg/l	153 ±22
SO_4^{2-}	mg/l	1261 ±140

Dicha tabla indica que los resultados de carga orgánica de los lixiviados del relleno sanitario de Pampa Galana son elevados, por lo que se aproximan a los valores más altos de una composición típica de lixiviados de rellenos sanitarios.

3.1.1 Características cualitativas del lixiviado recolectado:

- Color: Gris oscuro (ver Figura 4)
- Olor: sulfúrico desagradable



Figura 4: Muestra diluida (izquierda) - concentrada (derecha).

Nitrógeno total Kjeldhal TKN fue el parámetro de referencia para organizar la dosificación de lixiviado para cada período de investigación, se analizó el agua de alimentación en cada período de riego. De los resultados que indica en la tabla 2, se decidió realizar una dilución promedio de la muestra del lixiviado, alrededor del 10% del total expresado en volumen/volumen.

3.2 Especies utilizadas para la fitodepuración

En la presente investigación, se utilizaron tres tipos de especies: La *Canna indica* (achira), la *Zantedeschia aethiopica* (el cartucho) y la *Pseudosasa japónica* (caña bambú). Estas especies se adquieren con facilidad en diversos espacios naturales como ser quebradas, ríos parques, jardines o en zonas alejadas de la ciudad de Tarija.

Tabla 3. Características de las especies vegetales utilizadas

Especie	Características	Imagen
<i>Canna Índica</i> – Achira	Son plantas tropicales y subtropicales nativas de América que se caracterizan por sus hojas dísticas, sus flores con un estambre petaloide con una sola teca y sus estaminodios que parecen pétalos	
<i>Zantedeschia aethiopica</i> – Cartucho.	Especie herbácea perenne de entre 60 a 100 cm de altura. Posee un rizoma oblongo y grueso del que surgen raíces de hasta 15 cm de largo. Produce numerosas hojas de color verde brillante basales, sagitadas y largamente pecioladas.	
<i>Pseudosasa Japonica</i> - Caña Bambú.	El bambú crece mejor en clima tropical o subtropical, sin embargo, hay especies que toleran hasta -25° C como y puede crecer en ecosistemas andinos. Los brotes se desarrollan desde el rizoma y pueden permanecer bajo tierra por varios años. Se desarrollan con enorme velocidad: en 20 - 30 días.	

3.3 Sustrato

El vertedero de Pampa Galana tiene un suelo clasificación AASTHO A-6 que equivale a la categoría CL en la clasificación unificada, lo que significa que es un suelo arcilloso de baja plasticidad, suelo que pertenece al grupo limo arcilloso, sus principales características indican que es un suelo de mediana compresión, presenta grandes cambios de volumen cuando absorben agua, con permeabilidad regular a bueno cuando seco y mala en presencia de humedad. En época de lluvias presenta viscosidad y cuando se humedece o se seca inmediatamente sufre hinchamiento y contracciones perjudiciales (10).

Para hacer efectiva la fitodepuración de lixiviados del vertedero, se han armado macetas individuales de polietileno de alta densidad, de aproximadamente 20 litros; a estos maceteros se le adicionó una manguera conectada a un orificio ubicado en la parte lateral inferior de la maceta, con la cual se realizó el control del efluente del biofiltro. Los prototipos de biofiltros reflejan el tipo de flujo vertical sub-superficial, como se ilustra en la figura 5.

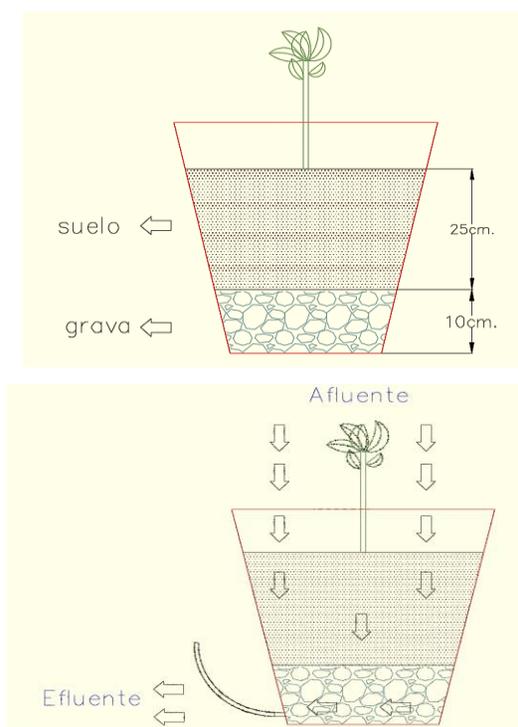


Figura 5: Prototipo y funcionamiento del proceso

Posterior a la preparación de los prototipos, se procedió al armado del lecho filtrante, que está compuesto de grava de entre 2 y 3 pulgadas, colocada en la parte inferior de la maceta a una altura aproximada de 10 cm y de suelo extraído del vertedero (sustrato) con una altura promedio de 25 cm, ver Figura 5.

Finalmente se plantaron las tres especies elegidas, una en cada macetero, y todos ellos se colocaron en un espacio abierto dentro de los predios de la UCB.

Se instalaron un total de seis plantas en cada macetero, las cuales recibieron una codificación, para poder realizar el control correspondiente, la misma que se indica en la tabla 4.

Tabla 4. Principales características de irrigación durante el periodo experimental

Especie	Cantidad	Código	Concentración al ingreso			
			Lixiviado %	TKN mg/L	DQO mg/L	PO ₄ ³⁻ P mg/L
<i>Canna Índica</i>	2	ACH-0	0%			
		ACH-1	10%	374	981	15,16
<i>Zantedeschia aethiopica</i>	2	CA-0	0%			
		CA-1	10%	374	981	15,16
<i>Pseudosasa Japónica</i>	2	BA-0	0%			
		BA-1	10%	374	981	15,16

El periodo de experimentación tuvo una duración de 60 días, considerando que al inicio se ha considerado un periodo previo de adaptación de las especies de 15 días, en los que todas las especies recibieron alimentación de agua de grifo.

Puesto que uno de los objetivos de la investigación era comprender la capacidad de las plantas para tratar las aguas residuales de alta concentración de amoníaco, el programa de investigación se organizó para mantener el porcentaje de alimentación. Por otro lado, la necesidad de agua ha sido variada en función al crecimiento de las plantas, debido a la evapotranspiración, y el volumen de agua alimentada fue cambiando dentro de cada período de investigación. Como consecuencia, la carga de alimentación de los diferentes contaminantes (COD, N, P) fueron variantes durante todo el período de investigación.

El régimen de alimentación del proceso fue de 1 L/día aproximadamente, la variación dependía un poco del tipo de especie. El tiempo de retención recomendado en la guía técnica de diseño de proyectos agua y saneamiento con tecnologías alternativas del MMAYA es de 7-10 días para remoción de DQO y nitrógeno de aguas domésticas y comparando con otras investigaciones de tratamiento de lixiviado se ha decidido mantener un tiempo de retención hidráulico de 14 días dadas las condiciones propias del lixiviado y del sustrato utilizado.

Al término de cada tiempo de retención se procedió a la recolección del efluente para la realización de los análisis en función a los parámetros inicialmente caracterizados.

Para calcular las eficiencias de remoción de los biofiltros a evaluar se utilizó la siguiente expresión matemática:

$$\eta = \frac{[C_{in} * V_{in} - C_{ef} * V_{ef}]}{C_{in} * V_{in}} * 100 \quad (1)$$

Dónde:

C_{in} , C_{ef} = concentración del contaminante en el flujo de entrada y salida (mg/l)

V_{in} , V_{ef} = volumen de entrada y salida (L/fase por cada maceta)

La eficiencia de remoción se calculará en base a la carga orgánica aplicada durante el periodo de alimentación.

Para evaluar el desarrollo de las especies vegetales se realizaron monitoreos periódicos en todas las unidades. De esta manera se controlaron las etapas de crecimiento (emisión de brote, crecimiento y la extensión).

Durante la primera etapa se pudo observar el rebrote de las especies y su comportamiento a la alimentación con lixiviado. Durante esta fase, la temperatura fue variada. La temperatura más baja registrada fue de 1.4 °C y la máxima fue de 29.4 °C, según datos del SENAMHI (11)

En la segunda etapa se observó un incremento significativo, y el despliegue de las primeras hojas de las especies vegetales, también se registraron nuevos rebrotes en las diferentes unidades.

En la tercera etapa, debido al cambio estacional y el aumento de temperaturas se fueron presentado pequeños marchitamientos en algunas hojas de las diferentes especies vegetales por lo que se optó por poner una malla de media sombra por encima del ambiente donde se encontraban los biofiltros, con la que se pudo controlar el marchitamiento de las especies vegetales y de esta forma se pudo concluir con la experimentación en esta última fase.

Así mismo, se pudo observar que una de las especies llegó a floración antes que el blanco, además de tener longitudes más pronunciadas. También se pudo observar la formación de biopelícula en la superficie del biofiltro.

3.4 Análisis

La eficiencia de la investigación fue evaluada midiendo parámetros orgánicos e inorgánicos. El análisis del afluente y de las muestras de efluentes se realizó de acuerdo con los estándares nacionales de muestras de agua y aguas residuales y los métodos aprobados por la EPA, efectuado en el SA Labs de la UCB Sede Tarija; el pH se midió con un pHmetro Método Hach 8156, la DQO fue evaluada mediante una prueba de DBO durante 5 días en un respirómetro Método Hach 8043, el TKN, N total y $\text{NO}_3 - \text{NO}_2$ Método Hach 10208 y el fosfato, Método Hach 8048 y sulfatos. En la tabla 2 se indicaron los resultados de la caracterización inicial de los lixiviados.

4 Resultados y discusión

4.1 Crecimiento vegetativo

Los resultados del control cualitativo de cada una de las especies del periodo experimental se indican a continuación en la Figura 6

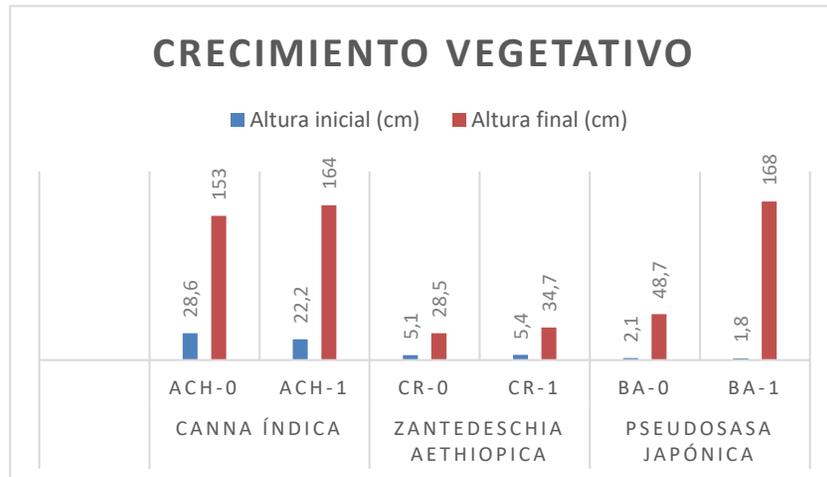


Figura 6: Control cualitativo de las especies inicial.

Durante el periodo de riego se detectaron signos ocasionales de estrés de las plantas, desecación de hojas por el cambio de estación y por ende de los cambios de temperatura. Al final de la fase experimental se analizó el crecimiento y brote de las especies para evaluarlas con relación a su control cero. En general, las plantas tuvieron un desarrollo normal en sus distintas fases, tal como se aprecia en la Figura 7.

En síntesis, los cultivos alimentados con lixiviados desarrollaron mayor biomasa que los controles correspondientes, siendo más notoria la diferencia con la *Pseudosasa Japónica* (BA-1) seguida de la *Canna Índica* (ACH-1) en menor proporción la *Zantedeschia Aethiopica* (CR-1).



Figura 7: Crecimiento por fases de la Canna Índica (ACH-1) en sus distintas fases.

4.2 Tratamiento del lixiviado

De acuerdo con la caracterización inicial se han definido como parámetros de control durante la experimentación los siguientes componentes: Materia orgánica expresada en DQO, nutrientes: Nitrógeno y Fósforo.

4.2.1 Remoción de DQO

La remoción estuvo en el rango de 80%, a través del periodo de riego e independientemente del tipo de sustrato. Los resultados obtenidos durante la fase de experimentación, afluente y efluente de los parámetros analizado se detallan a continuación en la Figura 8:

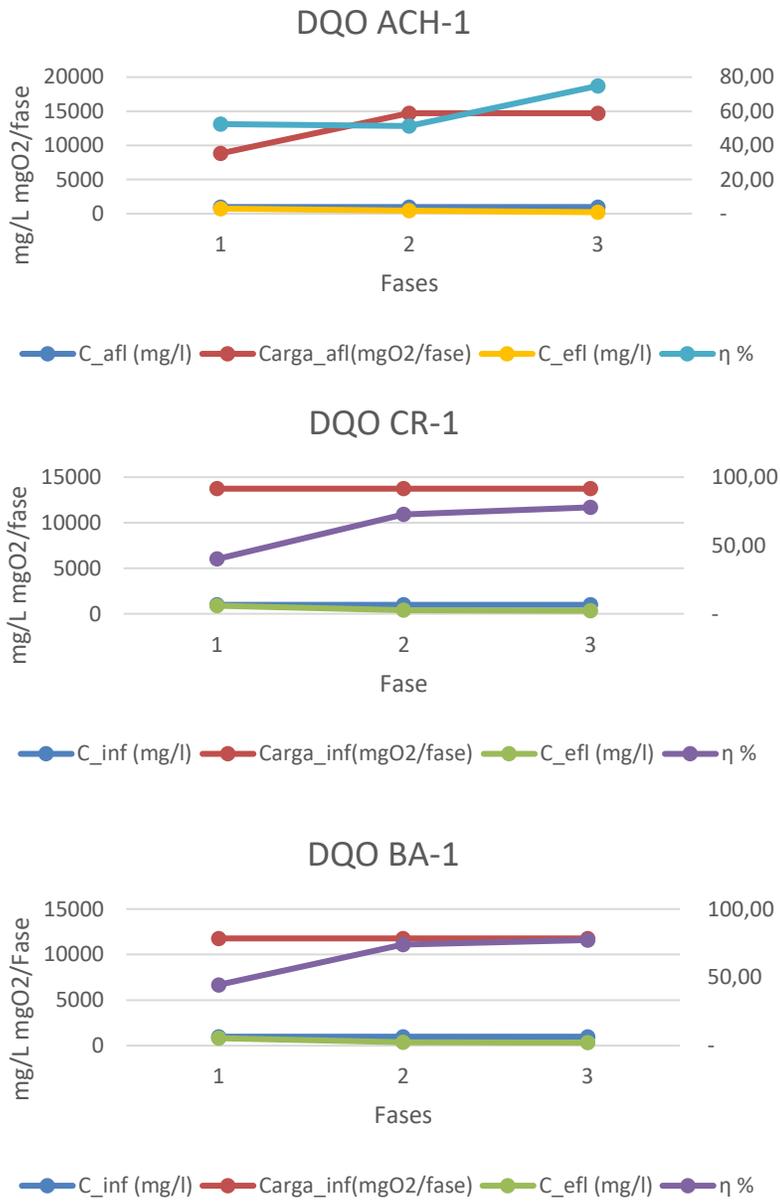
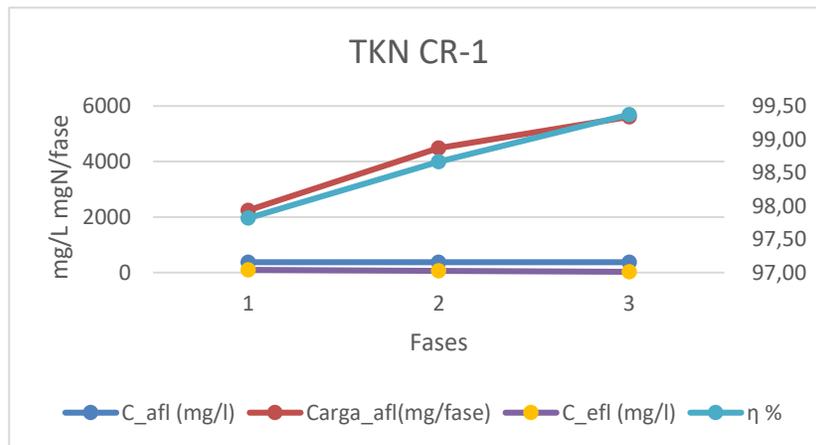
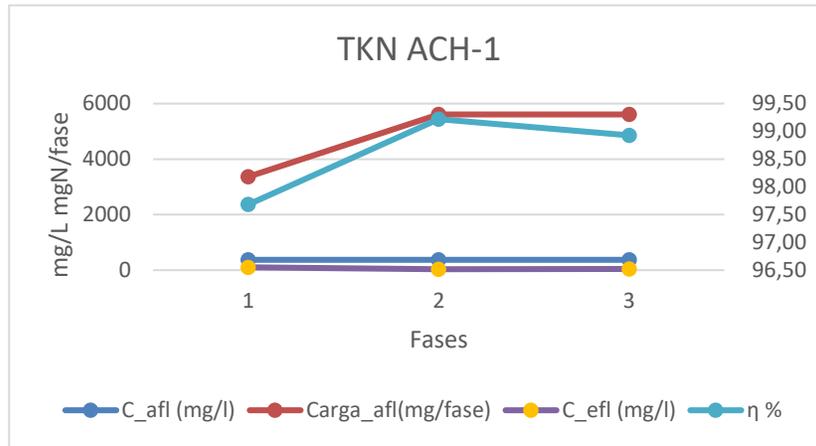


Figura 8: Concentración de entrada y salida de DQO (mgO₂/l), carga de entrada de DQO (mgO₂/fase) y eficiencia de remoción de QDO (η%).

4.2.2 Remoción de Nitrógeno:

La remoción estuvo por encima del 98%, a través del periodo de riego e independientemente del tipo de sustrato. Los resultados obtenidos durante la fase de experimentación, afluente y efluente de los parámetros analizado se detallan a continuación en la Figura 9:



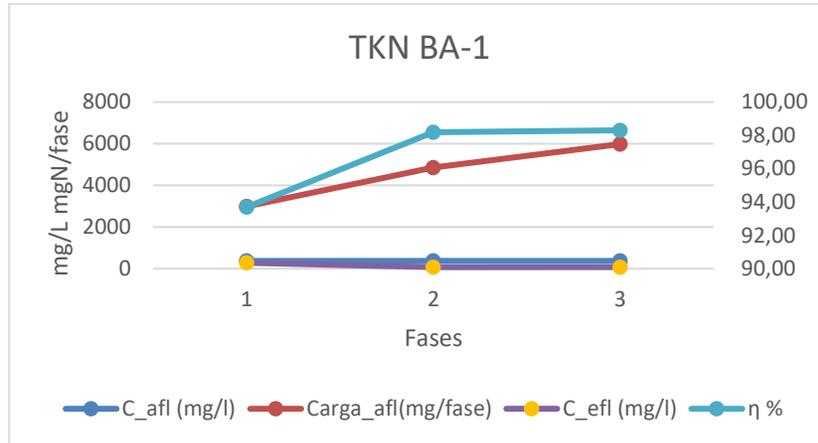
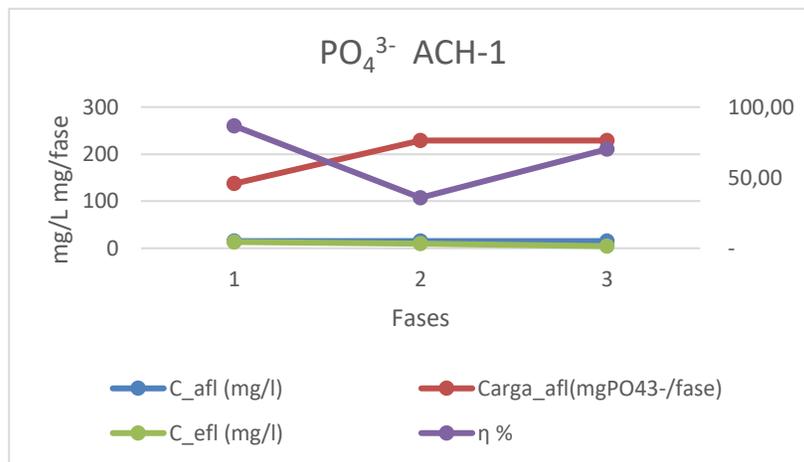


Figura 9: Concentración de entrada y salida de N (mgN/L), carga de entrada de N (mgN/fase) y eficiencia de remoción de N (η%).

4.2.3 Remoción de Fósforo:

La remoción estuvo en un amplio rango del 20% al 80% a través del periodo de riego e independientemente del tipo de sustrato. Los resultados obtenidos durante la fase de experimentación, afluente y efluente de los parámetros analizado se detallan a continuación en la Figura 10:



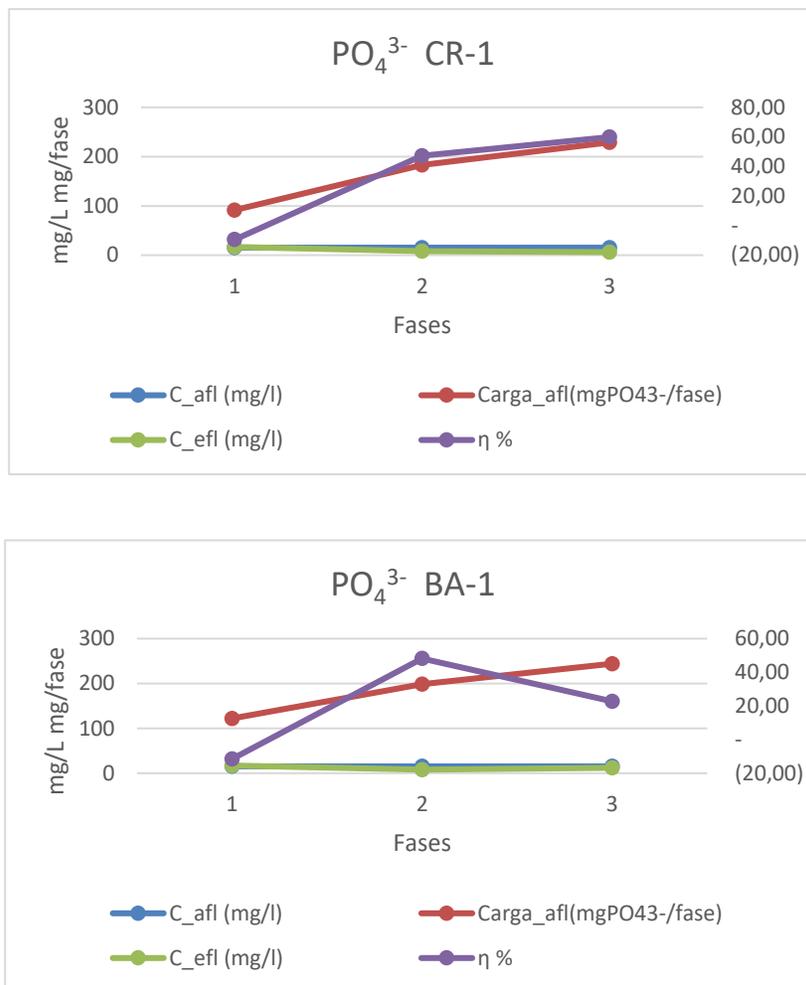


Figura 10: Concentración de entrada y salida de P ($\text{mgPO}_4^{3-}/\text{L}$), carga de entrada de P ($\text{mgPO}_4^{3-}/\text{fase}$) y eficiencia de remoción de PO_4^{3-} ($\eta\%$)

4.3 Evolución Cualitativa del Muestreo

Las muestras por fases F1, F2 y F3 representan a los lixiviados tratados durante la experimentación (a cielo abierto) de la especie *Canna Indica*, las cuales mostraron una clara diferencia de calidad, ver Figura 11. Lo que representa el buen rendimiento del proceso en este ambiente, pese a factores externos y climáticos que podrían afectar en cierta medida los resultados.

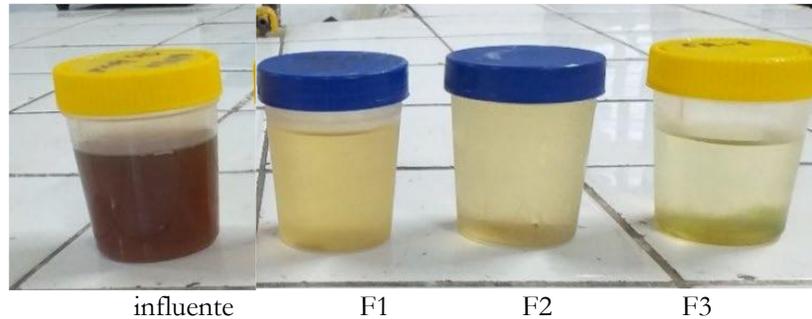


Figura 11: Evolución del agua de muestreo.

5 Conclusiones

La investigación demostró la capacidad de las especies de la región, al ser irrigadas con lixiviados del vertedero de Pampa Galana, lo que garantiza altas tasas de remoción de contaminantes considerando las condiciones operativas.

Los parámetros físicos y químicos que fueron monitoreados durante la experimentación se seleccionaron en base a la disponibilidad de equipos e insumos de laboratorio. Nutrientes: nitrógeno y fósforo, y materia orgánica son los principales contaminantes presentes en los lixiviados, como también son nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal.

Con los resultados en laboratorio, se pudo demostrar la depuración de contaminantes puntuales como el nitrógeno, fosfatos, DQO presentes en los lixiviados, obteniendo valores porcentuales desde el 70% de remoción para fosfatos, 80% en materia orgánica y 98% de remoción en caso de nitrógeno.

La carencia de condiciones del suelo del vertedero de Pampa Galana ha sido un factor limitante de la fase experimental, al tratarse de un suelo arcilloso y árido, afectó al flujo hidráulico del medio filtrante de las distintas unidades, siendo un sustrato malo para la plantación de especies de cualquier tipo.

La especie *Canna Índica* (achira), fue la que obtuvo mejores resultados durante la experimentación, obteniendo tasas de eficiencia de remoción de contaminante de alrededor de los 83.5 % en DQO; 72.5% en fosfatos, 98.3% en nitrógeno.

En general, el crecimiento de las plantas no se vio afectado negativamente por el riego de lixiviados; es más, las plantas irrigadas con lixiviado desarrollaron biomasa más alta que las plantas de control, esto se notó en mayor grado en la *Pseudosasa Japónica* (caña bambú, BA-1).

Referencias bibliográficas

- [1] Jones, D.L., Williamson, A.G. y Owen, A.G. (2006) *Phytoremediation of Landfill Leachate*. Waste Management, 26(8), 825-837.
- [2] Garbo, F. (2018) *Fitotratamiento de aguas residuales contaminadas con cultivos energéticos*. Universidad de Padua, Tesis doctoral.
- [3] Leigue Fernández, M.A. (2014) *Fitodepuración de diferentes aguas residuales utilizando cultivos energéticos*. Universidad de Padua, Tesis doctoral.
- [4] Gonzáles Lara, L. (2017) *Fitorremediación para la extracción del colorante "azuldemetileno" mediante el uso de Eichhorniacrassipes*. Universidad Autónoma del Estado de México, Tesis de licenciatura.
- [5] Arda, Y. y Aysenur, U. (2009) *Comparison of Horizontal and Vertical Constructed Wetland Systems for Landfill Leachate Treatment*. Bioresource Technology, 100 (9), 2521–2526.
- [6] Jiménez-Cerón, Y.F., Delgado-Calvache, L.I., Fernández-Tulande, C., Pino-Alegría, H.M., Casas-Zapata, J.C., Madera-Parra, C.A., Lara-Borrero, J.A., Morató-Farreras, J., y Rengifo-Canizales, E. (2018). *Tratamiento de lixiviados utilizando humedales construidos y determinación de conductividades hidráulicas en clima tropical*. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 21(2), 543-552. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.979> .
- [7] Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F. and Moulin, P. (2008) *Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity*. Journal of Hazardous Materials, 150, 468-493. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>
- [8] Shiguango S., O.J. (2016) *Diseño e implementación de una biojardinera mediante fitodepuración para tratamiento y reutilización de aguas grsies domicialiras*. Universidad Nacional Loja, Tesis de licenciatura.
- [9] Millán Torres, C.P. (2008) *Remoción de sulfato en riles mediante el uso de fitorremediación*. Universidad de Chile, Tesis de licenciatura.
- [10] Borja Ortiz, C.A. (2020) *Correlación entre el CBR, DCP, las propiedades índice y mecánicas en los suelos granulares de la parroquia san José de Poaló del cantón Pillaro, provincia de Tungurahua*. Universidad Técnica de Ambato, Tesis de licenciatura.
- [11] SENAMHI. senamhi bolivia. [En línea] 2019. <https://senamhi.gob.bo/index.php/inicio>.